Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

(повна назва факультету)

кафедри металургійне обладнання

(повна назва кафедри)

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему «**Аналіз шляхів підвищення ефективності роботи дробарки ударної дії**»

Виконав: магістрант групи 8.1334

Скирта О.М. _____

(ПІБ) (підпис)

спеціальності 133 Галузеве машинобудуванн»

(шифр і повна назва)

спеціалізація _____

(шифр і повна назва)

освітньо-професійна програма

133.00.12 Металургійне обладнання

(шифр і повна назва)

Керівник Шевченко І.А. _____

(прізвище та ініціали) (підпис)

Н.контроль Васильченко Т.О. _____

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2025р.

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерний навчально-науковий інститут ім.Ю.М. Потебні

Кафедра Металургійного обладнання

Рівень вищої освіти магістр
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(шифр і повна назва)

Спеціалізація _____
(шифр і повна назва)

Освітньо-професійна програма 133.00.12 Металургійне обладнання
(шифр і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри А.О. Власов
"__" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Скирта Олександр Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Аналіз шляхів підвищення ефективності роботи дробарки ударної дії
керівник роботи Шевченко І.А., к.т.н.,доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "__"____2025 року №__

2. Термін подання студентом роботи 01 грудня 2025 року.

3. Вихідні дані до роботи: Технологічні вимоги до процесу подрібнення крихких матеріалів; ефективність процесу дроблення дробарками ударної дії; технічні характеристики дробарок ударної дії. Інші вихідні дані вибираються магістрантом самостійно на підставі аналізу джерел інформації за темою дослідження.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Огляд та аналіз науково-технічних рішень за темою роботи; Теоретичні дослідження дроблення у дробарках ударної дії; Огляд та аналіз науково-технічних та експериментальних досліджень за темою роботи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових складових):
Графічний матеріал має бути кількістю не більш 8 одиниць плакатів, на яких розкривається суть магістерської роботи.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Шевченко І.А.		
2	Шевченко І.А.		
3	Шевченко І.А.		

7. Дата видачі завдання 02

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Прим
1	Збір матеріалу на проектування	01.09.2024 – 01.11.2024	
2	Групування та аналіз зібраного матеріалу. Уточнення завдань проектування	01.11.2024 – 01.02.2025	
3	Виконання теоретичної частини проекту	01.02.2025 – 01.04.2025	
4	Виконання графічної частини проекту	01.04.2025 – 01.06.2025	
5	Написання та оформлення пояснювальної записки	01.06.2025 – 01.10.2025	
6	Перевірка проекту консультантами	01.10.2025 – 20.10.2025	
7	Попередній захист проекту	30.11.2025	
8	Переплітання роботи	05.12.2022	
9	Захист проекту у ДЕК	За графіком	

Студент _____ (підпис) Скирта О.М. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ (підпис) Шевченко І.А. (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Скирта О.М. Аналіз шляхів підвищення ефективності роботи дробарки ударної дії.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник І.А. Шевченко. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні запорізького національного університету, кафедра «Металургійне обладнання», 2025.

В роботі проведено аналіз стану питання дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на продуктивність і енергоємність процесу подрібнення, ресурсу роторної дробарки, які враховують знос робочих органів та якість подрібнення.

Ключові слова: УДАР, ДРОБАРКА, ЗУСИЛЛЯ ДРОБЛЕННЯ, РОТОР, ЗНОС.

ABSTRACT

Skyrta O.M. Analysis of ways to increase the efficiency of the impact crusher. Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 133 - Industrial mechanical engineering, scientific supervisor I.A. Shevchenko. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia Zaporizhia National University, Department of "Metallurgical Equipment", 2025.

The work analyzes the state of the issue on the topic, studies the influence of design and technological parameters on the productivity and energy intensity of the crushing process, the resource of the rotor crusher, which take into account the wear of the working parts and the quality of crushing.

Keywords: IMPACT, CRUSHER, CRUSHING EFFORT, ROTOR, WEAR.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ …….. 7

ВСТУП ……... 8

1 АНАЛІЗ СТАНУ І НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ДРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ …….. 9

1.1 Проблеми теорії і практики використання твердого палива в агломерації …….. 9

1.2 Вплив крупності вапняку і палива на агломерацію …… 9

1.3 Теоретичні основи процесу механічного подрібнювання матеріалів ... 14

1.4 Машини для дроблення матеріалів …….. 20

1.4.1 Загальні відомості і класифікація сучасних способів руйнування твердих матеріалів ……... 21

1.4.2 Огляд сучасних дробильних машин ударної дії ……... 23

1.4.3 Конструкція і принцип дії молоткових дробарок …….. 26

1.4.4 Конструкція і принцип дії роторних дробарок …….. 35

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ УДАРОМ … 38

2.1 Фактори, що впливають на процес подрібнення дробарками ударної дії ……... 38

2.2 Аналіз і вибір руйнівного впливу для створення ефективних подрібнювачів ……. 40

2.3 Аналіз способів руйнування матеріалів …… 41

2.4 Аналіз руйнівних впливів та конструктивні принципи створення дробарок ударної дії ……... 47

2.5 Технологічні характеристики дробарок ударної дії …… 52

2.6 Визначення абразивності для ударних дробарок ……. 60

2.7 Аналіз методів підвищення зносостійкості робочих органів дробарок ударної дії …… 63

2.7.1 Способи підвищення зносостійкості деталей роторної дробарки … 65

2.8 Процес абразивного зносу била ……. 67

2.9 Експлуатаційні дані по зносу деталей дробарок …….. 69

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ …….. 73

3.1 Мета досліджень …… 73
3.2 Програма досліджень 73

3.2.1 Лабораторна установка для проведення досліду на знос бил та дроблення матеріалу …… 74

3.2.2 Методика експерименту …….. 76

3.2.3 Методика замірювання зносу била ваговим способом ……. 78

3.2.4 Методика замірювання закруглення била ваговим способом …. 78

3.2.5 Точність вимірювань при експериментах ……. 79

3.3 Встановлення отриманих залежностей …… 81

3.3.1 Залежність питомого зносу била від кута атаки ……. 81

3.3.2 Залежність питомого зносу від ширини била ……. 84

3.3.3 Залежність ступеня дроблення та питомого зносу від зносу била 85

ВИСНОВКИ …….. 88

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …… 90

ДОДАТКИ …… 92

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

V	-	об’єм подрібнюваного матеріалу
E	-	модуль пружності матеріалу
σ_{lim}	-	граничні значення нормальних напруг
τ_{lim}	-	граничні значення дотичних напруг
i	-	ступінь дроблення (подрібнення)
D_p	-	діаметр ротора ротора
L	-	довжина ротора
D_{max}, d_{max}	-	розміри максимального зерна шматка у вихідному і дробленому (подрібненому) матеріалі
Q	-	продуктивність дробарки
$Q_o^{\max}$	-	максимальне граничне значення продуктивності
$Q_o^{\min}$	-	мінімальне граничне значення продуктивності
n	-	частота обертання ротора
P	-	потужність дробарки
E	-	модуль пружності
η	-	ККД приводу дробарки
N	-	потужність електродвигуна
$И$	-	питомий знос матеріалу бил
α	-	кут атаки поверхні била
r	-	радіус закруглення робочої кромки била
Δm	-	середній масовий знос бил
$И_{30э}$	-	показник абразивності абразивного матеріалу, на якому визначена зносостійкість швидкості 30 м/с
$И_{60э}$	-	показники абразивності абразивного матеріалу, на якому визначена зносостійкість для швидкості 60 м/с

ВСТУП

Актуальність теми. Щорічно в металургії піддається подрібненню величезна маса сипучих матеріалів. Нині перспективним напрямком є використання подрібнювачів, що реалізують у своїх конструктивно-технологічних схемах енергоефективні способи руйнування рудних і нерудних матеріалів, до яких належить удар.

Процес дроблення характеризується великою кількістю факторів, що визначають технологічні показники процесу. Основними факторами, що впливають, є фізико-механічні властивості матеріалів, зокрема, дробимість породи. Повнота використання властивості подрібнення є одним із компонентів оцінки ефективності тієї чи іншої дробильної машини.

Разом з тим, якісні характеристики таких способів подрібнення забезпечуються дотриманням встановлених робочих зазорів, величини яких визначаються як зносостійкістю деталей дробильних машин, так і зношувальною здатністю подрібнювальних матеріалів.

У зв'язку з цим, дослідження та вдосконалення процесів дроблення матеріалів ударом та дробильних машин, в якому він реалізується, було і залишається актуальним науково-виробничим завданням.

Мета роботи – аналіз шляхів підвищення ефективності роботи дробарки ударної дії роторного типу.

Задачі дослідження:

1. Дослідити теоретичні основи процесу дроблення матеріалів, дослідження зв'язку між витратами енергії та характеристиками продукту, що подрібнюється.
2. Провести аналіз різних руйнівних впливів та їх ефективність для застосування удару при подрібненні матеріалів.
3. На основі аналізу досліджень виявити основні напрямки щодо підвищення довговічності роторних дробарок ударної дії.

4. Встановити аналітичні залежності продуктивності та енергоємності процесу подрібнення, що враховують знос робочих органів роторної дробарки.

Предмет дослідження: технологічний процес дроблення крихких матеріалів ударом в роторній дробарці.

Об'єкт дослідження: закономірності зносу робочих поверхонь робочих органів роторної дробарки.

Методи дослідження. При виконанні роботи використано стандартні методики із застосуванням математичного моделювання, сертифікованих приладів та сучасної обчислювальної техніки з пакетом програм для обробки результатів експериментів.

Інформаційною базою дослідження були: нормативно-законодавчі документи; дані, опубліковані у роботах дослідників; аналітичні матеріали науково-дослідних організацій України та інших країн; інформація, розміщена на офіційних сайтах науково-освітніх організацій, що займаються проблемами дроблення.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 93 сторінках машинописного тексту, містить 8 таблиць, 25 рисунків, 49 формул, список посилань з 30 найменувань і 2 додатки.

1 АНАЛІЗ СТАНУ І НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ДРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ

1.1 Проблеми теорії і практики використання твердого палива в агломерації

Незважаючи на більш ніж столітню історію розвитку, агломерація як метод підготовки руд до плавки не тільки не втратила своєї значущості для чорної металургії, а й набула широкого поширення в ряді інших галузей промисловості.

Технічно зовні дуже просто оформлений аглопроцес, разом з тим, в науковому плані є одним з найбільш цікавих і складних в металургії. Хоча головна роль в утворенні шматка чисто фізичних процесів спікання, плавлення і кристалізації очевидна, проте істотний вплив на формування майбутніх фізичних і фізико-хімічних характеристик готового агломерату надають початковий склад і підготовка шихти, окислювально-відновні реакції, контактні взаємодії на межі розділу "тверде -рідке "і хіміко-мінералогічні перетворення в твердій і рідкій фазах. Очевидно і те, що глибина розвитку і ступінь завершеності кожного із зазначених явищ нерозривно пов'язані з температурно-часовими параметрами спікання, обумовленими процесами горіння і теплообміну. Висока значимість кожного з перерахованих процесів і їх взаємопов'язаність привели до того, що всі вони в сукупності були об'єднані одним поняттям - механізм формування агломерату [1, 2].

1.2 Вплив крупності вапняку і палива на агломерацію

За даними World Steel Association світове виробництво чавуну в 2014 році склало 1,18 млрд. т. Одним з основних шихтових матеріалів для доменної плавки є залізорудний агломерат. Якість і собівартість чавуну в значній мірі залежать від прогресивності технології виробництва агломерату і рівня його

якості. Основною складовою енергоємності агловиробництві є питома витрата твердого палива, який залишається на вітчизняних аглофабриках значно вище (44,6…64,3 кг / т агломерату) зарубіжних показників (аглофабрики Японії, Німеччини – 36…45 кг/т агломерату). На витрати твердого палива при виробництві агломерату впливають наступні чинники: сортамент і характеристика використовуваного палива, компонентний і хімічний склади аглошихти, технологічні параметри процесу агломерації. Раціональне використання твердого агломераційного палива сприяє формуванню найбільш економічного паливно-енергетичного балансу аглодоменного виробництва. Це підвищує його ефективність і покращує екологічну ситуацію на металургійному підприємстві.

На агломераційні фабрики великих металургійних підприємств, як правило, поставляються різні сорти твердого палива, які істотно розрізняються за своїми якісними характеристиками (гранулометрическому, хіміко-мінералогічному складам). Це ускладнює технологію підготовки твердого палива до агломерації. Нестабільність поставок і властивостей вугілля для коксохімічних виробництв металургійних підприємств призводить до варіювання виходу коксового дріб'язку і коксових шламів з одночасним подорожчанням товарних продуктів коксування (коксу фракції 10…80 мм).

У зв'язку з цим підвищення якості агломерату, розробка ефективних технологій підготовки твердого палива для агломераційного процесу, заснованих на отриманні палива необхідного гранулометричного складу та раціональне його введенні в агломераційну шихту, є важливою науково-практичним завданням, що має велике значення для металургійної галузі та економіки країни.

Незважаючи на активний пошук і використання замінників коксового дріб'язку (антрацитовий штиб, худий вугілля, буровугільний напівкокс і ін.) [1 - 6], даний матеріал є найбільш поширеним видом твердого палива для аглофабрик, що забезпечує відносно високі показники процесу спікання і якість агломерату.

Показники процесу спікання агломерату і його якість в значній мірі залежать від технічного, гранулометричного складів твердого палива і способу його введення в шихту. Для спікання тонкоподрібненого концентратів коксове паливо повинне містити мінімальну кількість частинок як крупніше 3 мм, так і дрібніше 0,5 мм. У разі застосування палива з підвищеною реакційною здатністю необхідний верхня межа крупності може збільшуватися до 5 мм, при використанні палива зі зниженою реакційною здатністю - відповідно зменшуватися до 2… 3 мм [7]. На думку авторів роботи [2], крім зазначених фракцій, технологічна цінність агломераційного палива повинна оцінюватися співвідношенням в ньому фракцій: 0…0,5, 0,5…1, 0,1,0…2,0, 2,0 …3,0, 3,0… 5,0 і більше 5,0 мм.

Для коксового дріб'язку зазначеного діапазону крупності (0,05 - 8 мм) зі збільшенням розміру частки закономірно зменшується її питома поверхня, загальна і відкрита пористість з одночасним збільшенням уявної щільності і закритою пористості.

Зміна гранулометричного складу окомкованної аглошіхти і розподіл палива по її класах при використанні окремих фракцій коксового дріб'язку призводять до помітних змін вмісту вуглецю в класах шихти.

Найменша концентрація вуглецю виявлена в грудках аглошіхти крупніше 5 мм. Максимальна неоднорідність шихти, з точки зору розподілу вуглецю по її класів, спостерігається при використанні палива крупністю 0,4…1 мм. Застосування менш і більш великих фракцій коксового дріб'язку характеризується більш рівномірним розподілом вуглецю за класами шихти, проте для дрібного палива фракції 0 - 0,4 мм це супроводжується найбільшою неоднорідністю шихти по гранулометричному складу (авторами не вказується порівнюваний діапазон крупності). Для палива фракцій 1… 2,5 і 2,5… 3 мм має місце висока однорідність шихти як по ситова складу, так і за розподілом в ній вуглецю [11].

Аналіз результатів дослідження [6] показує, що основним носієм вуглецю окомкованной шихти при використанні коксового дріб'язку розміром 0 - 0,5, 0-5

і 1 -2 мм є фракція шихти 0-3 мм, що містить до 79% всього внесеного палива. Збільшення крупності коксового дріб'язку до 3 - 3,5 мм призводить до того, що вона майже вся розподіляється у фракції шихти більше 3 мм, що навіть зумовлено підвищення вмісту вуглецю у фракції шихти 3-5 мм до 9,5%.

Отже, головним чинником, що впливає на розподіл твердого палива в шихті різної крупності, є його гранулометричний склад.

В роботі [7] проведено дослідження розподілу палива в аглошихту на Комкувачі ПРО 3,2х12,5 агломашини №2 ВАТ «НЛМК». Порівняльний аналіз закочування коксового дріб'язку різної крупності при огрудкування різних шихт показав, що дрібне паливо, незалежно від його виду, закочується в 2…3 рази більше, ніж паливо фракції 0,5…1,0 мм і в 3… 5 разів більше, ніж паливо фракції 1…2 і 2…3 мм. Крім того, відзначається підвищення рівномірності розподілу палива по класах [7].

Вплив крупності коксового дріб'язку на комкуємость агломераційної шихти також було досліджено в лабораторних умовах [4]. Аглошихту змішували і огрудковується на тарілчастому грануляторі. В результаті проведених досліджень виявлено, що видалення з палива фракції менше 0,5 мм збільшує коефіцієнт комкуємості аглошіхти на 6…16,5%. Широкий інтервал значень автори роботи пояснюють впливом на процес огрудкування таких факторів, як загальна кількість палива (варіювали в діапазоні 2,7…3,2%) і вологість шихти (змінювалася в діапазоні 7,2…8,8%). Видалення з палива фракції більше 3 мм, навпаки, знижує коефіцієнт комкуємості на 5,5… 8,5% , а середній діаметр - на 0,3…0,8 мм.

Крупність палива визначає багато в чому температурно-теплові умови процесу спікання аглошихти.

Крупність палива істотно впливає на динаміку аглопроцесу: якщо на паливі фракції менше 0,5 мм швидкість фільтрації повітря монотонно зростає в ході спікання, досягаючи до кінця процесу значень, в кілька разів перевищують її величини в початковий момент спікання, то в міру укрупнення палива (наприклад , на фракції 1…2,5 мм) спостерігається відносно тривалий період

стабілізації швидкості фільтрації повітря через аглошар (більше половини часу спікання).

Підготовка вапняку на аглофабриках полягає в його дробленні до необхідної крупності: 3…0 мм для дозування в шихту та 10…3 мм для отримання обожненого вапняку.

При виборі оптимальної крупності вапняку використали фракції 3…6, 6…8, 8…20 та 10…12 мм. Висота шару, що обжилася у всіх експериментах складала 500 мм. Паливом слугувала косова дрібнота крупністю 3…0 мм. Випалювання кожної фракції вапняку проводили за різними витратами палива. Виявилося, що за однакових витратах коксової дрібноти ступінь випалювання збільшується зі зменшенням крупності вапняку (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Вплив крупності вапняку на процес випалювання

$a_{вап}$, мм	K, %	$G_ш$, кг	$G_{вап}$, кг	$\tau_{вип}$, хв	S, %	Q, т/м^2·год
3-6	8	3,03	2,08	9,4	57,0	1,51
	9	2,96	1,88	9,7	69,5	1,61
	10	2,94	1,79	10,0	75,0	1,61
	11	2,90	1,72	10,1	78,5	1,60
6-8	9	3,08	2,04	9,4	62,0	1,60
	10	3,08	2,0	9,5	64,3	1,61
	11	2,99	1,87	10,0	69,6	1,55
	12	3,0	1,79	10,5	76,1	1,61
	13	2,95	1,68	10,7	82,9	1,55
8-10	11	3,12	1,98	10,0	67,1	1,58
	12	3,12	1,94	10,3	69,4	1,56
	13	3,10	1,81	10,7	78,8	1,59
	14	3,10	1,75	11,0	83,3	1,58
10-12	11	3,17	2,16	10,1	54,3	1,40
	13	3,17	2,08	10,4	60,0	1,43
	13	3,18	2,02	10,7	64,5	1,45
	14	3,19	1,95	11,0	69,8	1,48

При витратах кокосової дрібноти 11% ступінь випалювання для фракції 3-6 мм складала 78,5%, а для фракції 10-12 мм – всього 54,3%. Питома продуктивність установки знизилася при цьому з 1,6 до 1,4 т/м^2·год [8].

При визначенні оптимальної крупності палива брали фракції 3…0, 3…4 та 4…6 мм. У всіх експериментах витрати палива складали 10%. Результати, надані в табл.1.2, свідчать проте, що вапняк фракції 10…12 мм краще випалюється у випадку використання крупних фракцій палива. Застосування такого ж палива для більш дрібних фракцій вапняку менш ефективне.

Таблиця 1.2 – Вплив крупності палива на процес випалювання вапняку [8]

$a_{КМ}$	$a_{вап}$, мм	$G_{Ш}$,кг	$G_{вап}$, кг	S, %	$\tau_{вип}$, хв	Q, т/м^2·год
0-3	10-12	3,17	2,16	54,3	10,0	1,40
3-4	10-12	3,17	2,09	60,5	10,6	1,42
4-6	10-12	3,17	1,99	69,0	11,4	1,44
0-3	3-6	2,90	1,72	78,5	10,1	1,60
3-4	3-6	2,90	1,71	79,6	10,1	1,61

Найбільш вигідним є випалювання дрібних фракцій вапняку. Навіть незначне збільшення крупності вапняку, що випалюється, з 3-6 до 6-8 мм потребує додаткових витрат палива [8].

1.3 Теоретичні основи процесу механічного подрібнювання матеріалів

Подрібнювання - це руйнування матеріалу під дією зовнішніх сил, що переборюють сили зчеплення між частинками. Подрібнення потрібне для того, щоб створити велику питому поверхню матеріалу, тоді хімічні реакції перебігають інтенсивніше.

Основні фактори процесу подрібнення - ступінь подрібнення і питома витрата енергії на одиницю одержуваної продукції.

Ступенем подрібнення називають відношення розміру поперечника шматка матеріалу до подрібнювання до розміру поперечника шматка (чи частинки) після подрібнювання.

Основна фізична характеристика подрібнюваного матеріалу – його міцність. Залежно від міцності матеріали поділяють на м’які, середньої

твердості і тверді. Ступінь твердості матеріалу визначають за шкалою твердості.

Тверді матеріали можна подрібнювати роздавлюванням, ударом, стиранням, розколюванням чи поєднавши ці способи.

Вибір способу залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу і потрібного ступеня подрібнення. Для твердих матеріалів ефективні роздавлювання й удар, для крихких - розколювання; для вологих в'язких матеріалів - стирання в сполученні з роздавлюванням.

Практично всі способи механічного навантаження матеріалів з метою їх руйнування (удар, стиснення, стирання, зсув, різання) знайшли застосування в тих чи інших конструкціях подрібнювальних машин. Вибір способу механічного впливу на продукт залежить від його властивостей і технологічних вимог до готового продукту. Так, Рейс поділяє всі матеріали на десять груп залежно від способу навантаження (табл.1.3).

Таблиця 1.3 - Способи механічного впливу залежно від властивостей подрібнюваних матеріалів (за Рейсом) [12].

Властивості матеріалу	Спосіб навантаження				
	стискання	удар	стирання	відбитий удар	зсув
Твердий					
лещадний	Х	х	-	х	-
крихкий	Х	х	-		-
в'язкий	Х	х	-	х	-
Середньої твердості	Х	х		х	о
Крихкий м'який	-	-	х	-	х
М'який					
крихкий	Х	х	х	х	х
в'язкий	Х	х	о	о	х

Примітка. Застосування способу навантаження: х - застосовується, і 0 - обмежено застосовується, "-" - не застосовується.

З цієї таблиці видно, що найпоширенішими для твердих продуктів є два способи навантаження: удар та стиск. Вважають, що найефективніша руйнація основних твердих матеріалів відбувається при ударному навантаженні.

Подрібнювання - це складний процес, що залежить від цілого ряду факторів, які важко піддаються обліку й математичному опису. Основні фактори, від яких залежить витрата енергії на одиницю продукції, - твердість матеріалу, його вологість, в'язкість, стан поверхні, розмір і форма шматків, розміщення шматків між робочими органами машини та ін.

Єдиної універсальної теорії подрібнювання немає. Минулого сторіччя було зроблено перші спроби теоретично обґрунтувати процеси подрібнювання. Істотний внесок у вирішення цієї проблеми належить таким вітчизняним і зарубіжним науковцям та інженерам, як Л. Б. Левінсон, В. Л. Кірпічов, П. Риттінгер, Ф. Кік, Г. Г. Єгоров, З. В. Канторович та ін.

Щоб визначити кількість енергії, потрібної для подрібнювання матеріалу, є два теоретичні підходи: поверхнева теорія подрібнювання, запропонована 1867 року П. Риттінгером, та об'ємна теорія, запропонована 1874 року В. Л. Кірпічовим.

Поверхнева теорія (закон Ріттінгера): робота, затрачувана на подрібнювання тіла, прямо пропорційна площі новоутворених поверхонь.

Пояснити цей закон можна так. Нехай на поділ кубика (рис.1.1) з ребром, що дорівнює одиничному розміру, по одній площині витрачають роботу A. Для поділу такого самого кубика на дрібніші зі стороною в 1/2 потрібно розділити його по трьох площинах. При цьому витрачена робота дорівнює $3A$.

Аналогічно, якщо розділити кубик на ще дрібніші зі сторонами 1/3, 1/4, …, $1/n$, … $1/m$, то площин поділу буде 6, 9, …, $3(n-1)$, …, $3(m-1)$.

Робота, затрачувана на подрібнювання, становитиме $6A$, $9A$, …, $3A(n-1)$, …, $3A\,(m-1)$.

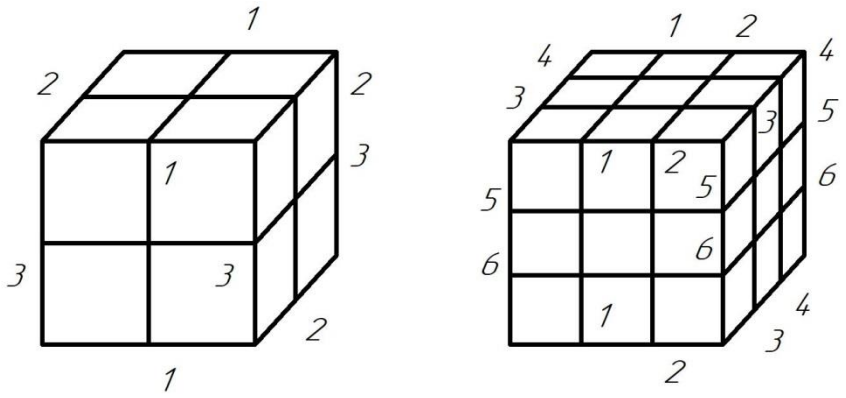


Рисунок 1.1 – Схема подрібнення кубика [11]

Отже, відношення робіт, витрачених на поділ матеріалу у формі куба на кубики зі сторонами $1/n$, $1/m$, таке:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{(n-1)\cdot 3A}{(m-1)\cdot 3A} = \frac{n-1}{m-1} \qquad (1.1)$$

За досить великих n і m одиницею можна знехтуваити, тоді:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{n}{m} \qquad (1.2)$$

тобто за досить великого ступеня подрібнювання робота дроблення прямо пропорційна ступеню подрібнювання.

Ріттінгер запропонував свою гіпотезу, але не підтвердив її дослідним шляхом. Інші дослідження привели до висновку, що закон Ріттінгера можна використовувати за певних умов, а саме – у разі помелу твердих матеріалів. Закон Ріттінгера має ще і той недолік, що дає змогу тільки порівняти витрати енергії при різному ступені подрібнення і не дає можливості розрахувати абсолютну величину роботи.

Об’ємна теорія (Закон Кірпічова–Кіка) основана на тому, що на подрібнюваний шматок матеріалу діють зовнішні сили, які зумовлюють у

матеріалі напругу, що дорівнює межі міцності під час стискання. Отже, робота витрачається на деформацію матеріалу.

Згідно із законом Кірпічова–Кіка робота подрібнення пропорційна об'єму деформованих шматків, що подрібнюються.

З теорії пружності відомо, що робота деформації під час стискання

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E} \tag{1.3}$$

де σ - межа міцності під час стискання;

V - об’єм подрібнюваного матеріалу;

E - модуль пружності.

За об’ємною теорією відношення робіт, затрачуваних на подрібнювання геометрично подібних тіл того самого складу, дорівнює відношенню об’ємів цих тіл:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} \tag{1.4}$$

Розглянутий закон не враховує ступеня подрібнення. Крім того, під час розрахунків роботи подрібнення для різних машин необхідно знати величину V.

Об’ємну теорію варто застосовувати для опису процесів подрібнювання, у яких енергія витрачається на деформацію, а поверхневу теорію - для описання процесів помелу, у яких переважає стирання з інтенсивним утворенням нової поверхні.

Узагальнена теорія подрібнення (Закон Ребіндера) деякою мірою об'єднує поверхневу і об'ємну теорії. Закон Ребіндера математично можна записати так:

$$A = \sigma_\Delta F + K_\Delta V, \tag{1.5}$$

де А – робота, яка затрачується на руйнування твердого тіла, Дж;

K і σ - коефіцієнти пропорційності: (питома поверхнева енергія, Дж/м^2 та питома робота пластичної і пружної деформації, Дж/м^3 відповідно;

$_{\Delta}V$ і $_{\Delta}F$ - деформований об'єм і новоутворена поверхня.

Коли під час подрібнення знов утворені поверхні невеликі, що постерігається під час дроблення, першою складовою $K_{\Delta}V$ рівняння можна нехтувати і $A = \sigma_{\Delta}F$, тобто отримали закон Кірпічова–Кіка. Під час помелу, навпаки, $_{\Delta}V$ – мала величина і $A = \sigma_{\Delta}F$.

Розглянуті теорії подрібнення характеризують лише загальні теоретичні основи процесів подрібнення і не дають змогу із достатньою точністю розраховувати витрати енергії. Тому під час розрахунків потужності приводів подрібнювальних машин у більшості випадків використовують практичні дані.

Аналізуючи поверхневу, об'ємну й узагальнену теорії подрібнення, можна зробити висновки про їх застосування.

Поверхневу теорію застосовують для пояснення процесу різання тіла (щодо подрібнювання відповідає процесу стирання), а також опису процесів дрібного дроблення і помелу, тому що вона враховує співвідношення між ступенем подрібнювання і витратою енергії. Недолік – труднощі визначення питомої роботи, затраченої на утворення нової поверхні.

Об'ємна теорія пояснює процеси подрібнювання роздавлюванням і ударом, які застосовують переважно для крупного і середнього дроблення. Вона дає можливість визначати роботу руйнування, але не враховує впливу ступеня подрібнювання на витрату енергії. Узагальнена теорія, з інженерного погляду, непридатна для вирішення конкретних завдань, тому що потребує точного визначення коефіцієнтів для кожного матеріалу.

Великого поширення набули формули, що поєднують поверхневу й об'ємну теорії, зокрема у працях Ф. Бонда, А. К. Рундквіста та ін.

Заслуговує на увагу формула потужності процесу подрібнювання В.Ф. Дубовицького:

$$N = \frac{\sigma^2 П_V}{2{,}4E} \cdot (i-1) \qquad (1.6)$$

де σ - межа міцності, МН/м^2;

$П_V$ - об'ємна продуктивність технологічної лінії, м^3/год;

E - модуль пружності матеріалу, МН/м^2.

Формулу (1.6) отримано в результаті об'єднання поверхневої й об'ємної теорії для процесів подрібнення роздавлюванням, вона дає можливість (якщо відомо ККД процесу) визначити потужність урухомника (приводу) багатьох дробарок [11].

Розглянуті теорії подрібнення характеризують лише загальні теоретичні основи процесів подрібнення і не дають змогу із достатньою точністю розраховувати витрати енергії. Тому під час розрахунків потужності приводів подрібнювальних машин у більшості випадків використовують практичні дані.

1.4 Машини для дроблення матеріалів

Згідно ДСТУ 2411-94 «Дробарки. Терміни та визначення» процес подрібнення дроблення – це руйнування твердого кускового матеріалу на дрібні куски. Дробарка – машина для дроблення [9].

Основними видами дробарок є щокові, конусні, валкові, роторні, молоткові [9].

Кожному виду властивий свій набір руйнуючих і подрібнюючих сил та їх напрям.

У металургійній промисловості застосовують здебільшого щокові, конусні, валкові та молоткові дробарки.

1.4.1 Загальні відомості і класифікація сучасних способів руйнування твердих матеріалів

Під способом дроблення розуміється вид впливу руйнівної сили на шматки матеріалу, що подрібнюється.

Дроблення ударом - один з найпоширеніших видів подрібнення.

Робочий орган представляє собою било, який завдає удару по матеріалу. При даному способі подрібнення переважає руйнування ударом. Поділяють його на руйнування вільним ударом і обмеженим ударом. Руйнування при вільному ударі залежить від швидкості руху «молотка». При обмеженому ударі матеріал руйнується між двома робочими органами.

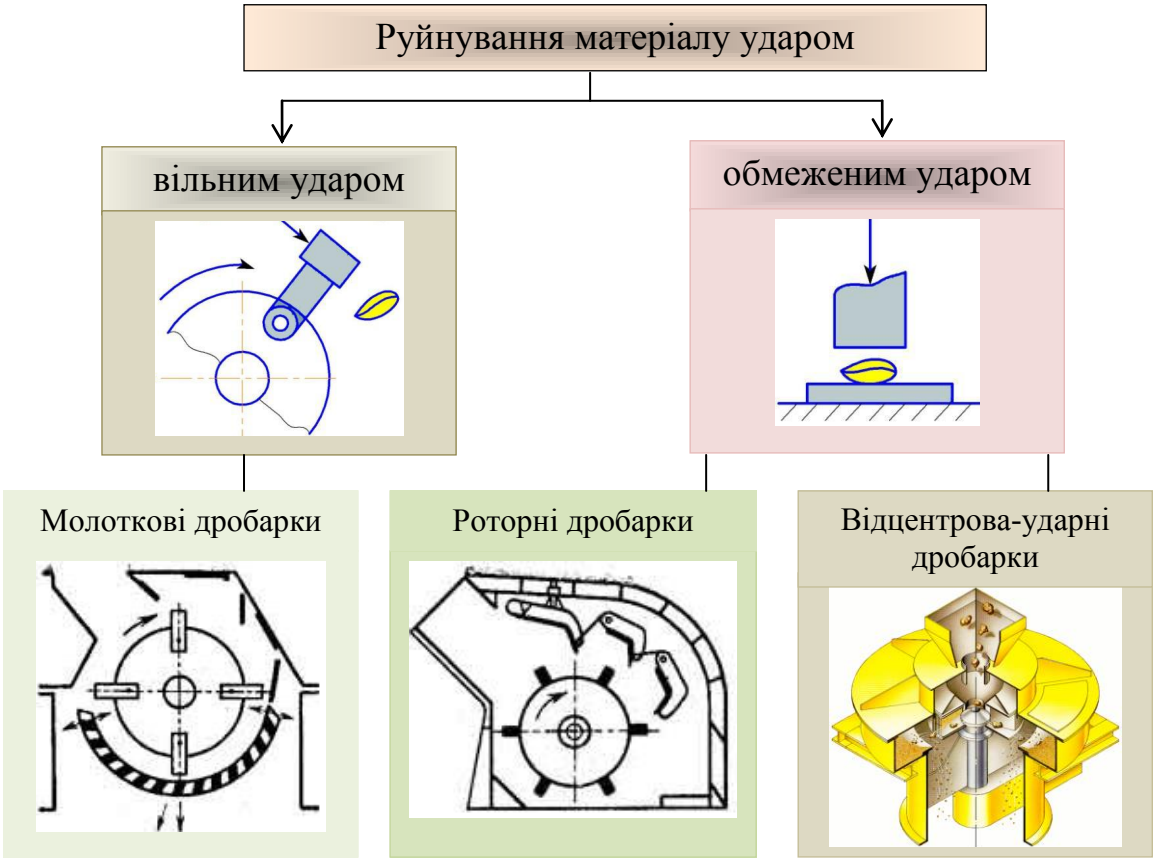
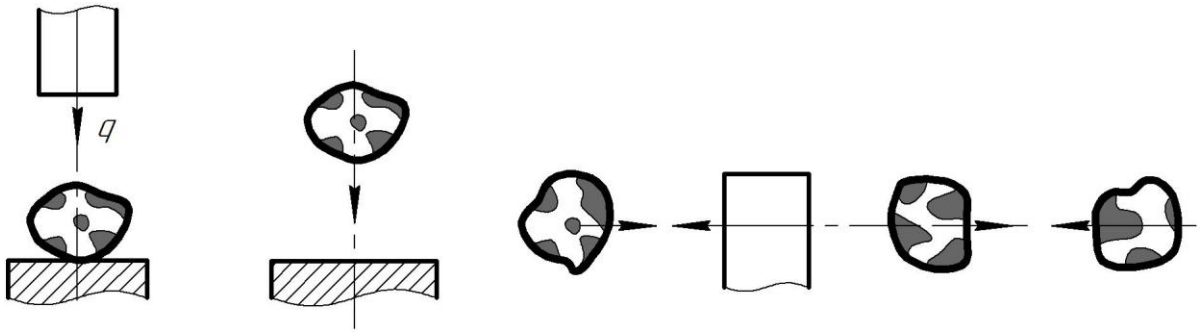


Рисунок 1.2 - Способи дроблення в дробарках динамічної дії

Подрібнювання в дробарках ударної дії відбувається внаслідок:

- удару швидкообертових молотків безпосередньо по шматках матеріалу й удару шматків один об один;
- удару матеріалу об дробильні плити;
- подрібнювання матеріалу між молотками і броньовими плитами;
- подрібнювання матеріалу між молотками і колосниками.

Схеми ударного подрібнення наведені на рис.1.3.



а б в г

а – удар робочого тіла по матеріалу (стиснений удар);

б – удар вільно летючого матеріалу по нерухомій поверхні (вільний удар);

в – зіткнення робочого тіла та матеріалу на льоту;

г – зіткнення часток матеріалу на льоту

Рисунок 1.3 – Схеми ударного подрібнення [13]

Розрізняють обмежений і вільний удар. При обмеженому ударі матеріал руйнується між двома поверхнями,що співударяються, і осколки руйнує мого тіла вільно розлітаються тільки в бічні сторони. В цьому випадку руйнівний ефект залежить від маси тіла, що вдаряє, і швидкості його руху в момент удару (рис.1.3,б).

При вільному ударі частки матеріалу руйнуються в результаті зіткнення їх з тілами, що вдаряються, або один з одним в польоті. В цьому випадку осколки зруйнованої частки можуть розлетітися в усіх напрямках.

Якщо при обмеженому ударі частки руйнуються переважно в місцях зосередження максимальних зусиль, то при вільному ударі вони руйнуються в основному по найбільш слабким спаям. Цим пояснюється можливість

отримання зі сланців, що мають шарувату структуру, пластинчастої крупки, чого не можна досягти жодним іншим способом подрібнення.

При вільному ударі руйнівний ефект залежить головним чином від швидкості зіткнення тіл і не залежить від того, яке з них рухається - руйнівне або те, що руйнується.

У тих випадках, коли руйнування матеріалу проводиться зіткненням рухомих частинок, що руйнівна швидкість зіткнення буде дорівнювати відносній швидкості зустрічі цих частинок (рис.1.4).



а б

а - при зустрічному ударі: б - набігаючому ударі

Рисунок 1.4 – Додавання швидкостей

$$w_y = w_1 + w_2,$$

$$w_y = w_1 - w_2 \qquad (1.7)$$

Швидкість руйнівного удару залежить від механічних властивостей і щільності частки, що руйнується, і не залежить від її розмірів.

1.4.2 Огляд сучасних дробильних машин ударної дії

До подрібнювачів ударної дії відносяться молоткові подрібнювачі, ударно-відцентрові, роторні дробарки, відцентрово-кулеві, барабанні, струминні млини, дезінтегратори та дисмембратори.

Дробарки ударної дії використовують для дроблення і подрібнення матеріалів низької і середньої міцності. Їх застосовують при переробці вугілля,

вапняків, доломітів, гіпсу, бариту, крейди, мергелю, азбестових руд, кам'яних солей і т.п. На подібних матеріалах дробарки ударної дії дозволяють досягати високих ступенів дроблення i = 15 ... 20, в окремих випадках до i = 50, а простота конструкції, низька металоємність, можливість виготовлення машини великої продуктивності і зручність обслуговування роблять їх застосування ефективним [10].

Принципові схеми всіх дробарок ударної дії однакові (рис.1.5).

Дробарки ударної дії поділяють на роторні, в яких дроблення здійснюється ударами бил, жорстко закріплених на роторі, і молоткові, дроблення в яких здійснюється ударами молотків, шарнірно закріплених на роторі.

За кількістю роторів вони бувають одно- і двохроторнні. Найбільшого поширення набули одноротopні дробарки для дроблення малоабразивних матеріалів середньої і малої міцності. Різновид одноротopних дробарок - реверсивні, у яких симетрична камера дроблення і вони можуть працювати при різних напрямках обертання ротора, що дозволяє використовувати била і молотки з двох сторін без переустановлення, тобто збільшується міжремонтний термін роботи машини.

Двохроторнні дробарки бувають одноступінчастого дроблення, коли обидва ротора працюють самостійно і вихідний матеріал надходить рівномірно на кожен з них, і двоступеневого, коли вихідний матеріал надходить спочатку на перший ротор, потім на другий , де остаточно додроблюється.

Основний вузол дробарки - ротор. Для ефективного руйнування дробленого матеріалу підбирають певні окружні швидкості ротора (20 ... 80 м/с), що забезпечують необхідну кінетичну енергію ротора або молотків. При таких високих окружних швидкостях в роторі виникають великі ударні навантаження і навантаження від відцентрових сил, тому конструкція самого ротора, змінних деталей бив і молотків і їх кріплень повинна забезпечувати високу надійність їх роботи і зручність технічного обслуговування.

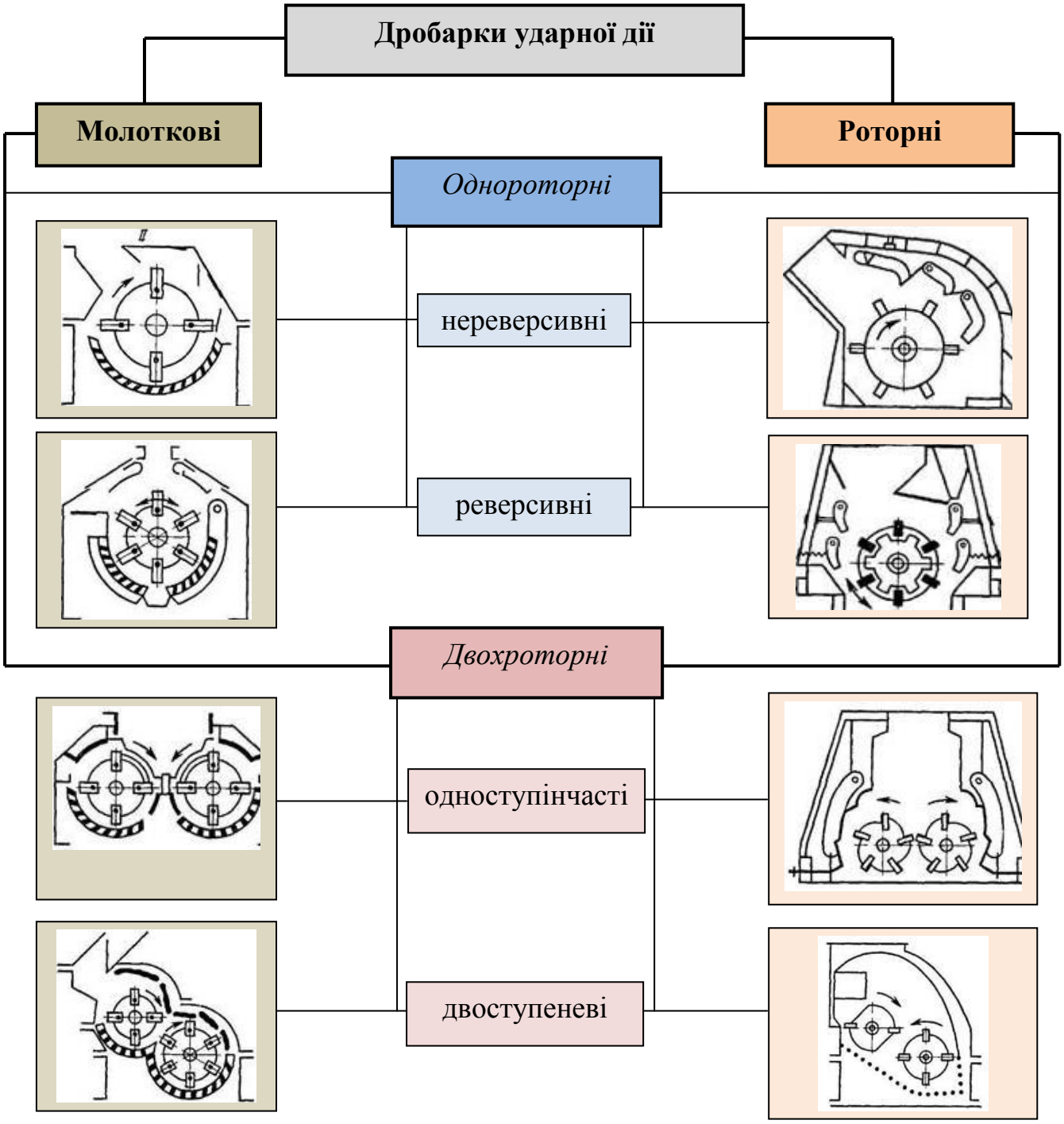


Рисунок 1.4 - Принципові схеми дробарок ударної дії

Головні параметри дробарок ударної дії - діаметр і довжина ротора.

В дробарках ударної дії шматок піддається впливу робочого органу тільки з одного боку. Виникаюча при цьому сила врівноважується силою інерції шматка, яка повинна бути достатньою для створення руйнівних напружень.

Дроблення матеріалу відбувається під впливом механічного удару. При цьому кінетична енергія рухомих тіл частково або повністю переходить в деформації руйнування.

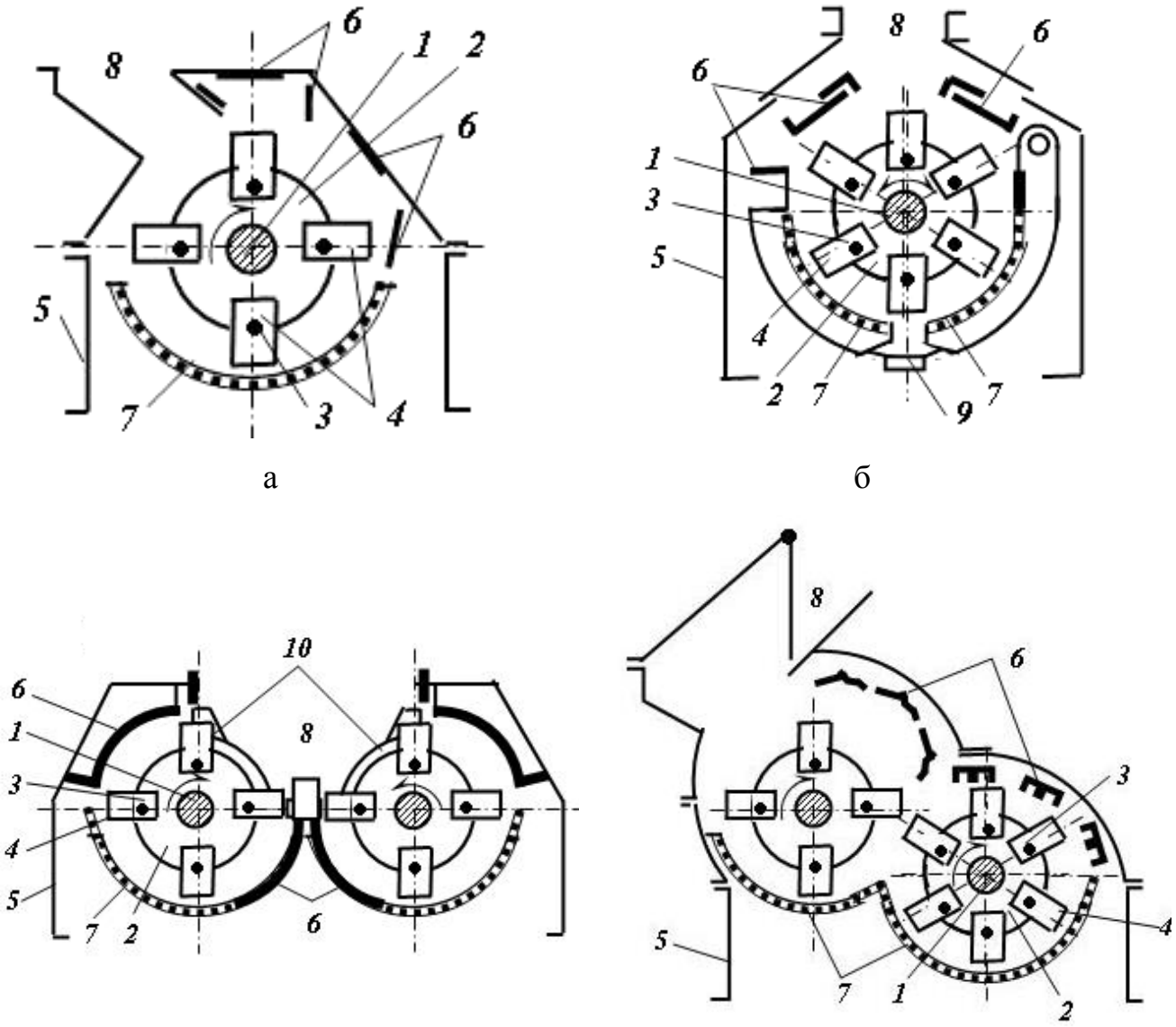
Роторні дробарки можуть застосовуватися для дроблення великих шматків, так як мають масивний ротор і володіють великим запасом енергії робочих органів. Роторні дробарки застосовуються для дроблення вапняку, доломіту, мергелю, гіпсу та інших матеріалів.

У молоткових дробарках процес дроблення визначає лише кінетична енергія самого молотка.

1.4.3 Конструкція і принцип дії молоткових дробарок

У молоткових дробарках матеріал дробиться в основному ударом молотків, які підвішені до ротора, що обертається у робочому просторі дробарки, обмеженому футерованим броньовими плитами корпусом. На рис.1.6 наведені схеми основних типів молоткових дробарок.

Вихідний матеріал через завантажувальний отвір *8* надходить у робочий простір дробарки, де на горизонтальному валу *1* обертається ротор *2* з молотками *4*, закріпленими шарнірно. Молотки вдаряють по грудках і з силою відкидають їх до стінок корпуса *5* на броньові плити *6*, де грудки додроблюються. Таким чином, руйнування грудок матеріалу здійснюється ударом молотків і ударом об футеровочні плити, а також роздавлюванням і стиранням грудок молотками на колосниковій решітці *7*. Дроблений продукт розвантажується униз під дробарку.



Одноротorні: *а* – нереверсивна; *б* – реверсивна.

Двороторні: *в* – паралельного дроблення; *г* – послідовного дроблення.

1 – горизонтальний вал; 2 – ротор; 3 – осі молотків; 4 – молотки;

5 – корпус дробарки; 6 – футеровочні плити; 7 – колосникова решітка;

8 – завантажувальна лійка; 9 – уловлююча камера; 10 – фігурні колосники.

Рисунок 1.6 – Схеми основних типів молоткових дробарок [14,15]

Молоткові дробарки виготовляються з колосниковими решітками і без них. Дробарки з колосниковими решітками застосовуються в основному для дрібного дроблення, вони призначені для отримання дробленого продукту

визначеної крупності. Молоткові дробарки без колосникових решіток видають дроблений продукт заданої крупності внаслідок підвищеної швидкості обертання ротора. Дробарки для дроблення вологих глинистих матеріалів обладнані рухомою відбійною плитою, яка являє собою вбудований у дробарку пластинчатий конвеєр важкого типу.

Таким чином, завдяки конвеєрній подачі в'язкого матеріалу до ротора виключається забивання дробарки.

Молоткові дробарки бувають з обертанням ротора у одну сторону і реверсивні. Можливість зміни напрямку обертання ротора у реверсивних дробарках дозволяє двобічне використання молотків без розбирання дробарки для їхнього повороту.

За числом робочих валів молоткові дробарки розділяються на одно- і двороторні. Двороторні дробарки мають більші в порівнянні з однороторними розміри завантажувального отвору, що дозволяє дробити у них матеріал крупністю до 1200 мм.

Молоткові дробарки призначені для крупного, середнього і дрібного дроблення матеріалів низької і середньої твердості, але частіше їх застосовують для середнього і дрібного дроблення. В молоткових дробарках досягається ступінь дроблення до 30 – 40. Вони характеризуються високою продуктивністю і малою питомою витратою електроенергії.

Однороторна нереверсивна молоткова дробарка (рис.1.7) типу М складається з таких основних вузлів: корпуса, ротора, відбійних плит і колосникової решітки.

Верхня *1* і нижня *2* частини корпуса роблять литими або зварними з прокатної чи листової сталі. Біля бокових стінок корпуса розташовані підшипники, в яких обертається вал *6* ротора *3*. Ротор являє собою збірну конструкцію: на валу *6* жорстко закріплені диски, в кожному з них є шість отворів, крізь які пропущені стержні *5*, що служать осями для шарнірно підвішених молотків *4*.

Верхня частина корпусу футерується відбійними плитами *7*. У нижній частині корпусу розташована колосникова решітка *8*, яка займає 135 – 180^{o} кола, що описується молотками. Вихідний матеріал руйнується ударами молотків, ударами об футерувальні плити, роздавлюванням і стиранням на колосниковій решітці.

Дроблений продукт розвантажується під дробарку крізь колосникову решітку. Колосники решітки виготовляються з сталі марки 60С2 або 45Х і можуть мати різну форму, але частіше за все – трапецієвидну з розширенням щілини у бік розвантаження під кутом 10 – 20^{o}. Вони нахилені до радіуса ротора під кутом 40 – 50^{o} у бік руху матеріалу, що зменшує залипання решітки при дробленні матеріалів з підвищеною вологістю.

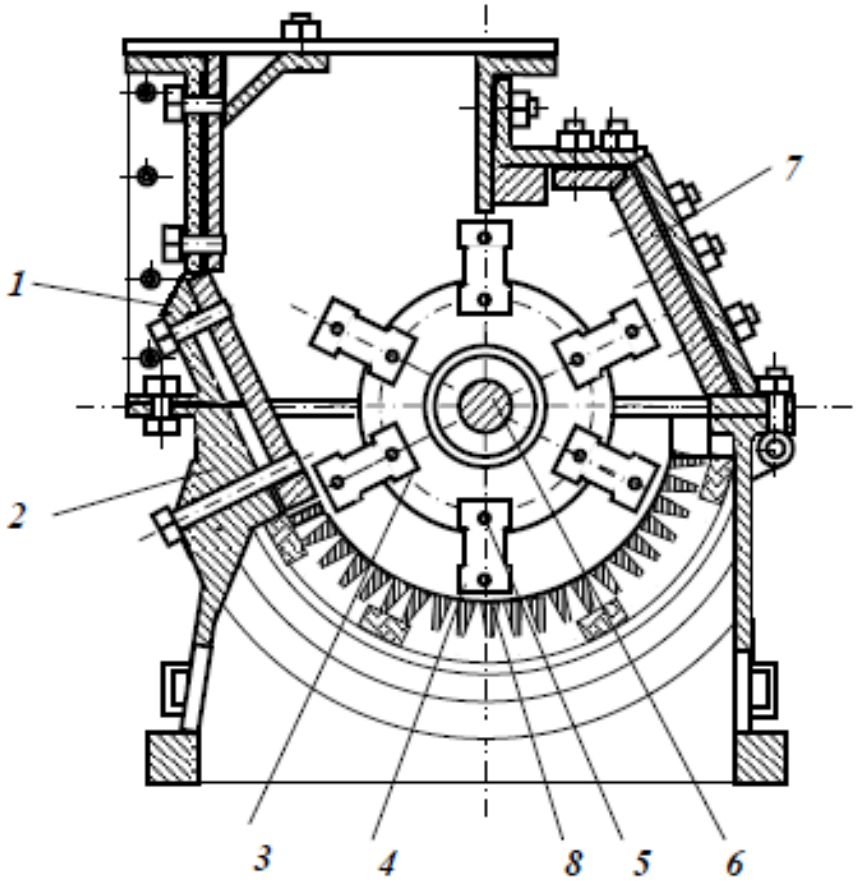


Рисунок 1.7 – Одноротorна нереверсивна молоткова дробарка.
1 – верхня частина корпуса; 2 – нижня частина корпуса; 3 – ротор;
4 – молотки; 5 – осьові стержні; 6 – вал; 7 – футеровочні плити;
8 – колосникова решітка.

Шарнірне кріплення молотків дозволяє уникати поломок при потраплянні у робочий простір дробарки предметів, що не дробляться, тому що у цьому випадку молотки відхиляються на деяких кут.

Одноротoрна реверсивна молоткова дробарка (рис.1.6,б) типу ДМРЕ складається зі зварного корпуса *5*, ротора *2* і колосникової решітки *7*. Передбачена можливість регулювання положення колосникової решітки за допомогою спеціального механізму.

Вал ротора *1* обпирається на підшипники закріплені на станині дробарки. Обертання вал ротора отримує від електродвигуна, з яким він з'єднується муфтою. На валу *1* нерухомо закріплені диски ротора *2*, крізь отвори *2* яких пропущені стержні із вільно надітими на них молотками *4*. Вихідний матеріал через завантажувальний отвір *8* надходить у робочий простір дробарки, де у результаті багаторазових ударів молотків *4* і ударів об футеровочні броньовані плити *6* відбувається дроблення матеріалу. Остаточне дроблення матеріалу роздавлюванням і стиранням здійснюється у кільцевому зазорі між колосниковою решіткою *8* і кінцями молотків *4*.

Колосникова решітка складається з двох однакових секцій, які зверху підвішені на осях, а знизу опираються на ексцентрики регулювального механізму. Поворот ексцентриків змінює положення колосникової решітки залежно від напрямку обертання ротора.

Для уловлювання металевих та інших предметів, що потрапили у дробарку випадково, передбачена уловлююча камера *9*, яка розвантажується періодично.

Центральне розташування завантажувального отвору *8* дозволяє змінювати напрямок обертання ротора, що є перевагою дробарок цього типу, тому що в них можливе двобічне використання молотків без розбирання дробарки для їхнього повороту. Тобто знос молотків у дробарках цього типу рівномірний з двох сторін.

Дробарка призначена для дроблення матеріалів середньої міцності і вологості до крупності 3 – 5 мм.

Молоткова двороторна дробарка з паралельним розташуванням роторів (рис.1.6,*в*) та обертанням роторів назустріч один одному. Вихідний матеріал подається у завантажувальну лійку *8*, яка створена торцевими стінками корпуса *5* дробарки і фігурними колосниками *10*. При обертанні роторів *2* вільно підвішені молотки *4* проходять у зазори між фігурними колосниками *10* і дроблять грудки матеріалу. Дроблений продукт падає на решітки під роторами, де він дробиться остаточно і розвантажується під дробарку. Вал *1* кожного ротора обертається через клинопасову передачу від окремого електродвигуна. Привідні шківи обважнені і служать також, як маховики. Додатково на вільних кінцях валів роторів також насаджені маховики для вирівнювання ходу дробарки.

Найбільша з дробарок цього типу може приймати грудки довжиною до 2000 мм і масою до 4 т при дробленні до 30 – 35 мм при продуктивності 1000 т/год.

Молоткова двороторна дробарка з послідовним розташуванням роторів (рис.1.6,*г*) складається із зварного корпуса *5*, роторів *2* і колосникових решіток *7*, що розташовані під роторами. Верхній і нижній ротори з молотками *4* обертаються в одному напрямку. Над кожним ротором розміщені відбійні плити *6*, які переміщають при регулюванні дробарки. Привод обох роторів здійснюється через клинопасову передачу від одного електродвигуна. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно із завантажувальної лійки *8*, наносяться удари молотками верхнього ротора. Грудки частково розколюються, відкидаються на відбійні плити, відбиваються від них і знов потрапляють під удари молотків верхнього або нижнього ротора. Нижній ротор ударяє по грудках, відкидає їх на свої відбійні плити і проштовхує матеріал на нижню колосникову решітку. Зона між двома роторами є місцем найбільш інтенсивного дроблення. Дроблений продукт розвантажується крізь щілини колосникових решіток. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між молотками і відбійними плитами, а також між молотками і колосниковими решітками.

Одноротorна нереверсивна молоткова дробарка (рис.1.7) типу СМД-135 складається з таких основних вузлів: корпуса *1* з кришкою, ротора *2* з шарнірно підвішеними кільцевими молотками *3*, приймальної камери, заслінки *4*, пастки *5* для предметів, що не дробляться, і колосникової решітки *6*.

Вихідний матеріал завантажується через люк приймальної камери і захоплюється ротором до колосникової решітки. Руйнування матеріалу здійснюється ударами молотків, а також при ударі об броньові плити або зрізуванням між елементами колосникової решітки і молотками.

При потраплянні предметів, що не дробляться, вони викидаються у приймальну камеру, відбиваються від її верхньої частини, відхиляють заслінку і надходять у пастку.

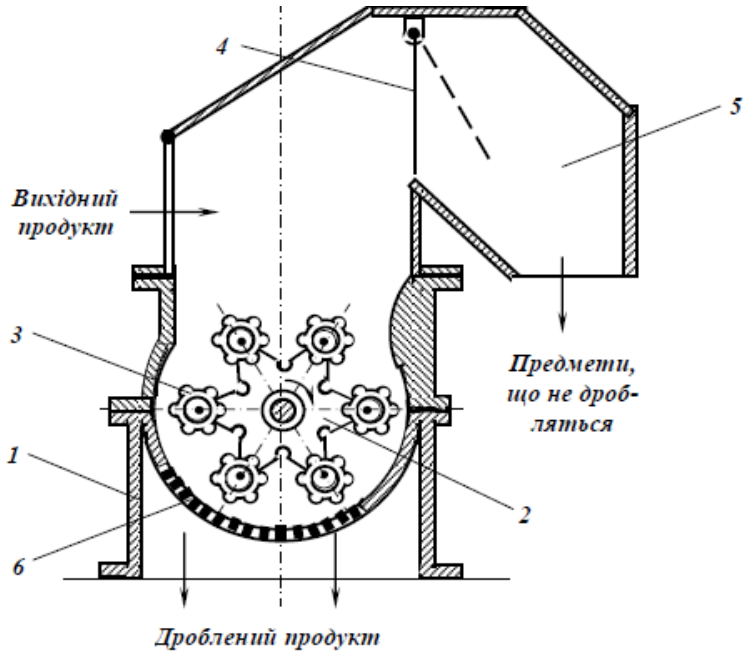


Рисунок 1.7 – Схема молоткової дробарки СМД-135 [14,15]

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – молотки-фрези; 4 – заслінка; 5 – пастка; 6 – колосникова решітка

Молоткові дробарки цього типу застосовуються при дробленні шлаків, металічної стружки, грудкових відходів сплавів кольорових металів, вузлів електричних машин, кабельної продукції, елементів радіоапаратури і ін.

1.4.4 Конструкція і принцип дії роторних дробарок

Роторні дробарки застосовуються для дроблення вапняку, доломіту, мергелю, гіпсу та інших матеріалів. У порівнянні з щоковими і конусними роторні дробарки більш продуктивні, економічніше за витратами електроенергії, легше за масою, простіше у виготовленні і обслуговуванні, менш чутливі до попадання в камеру дроблення металевих предметів.

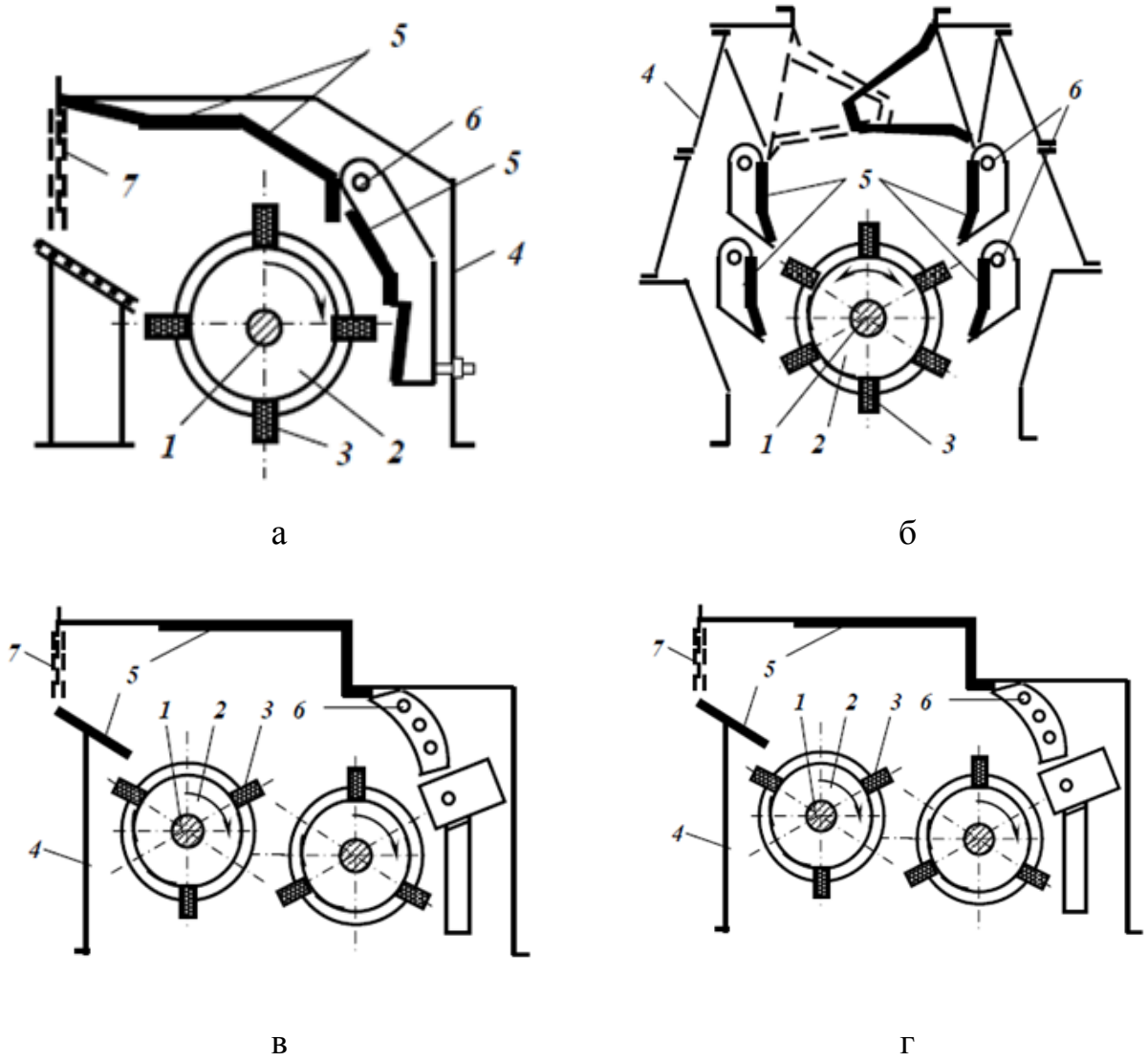
Основний їх недолік необхідність часто замінювати била, які при дробленні абразивних матеріалів швидко виходять з ладу.

У роторних дробарках матеріал дробиться ударом бил, які жорстко закріплені на роторі, що обертається у робочому просторі дробарки, обмеженому футерованим броньовими плитами корпусом. На рис.1.8 наведені схеми основних типів роторних дробарок.

Принцип дії роторних дробарок аналогічний принципу дії молоткових дробарок. У роторних дробарках дроблення здійснюється жорстко закріпленими на роторі *2* билами *3*. Матеріал завантажується в зону ротора, що обертається з великою швидкістю. Ударами бил грудки руйнуються, і їх уламки відкидаються на відбійні броньові плити *5* або колосники, що утворюють камеру дроблення. Ударяючись об футеровку, грудки руйнуються і знову потрапляють на ротор. Це повторюється доти, поки грудки, досягши визначеної крупності, не вийдуть із дробарки через вихідну щілину або отвори колосникових решіток.

Роторні дробарки бувають одно- і двороторні з послідовним дробленням матеріалу кожним ротором або з одночасним дробленням двома роторами, з колосниковою решіткою і без неї. Одноротрні дробарки розрізняють на реверсивні і нереверсивні. Характерною особливістю роторних дробарок є те, що в ударі по грудках вихідного матеріалу бере участь масивний ротор, тому удари значно міцніші ніж у молоткових дробарках. Це дозволяє застосовувати роторні дробарки у першій стадії дроблення (дробарки типу ДРК) для руйнування порівняно твердих гірських порід. Роторні дробарки застосовують

також для середнього та дрібного дроблення (дробарки типу ДРС). Конструкції дробарок ДРК і ДРС аналогічні.



а б

в г

Рисунок 1.8 – Схеми основних типів роторних дробарок [14,15]

Однороторні: *а* – нереверсивна; *б* – реверсивна.

Двороторні: *в* – послідовного дроблення; *г* – паралельного дроблення.

1 – горизонтальний вал; 2 – масивний ротор; 3 – била; 4 – корпус дробарки;

5 – відбійні плити; 6 – осі підвісу відбійних плит; 7 – ланцюгові штори.

У одноротoрну нереверсивну дробарку (рис.1.8,*а*, 1.9) типу ДРК матеріал подається на обертовий масивний ротор *4* і дробиться ударами бил *5* і об відбійні плити *7*. Відбійні плити *7* на верхній частині корпуса *2* закріплені нежорстко, тому при потраплянні предметів, що не дробляться, вони відхиляються на осях і пропускають їх.

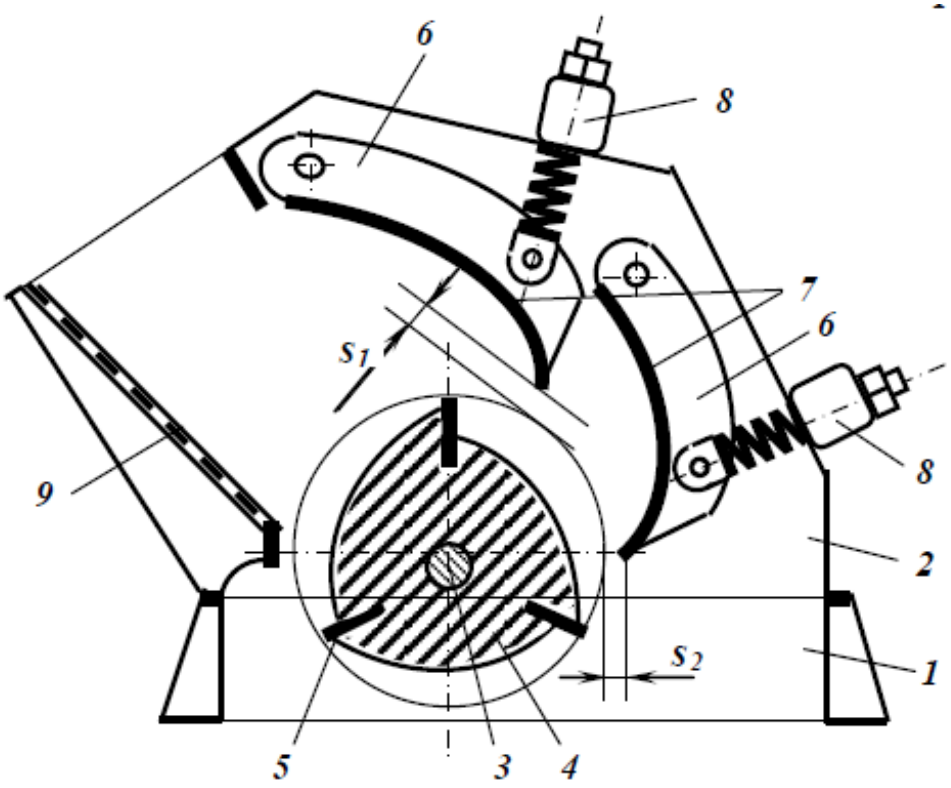


Рисунок 1.9 – Одноротoрна дробарка крупного дроблення [14,15]

1 – основа корпуса; 2 – верхня частина корпуса; 3 – вал; 4 – ротор;

5 – била; 6 – відбійні плити; 7 – футеровочні плити;

8 – регулювальний пристрій; 9 – решітка.

У первісне положення відбійні плити повертаються під дією пружин регулювального пристрою *8*. Дробарки типу ДРК мають дві відбійні плити, а дробарки типу ДРС – три відбійні плити, які ділять робочу зону дробарки відповідно на дві або три камери дроблення. Відбійні плити мають криволінійний профіль і повністю або тільки у нижній частині закриті футерувальними плитами 7. Зазори між обертальним ротором і нижньою

кромкою відбійних плит є розвантажувальним отвором камери дроблення. Положення відбійних плит фіксується тягами і пружинами регулювального пристрою *8*. Регулювання ширини розвантажувальної щілини камери дроблення здійснюється також за допомогою регулювального пристрою *8*.

Вихідний матеріал надходить на нахилену решітку *9*, де відділяється дріб'язок, що не потребує дроблення. У завантажувальній лійці встановлені ланцюгові штори, які запобігають викиданню матеріалу з робочого простору дробарки. Розвантаження дробленого продукту здійснюється через розвантажувальний пристрій дробарки. Ротор до обертається електродвигуном через клинопасову передачу. Окружна швидкість ротора регулюється зміною приводних шківів.

Одноротoрна реверсивна дробарка (рис.1.8,*б*) завдяки центральному розташуванню завантажувального отвору дозволяє змінювати напрямок обертання ротора, що є перевагою дробарок цього типу, тому що в них можливе двобічне використання бил, що забезпечує їх рівномірний знос.

Двороторна дробарка з послідовним розташуванням роторів (рис.1.8,*в*) складається із зварного корпуса *4*, усередині якого розташовані два ротори *2*, що обертаються в одному напрямку. Привод роторів здійснюється через клиноремінну передачу від двох електродвигунів. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно, наносяться удари билами верхнього ротора. Грудки частково розколюються, відкидаються на відбійні плити, відбиваються від них і знов попадають під удари бил верхнього або нижнього ротора. Зазор між двома роторами є областю найбільш інтенсивного дроблення. Дроблений продукт розвантажується крізь вихідні щілини дробарки. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між билами і відбійними плитами.

Двороторна дробарка з паралельним розташуванням роторів (рис.1.8,*г*) складається із зварного корпуса *4*, усередині якого розташовані два ротора *2*, що обертаються у протилежних напрямках. Над кожним ротором розміщені відбійні плити *5*, які переміщають при регулюванні дробарки. Привод обох

роторів здійснюється через клинопасову передачу від двох електродвигунів. При роботі дробарки по грудках матеріалу, що надходить рівномірно і безперервно наносяться удари билами роторів. Грудки частково розколюються, відкидаються кожним ротором на відбійні плити, відбиваються від них і знов попадають під удари бил. Дроблений продукт розвантажується крізь вихідні щілини дробарки. Крупність дробленого продукту регулюється зміною зазорів між билами і відбійними плитами.

Двороторні дробарки в порівнянні з однороторними менш піддані забиванню і звичайно застосовуються для дроблення більш вологих матеріалів і матеріалів, що злипаються, вони також дозволяють завантажувати матеріал більшої крупності. Ширину щілини колосникових решіток і відстань між ними та кінцем бил (молотків) вибирають залежно від необхідної крупності дробленого продукту і вологості матеріалу, що дробиться. При дробленні глинистих вологих руд, щоб уникнути забивання колосникових решіток, відстань між колосниками збільшують. У важких випадках дробарки працюють без колосникових решіток. Без колосникових решіток продуктивність дробарки підвищується, але при цьому в дробленому продукті з'являються зерна крупніші допустимих розмірів [14,15].

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ УДАРОМ

2.1 Фактори, що впливають на процес подрібнення дробарками ударної дії

Ефективність роботи дробарки оцінюють за продуктивністю, якістю подрібнення, питомою енергоємністю та матеріаломісткістю. Ці показники значною мірою зумовлені конструктивно-режимними параметрами дробарки [1-4]. Роторна дробарка дозволяє якісно подрібнювати матеріали та отримувати готовий продукт, вирівняний за гранулометричним складом до 98%, з мінімальною кількістю 1-3% пилоподібних фракцій [16]. У ній використовуються принципи руйнування вихідних матеріалів, закладені в конструкціях молоткових, відцентрово-роторних та вальцьових подрібнювачів.

До основних параметрів, що характеризують ефективність її роботи, відносять: частоту обертання ротора, робочий зазор, інтенсивність та щільність заповнення дробильної камери, тривалість впливу на вихідний продукт, конструктивні особливості робочих органів та геометричне виконання їх рифлених поверхонь.

Сукупність факторів, які впливають на ефективність роботи дробарок ударної дії, умовно можна розділити на технологічні, механічні та конструктивні (рис.2.4) [17, 18].

Виявлено, що суттєво впливають лише 11 факторів. Серед них є фактори, фіксовані для даної конструкції: кількість молотків, конструкція деки, кут обхвату решета і т.д. Крім того, від крупності помелу залежить діаметр отворів решета, а вологість матеріалу обмежена вимогами стандарту [17,18,19].

Основними змінними факторами, що визначають витрати енергії та якість подрібнення є подача матеріалу, зазор між молотками і декою, швидкість молотків. Змінні фактори можна поділити на регульовані - подача матеріалу в камеру подрібнення, установочний зазор між молотками та декою, швидкість обертання ротора, і нерегульовані - ті, що змінюються внаслідок відносного

коливального руху молотків: зміна зазору та швидкості удару молотків внаслідок їх відхилення від радіально - рівноважного положення.



Рисунок 2.1 – Основні фактори, що впливають на ефективність роботи дробарок ударної дії

Таким чином, коливання шарнірно підвішених молотків спричиняє зміну основних факторів, що впливають на параметри процесу подрібнення, отже є змінним нерегульованим фактором [19].

Основними змінними факторами, що визначають витрати енергії та якість подрібнення є подача матеріалу, зазор між молотками і декою, швидкість молотків. Змінні фактори можна поділити на регульовані - подача матеріалу в камеру подрібнення, установочний зазор між молотками та декою, швидкість

обертання ротора, і нерегульовані - ті, що змінюються внаслідок відносного коливального руху молотків: зміна зазору та швидкості удару молотків внаслідок їх відхилення від радіально - рівноважного положення.

Таким чином, коливання шарнірно підвішених молотків спричиняє зміну основних факторів, що впливають на параметри процесу подрібнення, отже є змінним нерегульованим фактором. Подальшими дослідженнями необхідно визначити закономірності відносного руху з метою ефективного використання відносної швидкості і енергії удару молотків [19].

2.2 Аналіз і вибір руйнівного впливу для створення ефективних подрібнювачів

Процес подрібнення є важливою складовою виробничого процесу. Це пов'язано з необхідністю руйнування матеріалу до певної крупності (як правило, від 1 мм до десятків мікронів) або певного гранулометричного складу. Процес подрібнення на сьогоднішній день є надзвичайно енергоємним та дорогим. Підвищення ефективності процесів подрібнення є надзвичайно актуальним і досягається розробкою та впровадженням подрібнювальних машин з покращеними показниками функціонування. У процесі подрібнення твердих матеріалів частки руйнуються внаслідок невиконання умов міцності нормальних σ і дотичних τ напружень, що виникають у матеріалі при утворенні наступних видів деформацій: стиснення, розтягування, вигину та зсуву, тобто:

$$\sigma = \frac{F}{S} > \sigma_{\lim} \qquad (2.1)$$

$$\tau = \frac{F_\tau}{S} > \tau_{\lim} \qquad (2.2)$$

де σ_{lim} , τ_{lim} – граничні значення відповідно нормальних та дотичних напружень

подрібнюваного матеріалу [20].

Для забезпечення відповідного виду деформації застосовуються стирання, роздавлювання, розколювання, злам, зріз, а також ударну дію як найбільш поширені методи подрібнення різних видів матеріалів (рис.2.2) [21].

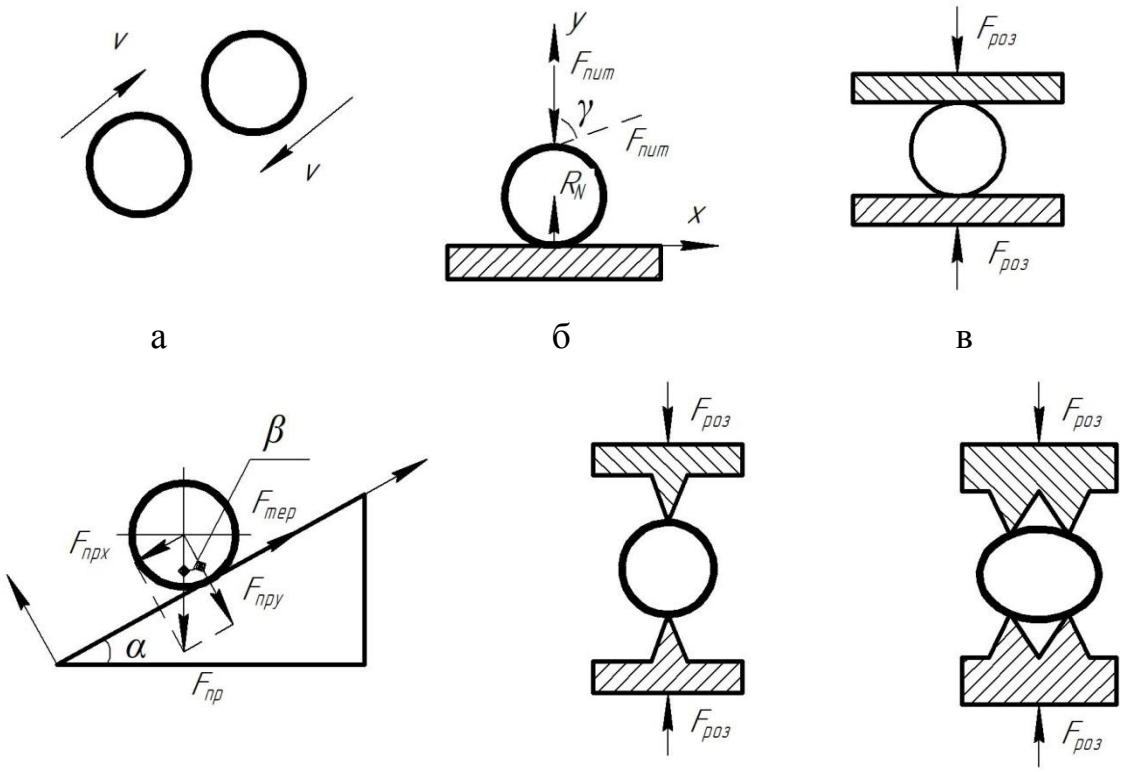


Рисунок 2.2 – Поширені види руйнівної дії при подрібненні [23]

2.2.3 Аналіз способів руйнування матеріалов

Розглянемо визначення ефективного руйнівного впливу за критеріями максимальних питомої поверхні *S* та продуктивності *W*, а також мінімальної споживаної потужності *P*.

Як правило, при механічному диспергуванні оброблюваного матеріалу за допомогою деформації стиснення, останній піддається одиночної або комплексної дії сил статичного роздавлювання, стирання та удару. В результаті стиснення відбувається поступове підвищення внутрішньої напруги, при якому

при досягненні значення вище границі міцності стиснення матеріал руйнується. Це супроводжується появою тріщин, що поширюються у напрямку стиснення, і не призводять, як правило, до повного руйнування матеріалу. Дане явище пояснюється тим, що частинки будуть утримуватися разом з внутрішніми зв'язками, що ще збереглися, а також силами тертя, що виникають між частинками і стискуючими поверхнями. При продовженні стиснення тріщини збільшуються, від тіла відокремлюються дрібні частинки, але його основна маса залишиться в компактному стані навіть і тоді, коли навантаження, що стискає, буде знято.

Процес руйнування частинок за допомогою ударного впливу може бути здійснений у двох варіантах:

1) вільний удар (рис.2.2,а), при якому на частинку з масою m діє сила $F_{уд}$ чисельне значення якої визначається з умови виникнення рівносповільненого прискорення в момент удару (другий закон Ньютона):

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} \qquad (2.3)$$

за відсутності опорної реакції R_N ($R_N \neq 0$).

2) стиснутий удар (рис.2.2,б), що характеризується ударним впливом $F_{уд}$ на частинку, що знаходиться на опорі. При цьому слід констатувати, що при організації даного виду удару ефект подрібнення зростає у 2 рази у зв'язку із впливом на частку додаткового впливу опорної реакції

$$R_N = F_{пит} \cos\gamma \qquad (2.4)$$

де кутовий параметр γ враховує ефективність удару в залежності від відхилення вектора сили $F_{уд}$ на кут γ від горизонтальної або вертикальної осей, перпендикулярних опорній площині. Отже, при розробці та обґрунтуванні параметрів подрібнювальних машин необхідно при стисненому ударі конструктивно забезпечити виконання умови: $\gamma = 0$.

При роздавлені під дією навантаження, що створюється силою $F_{розд}$, матеріал деформується по всьому об'єму (рис.2.2,в). Подальше стиснення тіла може призвести до спресування частинок, тобто до процесу, зворотного подрібненню [23].

Процес стирання застосовується при тонкому помелі. Цей процес здійснюється під впливом на матеріал сил стиснення, розтягування та зрізу, що виникають за рахунок притискання частки робочим органом до опори та його переміщенням у протилежні сторони. Для встановлення факторів, що впливають на ефективність стирання, слід розглянути класичну схему сил, що діють на частинку, що знаходиться на похилій площині в момент зіткнення робочого органу з часткою (рис.2.2,г).

Спроектувавши всі сили на вісь абсцис, можна отримати аналітичний вираз сили стирання:

$$F_{тр} = F_{пр} \sin \beta \qquad (2.3)$$

З формули (2.3) слід, що підвищення ефективності руйнування матеріалу стиранням необхідно забезпечити необхідну силу притискання $F_{пр}$ з напрямом вектора цієї сили, перпендикулярної осі X, тобто $\beta = 90°$.

Процес розколювання здійснюється за рахунок створення великих концентрацій навантажень у місцях контакту матеріалу з клиноподібним робочим елементом, на який впливає сила $F_{роск}$ (рис.2.2,д).

Процес зламу здійснюється за рахунок впливу на матеріал згинальних сил $F_{зл}$ (рис.2.2,е). Розміри та форма одержуваних частинок приблизно такі ж, як і при розколюванні.

Враховуючи фізичні особливості процесів розколювання та зламу, а також невідповідне співвідношення розмірів робочого органу машини та частки, слід зазначити, що зазначені способи руйнування слід виключити з досліджуваної вибірки.

Для підвищення ефективності подрібнення необхідно застосувати комбінований підхід до вибору виду руйнівного впливу. У зв'язку з цим, в умовах підвищеної потреби розробки подрібнювального обладнання з раціональними критеріями функціонування, завдання вибору найкращої комбінації способу руйнування є актуальним.

Керуючись математичною формулою комбінаторики

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!} \qquad (2.4)$$

теоретична кількість поєднань з $m=4$ застосовуваних методів руйнування по $n=2$ у групах становить, а при $n=3$ – $C_4^3 = 4$ унікальних поєднань.

Однак, зважаючи на особливості фізичного процесу деяких способів руйнувань, застосування всіх можливих поєднань методів диспергування частинок при створенні машин є недоцільним. У зв'язку з цим принцип роботи більшості машин для подрібнення матеріалів заснований на застосуванні наступного основного комплексу видів руйнування: роздавлювання та стирання, удар з роздавлюванням та стиранням, а також у певних випадках до головних зусиль приєднуються побічні – згинальні, розрізні та вільний удар [24].

Застосування комплексного способу руйнування при подрібненні вимагає врахування додаткових факторів, що впливають на ефективність дезінтеграції частинок матеріалу:

1) одночасність дій видів руйнівної дії, що у свою чергу мінімізує витрати часу на подрібнення t і характеризується функціональною залежністю енергії E від часу t:

$$E(t) = \min; \qquad (2.5)$$

2) ступінь прояву способів руйнівної дії при комбінованому вигляді руйнування, що визначає максимальну продуктивність подрібнення:

$$W(\Omega) = max; \quad (2.6)$$

3) ступінь прояву способів руйнівної дії Ω залежно від питомої поверхні матеріалу S з урахуванням основних законів механіки руйнування матеріалів, що встановлює обмеження на залежність (8) у зв'язку з підвищенням міцності матеріалів при збільшенні їх питомої поверхні внаслідок зменшення кількості їх внутрішніх дефектів. Звідси випливає, що з проектуванні подрібнювальної машини існує можливість повної втрати впливу («відключення») деяких видів на процес подрібнення із зменшенням діаметра частки матеріалу. Даний факт підтверджується дослідженнями процесу подрібнення матеріалу в відцентровому млині, в якому удар як спосіб руйнування поступився своїм провідним значенням стирання, що виникає вздовж стінок подрібнювальної камери за умов максимальної величини структурної міцності $\sigma = \sigma_{max}$ матеріалу і мінімального значення діаметра d і маси m частинки [25].

Теорія та практика подрібнення показує, що при комбінованій організації руйнівного впливу є переважання певних способів дезінтеграції частинок залежно від конструктивних особливостей подрібнювальних машин (табл.2.1).

Таблиця 2.1 - Способи руйнівної дії в деяких існуючих подрібнювачах тонкого помелу

№	Вид подрібнювальної машини	Способи руйнівної дії		Переважний спосіб
		№1	№2	
1	Кульовий млин	стирання	стиснутий удар	стирання
2	Відцентровий млин	стирання	вільний удар	вільний удар
3	Вібраційний млин	стирання	стиснутий удар (за певних умов)	стирання
4	Ролико-кільцевий млин	роздавлювання	стирання	стирання
5	Струменевий млин	стирання	вільний удар	вільний удар

З проведеного аналізу (табл.2.1) видно, що принцип роботи кожного млина базується на комбінованому підході до руйнування з явним

переважанням одного із способів руйнування, що, негативно впливає на показник ступеня подрібнення. Як наслідок слід зазначити, що при створенні подрібнювальної машини високої ефективності необхідно забезпечити рівність ступенів впливу кожного виду руйнування:

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \ldots = \Omega_n \qquad (2.7)$$

Від переважання відповідного способу руйнування певної комбінації залежить кількість енергії W, що витрачається на утворення одиниці нової поверхні. Енергія процесу подрібнення повинна бути достатньою для створення такої напруги, яка при досягненні граничних значень призведе до руйнування матеріалу з утворенням дрібних фракцій. При цьому витрата енергії, необхідної для створення граничної напруги, може істотно різнитися в залежно від фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу та способу застосування руйнівних сил.

Виходячи з проведених оглядово-теоретичних досліджень, виконання умови (9) ймовірно призведе до підвищення потужності, що у свою чергу при відповідній організації процесу подрібнення повинно компенсуватися за рахунок посилення кожного виду впливу. Тоді вираз (2.7) можна записати так:

$$\sum\Omega = (1+x) \cdot (\Omega_1 + \Omega_2 + \ldots + \Omega_n) \qquad (2.8)$$

Таким чином, має виникнути так званий синергетичний ефект, виражений у зростанні ефективності подрібнення в результаті інтеграції окремих компонентів у єдину систему та взаємне посилення дії кожного з них.

Отримані висновки можуть бути основою для розробки інноваційної подрібнювальної машини з поліпшеними показниками функціонування.

2.4 Аналіз руйнівних впливів та конструктивні принципи створення дробарок ударної дії

Академік Ребіндер на основі відкритого ним явища динамічного зниження міцності тіл вважає, що подрібнення частинок необхідно здійснювати деформуванням їх високочастотними знакозмінними впливами, наприклад, що стирають і роздавлюють. Однак простий аналіз механічних впливів показує, що подрібнення частинок роздавлюванням, стиранням, розколюванням та зламом без контакту робочих органів між собою здійснити дуже важко внаслідок їх малих розмірів [25]. Ударний вплив може здійснюватися як по частинкам, що знаходяться на твердій поверхні, так і зваженими, і його ефективність залежить від розмірів частинок, причому ефективність і енергонасиченість ударного руйнування не властива більше жодному виду руйнівного впливу. При подрібненні ударним впливом можна створити високочастотні знакозмінні навантаження, причому, набагато більші за величиною, ніж при стиранні.

Ці переваги машин ударної дії перед стираючими можна пояснити тим, що в машинах ударної дії вся дія робочих органів спрямована тільки на матеріал. Під час аналізу роботи подрібнювачів ударної дії встановлено, що основне ударне руйнування частинок може доповнюватися такими впливами, як розколювання, зріз та розрив.

Розглянемо механічні моделі основних руйнівних впливів при подрібненні частинок ударом з метою оцінки їх ефективності.

Введемо деякі припущення: частка має форму кулі; при деформації зминання зруйнований матеріал повністю видаляється з частки, не впливаючи на перебіг руйнування; частка взаємодіє з недеформованим робочим органом, який щодо маси частки приймається нескінченно важким; при гасінні швидкості під час удару прискорення уповільнення вважаємо постійним.

Розглянемо механічну модель руйнування частинок чистим ударом.

Удар є основною руйнівною дією. Причина ефективності процесу ударного руйнування полягає в тому, що великі значення сил (F, Н), що виникають при ударі, є наслідком надзвичайно високих прискорень уповільнення (a, м/с^2), що розвиваються тілом, які є наслідком малості часу (t, с), протягом якого триває взаємодія:

$$m(v - v_0) = Ft \tag{2.9}$$

звідки

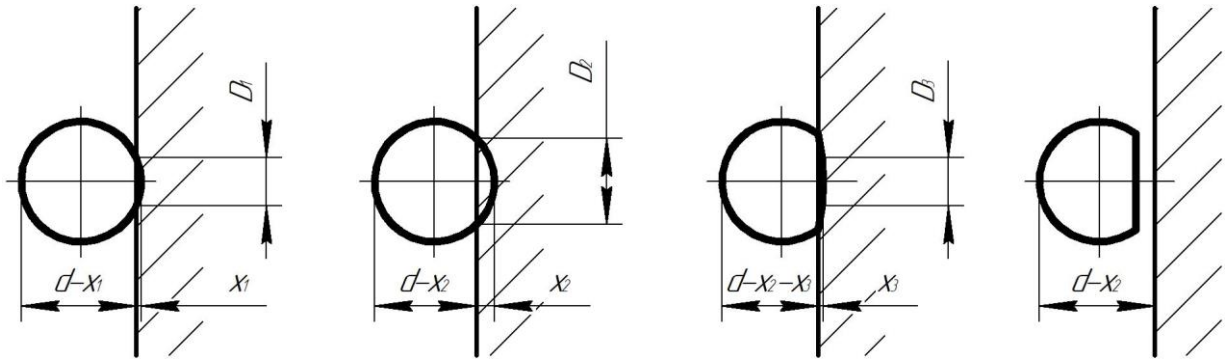
$$F = \frac{m(v - v_0)}{t} = ma \tag{2.10}$$

де v і v_0 – відповідно, початкова і кінцева швидкості ударної взаємодії, м/с.

З цих формул слідує, що при $v_0=0$ ma $t \to 0$, $F \to \infty$.

Розглянемо процес деформації кулястої частинки при її ударі об плоску поверхню нескінченної маси, який можна умовно розділити на чотири стадії (рис.2.3).

$F = \sigma \frac{\pi D_1^2}{4}$ $F = ma > \sigma \frac{\pi D_2^2}{4}$ $F < \sigma \frac{\pi D_3^2}{4}$ $F = 0$



а б в г

Рисунок 2.3 – Етапи деформації частки при ударі [27]

На першій стадії (рис.2.3,а) частка зі швидкістю v стикається з поверхнею робочого органу, починається гальмування частки і вона починає стискатися пружно. У точці контакту виникає нормальна до поверхні контакту сила, яка зростатиме, поки не буде перевищено межу міцності при зминанні для матеріалу частинки. Після цього починається друга стадія (рис.2.3,б) – руйнація

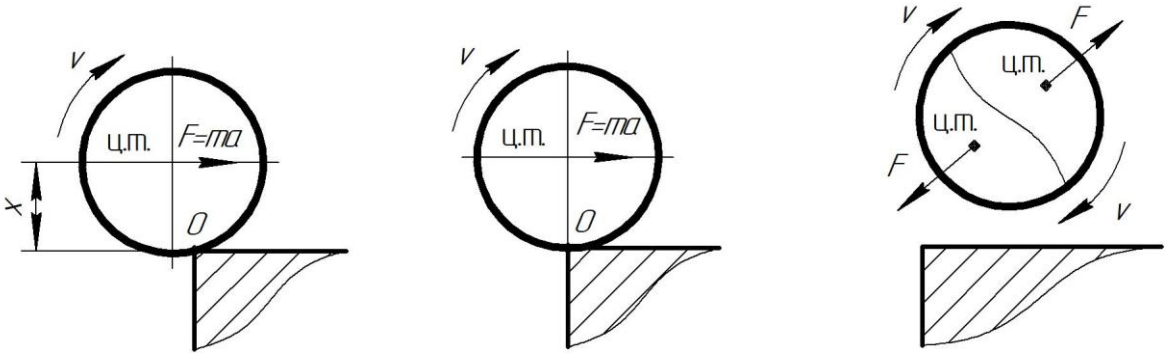
матеріалу. У міру руйнування частки площа поверхні контакту стає більшою, а тиск на неї падає. Руйнування триває доки питома навантаження знову стане менше межі міцності при зминанні. Третя стадія (рис.2.3,в) починається коли зусилля, що діє на площу контакту, знову стане менше граничного, частка знову починає деформуватися пружно. На четвертій стадії (рис.2.3,г) швидкість частки падає до нуля, відбувається відскок частки від поверхні удару за рахунок відновлення пружної деформації залишкового зусилля.

Згідно з вищенаведеною механічною моделлю руйнування частинки відбувається шляхом послідовного відколювання від неї при кожному ударі робочого органу малих об'ємів матеріалу [26]. Тому, якщо знати обсяг матеріалу, що втрачається часткою при одному ударі, то можна математичним шляхом орієнтовно визначити необхідну для подрібнення частинки до необхідного розміру кількість впливів на неї робочого органу, що зараз визначається лише експериментально.

Руйнування частинок розколюванням і крезом хоч і можливе, але їх виникнення малоймовірне внаслідок трохи розмірів частинок, що перешкоджають появі умов, необхідних для руйнування (наприклад, достатніх плечей дії сил). Тому вважатимуться, що це на результат подрібнення істотного впливу не надають.

Інтерес представляє модель руйнування частинок розривом, який можна створити, приклавши до них відцентрові сили. Руйнування від дії відцентрових сил (рис.2.4) виникає в моменти, коли частка при взаємодії з робочим органом подрібнювача отримує дотичний удар, набуваючи при цьому тангенційного прискорення. При дотичному ударі частки про робочий орган (рис.2.4,а) момент від сили F повертає частинку щодо точки O (рис.2.4,б), і вона починає обертатися щодо власного центру з дуже високою швидкістю, що викликає в її тілі виникнення значних відцентрових сил, які будучи віднесеними до малого перерізу частинки, формують напруги, що перевищують границю міцності матеріалу на розрив (розтягування), яка, як правило, для крихких матеріалів значно нижча, ніж границя міцності при стисканні, що і призводить до

руйнування частки (рис.2.4,в) по умовно прийнятим слабким перерізам h-h_1 так, що площею розриву є площа поперечного перерізу частинки.



а б в

Рисунок 2.4 – Руйнування частки від дії центр відцентрових сил [27]

Для випадку руйнування розривом від дії відцентрових сил за відомими формулами механіки були розраховані швидкості, необхідні для руйнування частинок матеріалу з наступними параметрами: границя міцності на розтяг - 40 МПа, питома вага - 2000 кг/м^3, діаметр - від 0,1 до 1 мм . Результати розрахунку надані у додатку В.

Як видно з таблиці, швидкість робочого органу, необхідна для руйнування частинок розривом від дії відцентрових сил, є постійною для матеріалу певної міцності та питомої ваги і не залежить від крупності частинок, а це означає, що, по-перше, при досягненні робочим органом цієї швидкості на ньому, теоретично, можуть руйнуватися частинки будь-якого розміру, по-друге, регулювати ступінь подрібнення можна простою зміною швидкості робочого органу, причому залежність між ступенем подрібнення і швидкістю відома.

Зважаючи на вищевикладене, руйнування частинок відцентровим розривом дуже перспективно і має великий потенціал для застосування, хоча і є в даний час важко здійсненним і більш випадковим процесом [27].

Ще одним важливим моментом підвищення ефективності процесу подрібнення є дотримання при створенні подрібнювачів певних конструктивних принципів. Так, можна рекомендувати поділ зони подрібнення

на контур, що володіють різною енергією подрібнення, у кожному з яких подрібнюються частинки придатної для нього крупності.

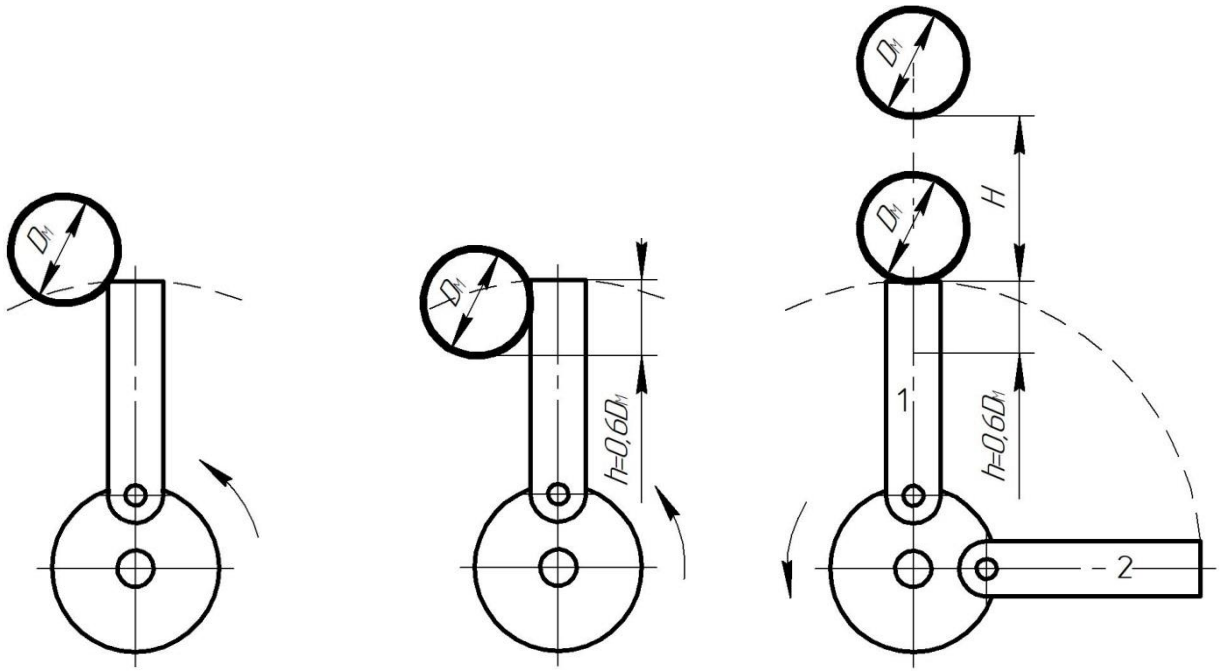
Непередбачуваним процесом досі є досягнення часткою необхідної крупності за час перебування у подрібнювачі. тому, якщо не можна гарантовано подрібнити частинку до потрібної крупності на одному ступені подрібнювача, а тримати її в зоні подрібнення далі деякого часу не можна, наприклад, за умовами продуктивності, тоді можна створити на шляху частинки стільки впливів (ступенів), скільки необхідно для її гарантованого подрібнення.

У випадку створення сучасних подрібнювачів ударної дії має спиратися на такі принципи: висока швидкість робочих органів (бил); високе енергонасичення всього обсягу дробарки і багатократний вплив на частинки в одиницю часу; подрібнюючи дія, яка гарантує подрібнення частинки до необхідної крупності; можливість роздільного подрібнення частинок різної крупності; забезпечення інтенсивного руху подрібнених частинок обсягом подрібнювача; забезпечення додаткових зсувних і розривних впливів на частинки, що подрібнюються.

2.5 Технологічні характеристики дробарок ударної дії

До основних технологічних характеристик молоткових і роторних дробарок належать: глибина проникнення грудки матеріалу, що дробиться, у зону обертання ротора h, розміри ротора (довжина L і діаметр D), продуктивність Q і потужність електродвигуна N. Глибина проникнення грудки матеріалу, що дробиться, у зону обертання ротора h впливає на гранулометричний склад дробленого продукту, продуктивність дробарки, витрату електроенергії при дробленні і знос молотків та бил. Залежно від глибини проникнення грудка піддається ковзному або центральному удару (рис.2.5). При ковзних ударах відбувається обколювання і стирання грудок по місцю удару. У цьому випадку дроблений продукт містить велику кількість

дріб’язку, ударні деталі (молотки або била) швидко зношуються, продуктивність дробарки знижується. Проникнення грудки у зону обертового ротора на глибину не менше 0,6 максимального розміру грудки при дробленні у молоткових дробарках або на глибину рівну висоті била при дробленні у роторних дробарках забезпечують руйнування грудки центральним ударом. Дроблення здійснюється в усьому об’ємі грудки при мінімальному стиранні матеріалу, що дробиться, а також зносі ударних деталей. Вміст тонких класів у дробленому продукті менше, а продуктивність дробарки вища ніж при дробленні ковзними ударами [28].



а б в

а – ковзний; б – центральний; в – підліт грудки до молотка.

Рис. 2.5 – Схеми удару молотка по грудці [28]

Необхідна глибина проникнення грудки у зону обертання ротора забезпечується швидкістю падіння матеріалу при завантаженні його у дробарку. Для того щоб проникнути у зону обертання ротору (рис.2.5,в) на глибину $h=0,6D_{max}$, грудка максимального розміру D_{max}, яка підлетіла до молотка 1, що

обертається, повинна за час t (час приближення до грудки молотка 2, що набігає) при падінні з висоти H набути швидкості $V_{гр}$:

$$V_{гр} = \frac{h}{t} = \frac{0{,}6D_{\max}}{t}. \qquad (2.11)$$

Час t переміщення молотка з положення 2 у положення 1 дорівнює:

$$t = \frac{60}{nz}, \qquad (2.12)$$

де n – частота обертання ротора, хв$^{-1}$;

z – число подовжніх рядів молотків на роторі, тоді

$$V_{гр} = \frac{0{,}6D_{\max} nz}{60} = 0{,}01D_{\max} nz. \qquad (2.13)$$

Для грудки, що рухається з швидкістю $V_{гр}$, висоту H падіння визначають з формули:

$$V_{гр} = \sqrt{2gH} \qquad (2.14)$$

З використанням формул (2.12) і (2.13) отримуємо рівняння для визначення висоти H необхідної для потрапляння грудки під центральний удар:

$$H = \frac{V_{гр}^2}{2g} = \frac{(Dnz)^2 \cdot 10^{-4}}{2g} \approx 0{,}5 \cdot 10^{-5}(Dnz)^2, \text{ м.} \qquad (2.15)$$

У роторних дробарках висота била звичайно менше $0{,}6D_{max}$, тому усі грудки, що досягли тіла ротора потрапляють під центральний удар. Однак, особливості форми тіла ротора приводять до того, що не усі грудки можуть потрапити під ефективні центральні удари. Для підвищення частоти ударів і, відповідно, ефективності ударного дроблення, встановлюють відбивальні плити або решітки, які втримують ці грудки у дробарці до тих пір, поки вони не потраплять під центральний удар.

Розміри ротора (діаметр D_p, довжина L) визначаються розміром максимальної грудки вихідного матеріалу і продуктивністю дробарки.

Діаметр ротора відповідно до прийнятих стандартів визначається у залежності від максимального розміру грудки вихідного матеріалу:

– для молоткових дробарок:

$$D_p = (3{,}2...4) \cdot D_{\max}. \qquad (2.16)$$

Найбільша величина ($D_p=4D_{max}$) відповідає малим дробаркам з діаметром ротора до 600 мм;

– для роторних дробарок крупного дроблення:

$$D_p = (1{,}7...2) \cdot D_{\max}. \qquad (2.17)$$

Менша величина ($D_p=1{,}7D_{max}$) відноситься до дробарок найбільших розмірів. Для роторних дробарок середнього і дрібного дроблення:

$$D_p = 3{,}3D_{\max}. \qquad (2.18)$$

З умов продуктивності і завантаження дробарки довжина ротора відповідно до прийнятих стандартів визначається пропорційно до його діаметра:

– для молоткових дробарок:

$$L = (0{,}7...1{,}5) \cdot D_p; \qquad (2.19)$$

– для роторних дробарок крупного дроблення:

$$L = 0{,}8D_p; \qquad (2.20)$$

– для роторних дробарок середнього і дрібного дроблення:

$$L = D_p. \qquad (2.21)$$

Продуктивність молоткових і роторних дробарок залежить від їхніх конструктивних і механічних параметрів (діаметра, довжини і частоти обертання ротора; кількості, маси і числа молотків; розташування і форми

відбійних плит; способу завантаження і глибини проникнення грудок у зону ротора).

Продуктивність також залежить від фізичних властивостей матеріалу, що дробиться (міцності, вмісту глинистих речовин, вологи, крупності вихідного і дробленого продуктів). Між продуктивністю дробарки, подрібнюваністю вихідного матеріалу, ступенем дроблення і потужністю електродвигуна існує взаємозв'язок. При постійних умовах дроблення з підвищенням продуктивності знижується ступінь дроблення і навпаки. Теоретична формула для розрахунку продуктивності молоткових і роторних дробарок відсутня. Для орієнтованого розрахунку продуктивності молоткових і роторних дробарок застосовують різні емпіричні формули.

Об'ємна продуктивність молоткових і роторних дробарок може бути розрахована з використанням таких формул:

– молоткових дробарок:

при $D_p > L$ $Q_p = 0{,}1 D_p^2 L n$, м^3/год; (2.22)

при $D_p < L$ $Q_p = 0{,}1 D L^2 n$, м^3/год; (2.23)

– роторних дробарок:

$$Q_o^{max} = 47 k (D_p L)^{1,6} \text{ , м}^3\text{/год;} \quad (2.24)$$

$$Q_o^{min} = 22 k (D_p L)^{1,3} \text{, м}^3\text{/год,} \quad (2.25)$$

де n – частота обертання ротора, хв$^{-1}$;

Q_o^{max} і Q_o^{min} - граничні значення продуктивності, м^3/год;

k – коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей дробарки (k=0,6 ÷ 1,4);

D_p і L – розміри ротора, м.

При підвищенні міцності, в'язкості і вологості матеріалу, що дробиться, і зменшенні крупності дробленого продукту продуктивність молоткової дробарки знижується. При рівномірному живленні забезпечується більш висока продуктивність дробарки.

Потужність електродвигуна молоткових і роторних дробарок визначається за емпіричними формулами:

– молоткових дробарок:

$$N = 0{,}125 D_p L n \text{, кВт;} \quad (2.26)$$

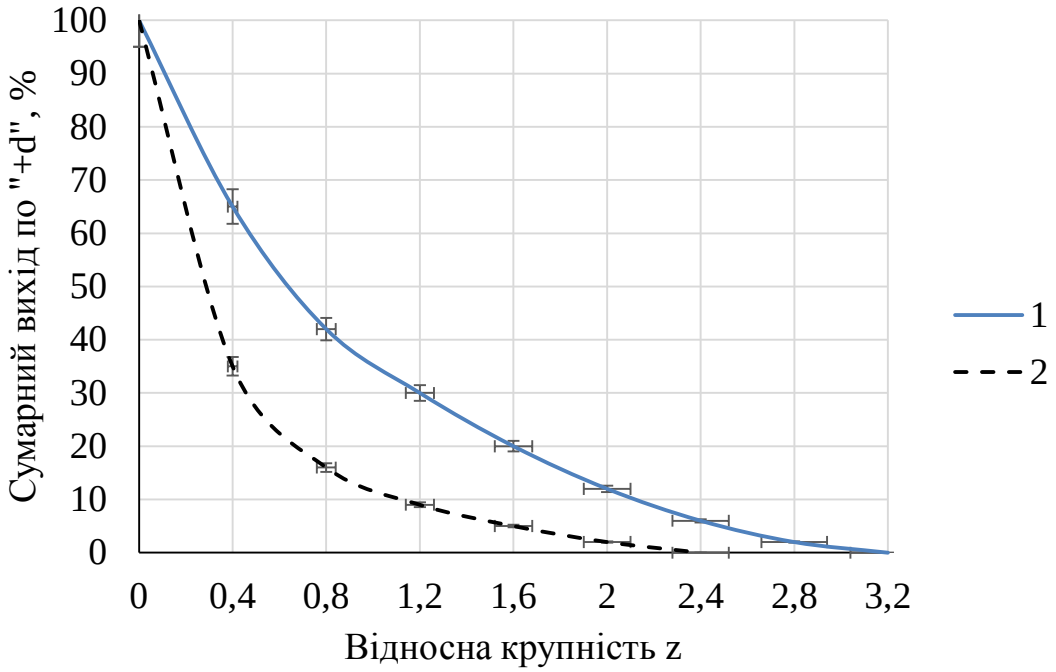
$$N = 0{,}15 D_p^2 L n \text{, кВт;} \quad (2.27)$$

– роторних дробарок:

крупного дроблення $N = 80 D_p L$, кВт; (2.28)

середнього і дрібного дроблення $N = 120 D_p L$, кВт. (2.29)

Типові характеристики крупності продуктів дроблення молоткових і роторних дробарок для руд середньої міцності наведені на рис.2.6. По осі абсцис відкладають відносну крупність зерен *z* (в частках максимальної ширини розвантажувальної щілини), а по осі ординат сумарний вихід класів по *«+d»*.



1 – дроблений продукт роторної дробарки;
2 – дроблений продукт молоткової дробарки.

Рисунок 2.6 – Типові характеристики крупності продуктів дроблення молоткових і роторних дробарок (для руд середньої міцності) [14,28]

Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту молоткових і роторних дробарок наведені у табл.2.2.

Молоткові і роторні дробарки вимагають ретельного балансування ротора. Швидкість завантаження вихідного матеріалу повинна вибиратись у залежності від швидкості обертання ротора.

Ширину щілини між колосниками і відстань між решіткою і кінцями молотків вибирають у залежності від необхідної крупності дробленого продукту і вологості вихідного матеріалу. Ширина щілини між колосниками повинна бути у 5 – 6 разів більше розміру зерен дробленого продукту при дробленні до 6 мм і у 1,5 – 2 рази при дробленні до 50 мм. При дробленні вологих матеріалів з глинистими домішками відстань між колосниками збільшують або працюють без них.

Таблиця 2.2 – Формули для розрахунку гранулометричного складу дробленого продукту молоткових і роторних дробарок [14]

Тип руди	Розрахункова формула	Формула вірна
Дроблений продукт молоткових дробарок		
Середньої міцності	$b^{+z} = (1\text{-}1{,}93z + 1{,}88z^2 - 0{,}88z^3 + 0{,}15z^4)\cdot 10^2$ (2.30)	при $z \leq 2{,}4$
Дроблений продукт роторних дробарок		
Середньої міцності	$b^{+z} = (1\text{-}1{,}02z + 0{,}44z^2 - 0{,}10z^3 + 0{,}01z^4)\cdot 10^2$ (2.31)	при $z \leq 3{,}0$

До переваг дробарок ударної дії слід віднести високу продуктивність, меншу масу і менші питомі витрати електроенергії в порівнянні з дробарками інших типів. Недоліки цих дробарок полягають у великому зносі молотків і необхідності використання живильників для рівномірного завантаження.

Раціональність застосування дробарок ударної дії визначається головним чином зношуванням дробильних елементів внаслідок абразивності дробного матеріалу. Абразивність, дозволяючи визначити термін служби молотків, біл, відбійних плит, колосників, дає можливість розрахувати технгіко-економічні

експлуатаційні показники та вирішувати питання щодо застосування ударних дробарок [29].

2.6 Визначення абразивності для ударних дробарок

Абразивність гірської породи залежить від твердості породоутворюючих мінералів, від крупності та форми зерен, їх характеру скріплення один з одним, від щільності породи та ступеня її тріщинуватості.

Найбільш абразивними є крупнокристалічні породи, що складаються з зерен твердих мінералів, що слабко пов'язані між собою, і утворюють при бурінні великий гострокутний шлам. Тріщинуваті породи більш абразивні, ніж монолітні. При бурінні в пористих і тріщинуватих породах різці бурової коронки обколюють гострі краї тріщин і великі незграбні частинки породи, що при цьому утворюються, перетираються під торцем, викликаючи інтенсивний знос породоруйнуючого інструменту.

Для оцінки абразивності гірських порід існує безліч способів, проте в основі їх покладено той самий принцип: це стирання еталонного матеріалу (коронка, скляний диск, сталевий стрижень і т. д.) випробуваною породою в польових умовах. Найбільш часто застосовуються способи втрати ваги сталевого стрижня або кульок.

Спосіб стрижня, розроблений Л. І. Бароном та А. В. Кузнєцовим полягає у визначенні втрати ваги стрижня зі сталі сріблянки при терті о гірську породу. Стрижень виготовляється із необробленої термічної сталі сріблянки. Діаметр стрижня 8 мм. Спосіб придатний для порід та мінералів із твердістю 3 і вище за шкалою Моосу.

Критерієм абразивності гірської породи вважається втрата у вазі стрижня (мг) за 10 хв. Стрижень обертається за допомогою спеціально пристосованого свердлильного верстата при швидкості обертання 400 об/хв та осьовому навантаженні 15 кг.

Як зразки випробовуються керни або штуфи породи з рівною (не шліфованою) поверхнею. Діапазон значень абразивності за цим методом є досить широким – від часток мг для вапняків та глинистих сланців до 100 мг, для авгітоплагіоклазового порфіриту та дрібнозернистого корунду.

Таблиця1 - Класифікація гірських порід за абразивністю [26]

Клас абразивності	Клас порід	Показник абразивності, мг	Характерні породи
I	Дуже малоабразивні	до 5	Вапняки, мармури, м'які сульфіди без кварцу
II	Малоабразивні	6-10	Сульфідні руди, барито-сульфідні руди; аргіліти, м'які сланці: вуглисті, глинисті, хлоритові, хлорито-аспідні
III	Нижче за середню абразивність	11-18	Джеспілити, роговики (рудні та нерудні), кварцово-сульфідні руди, магматичні тонкозернисті породи, пісковики кварцові та аркозові тонкозернисті, руди залізні, вапняки окремнені
IV	Середньоабразивні	19-30	Піщаники кварцові та аркозові, дрібнозернисті діабази, крупнозернистий пірит, арсенопірит, житловий кварц, кварцово-сульфідні руди, дрібнозернисті магматичні породи, вапняки
V	Вище середньої абразивності	31-45	Пісковики кварцові та аркозові, середньо- та крупнозернисті, плагіограніти, нефелінові сієніти, дрібнозернисті граніти, дрібнозернисті діорити,
VI	Підвищена абразивність	46-65	Середньо- та крупнозернисті граніти, діорити, гранодіорити, порфірити, нефелінові сієніти, , амфіболіти, сланці кварцові та окварцьовані
VII	Високоабразивні	66-90	Порфірити, доріти, граніти, гранітоїдні нефелінові сієніти
VIII	Вкрай абразивні	більш 90	Корундовмісні породи

Щодо молоткових і роторних дробарок абразивність дробимої породи та зносостійкість бил рекомендується визначати за особливою методикою (ГОСТ 12375-70). Випробування проводяться на спеціальній лабораторній дробарці х L = 250 х 50 мм при окружній швидкості 30 і 60 м/с. Била-зразки повинні бути

виготовлені зі стандартного металу за спеціальними технічними умовами. Для випробувань з проби дробного матеріалу виділяють клас 10-20 мм на ситах з круглими отворами. Абразивність оцінюють за втратою маси всіх бил-зразків, що припадає на 1 т подрібненого матеріалу. Показники абразивності визначають окремо для окружних швидкостей 30 і 60 м/с. Перший показник використовують для промислових дробарок, що працюють на швидкостях 20-40 м/с, другий – при 40-80 м/с [29].

Цей показник визначають на тій же лабораторній роторній дробарці по зношенню бил-зразків, виготовлених з матеріалу, що підлягає випробуванню, тобто матеріалу, який застосовують для виготовлення промислової дробарки.

Зносостійкість *С* матеріалу бил визначають на граніті однорідного петрографічного складу з показниками абразивності не нижче $И_{30}=150$ г/т та $И_{60}=500$ г/т. Показники абразивності вибраного граніту визначають заздалегідь ($И_{30}$ та $И_{60}$). Зносостійкість оцінюють масою (кг) пропущеного граніту на 1 г зносу маси молотків. У експериментально отриманий показник вносять поправку абразивність граніту тому, щоб показник зносостійкості відносився до граніту певної абразивності (за ГОСТ $И_{зв}=280$ та $И_{во}=900$ г/т):

$$C_{30} = \frac{ГИ_{30э}}{\Delta g \cdot 280}$$ при швидкості 30 м/с;

$$C_{60} = \frac{ГИ_{60э}}{900}$$ при швидкості 60 м/с,

де $И_{30э}$ та $И_{60э}$ - показники абразивності абразивного матеріалу, на якому визначена зносостійкість, відповідно для швидкостей 30 і 60 м/с.

У таблиці наведено довідкові показники абразивності деяких гірських порід.

Таблиця 2.3 - довідкові показники абразивності деяких гірських порід

Найменування гірських порід та їх родовища	$И_{30}$	$И_{60}$
Вапняк Турдійського родовища Калузької обл.	96	360
Вапняк Ковровського родовища Володимирської обл.	16	86
Вапняк Падісе Паемурруд Естонської РСР	2,5	7,2
Вапняк Воркута Комі АРСР	5	20
Вапняк П'ятовський к-р Калузької обл.	1,9	7,6
Вапняк Вяо Естонської РСР	4,2	17
Шлак конверторний Липецький з-д	580	2130
Шлак електропічний Липецький з-д	530	1890
Шлак феросиліція Актюбинський з-д	390	1350

Породи одного найменування можуть мати різко відмінні властивості, що підтверджує необхідність випробування та вивчення дробового матеріалу перед вибором дробарок і перед встановленням проектних показників.

2.7 Аналіз методів підвищення зносостійкості робочих органів дробарок ударної дії

Більшість розробок спрямовано дослідження зносостійкості робочих органів у молоткових дробарках. Серед подрібнювачів даного типу найбільшою ефективністю відрізняються роторні та відцентрово-роторні дробарки [25].

При цьому ефективність цих конструкцій залежить від геометричних параметрів робочих поверхонь, що взаємодіють з продуктом і чутлива до їх зносу.

Для того щоб визначити найбільш ефективні та перспективні методи підвищення зносостійкості в роторній дробарці потрібно звернутися до досліджень зносу робочих органів в молоткових і вальцьових дробарках. Є

деякий накопичений досвід дослідження зносостійкості цих подрібнювальних машин, за рахунок широкого використання їх у різних технологічних процесах.

З накопиченого досвіду роботи відомо, що мінімальний ресурс у молоткових дробарках мають молотки (термін їх служби становить від 72 до 300 годин). Ресурс інших робочих органів до 2 разів вищий. Однак така тенденція призводить до необхідності проведення близько 50 технічних обслуговувань подрібнювача на рік. Ефективність використання молотків полягає у напрацюванні їх до граничного стану, тому точне прогнозування їхнього ресурсу є визначальним у разі підвищення надійності технологічного процесу [22-26].

Через таку суперечливість недоліки часто переважують позитивні сторони молоткових дробарок (універсальність, широкий діапазон дроблення, слабкий нагрівання продукту). Дослідження жорстко закріплених молотків, що проводяться Лузіним П.М., Мойсеєвим О.М. та іншими вченими показали, що питоме зношування молотків залежить від виду вихідного матеріалу і від властивостей матеріалу, з якого виготовляється сам молоток [28].

Таким чином, зі зносом робочих органів дробарки буде змінюватися і ступінь подрібнення вихідного матеріалу. Однак у розробці теорій, що підвищують ефективність роботи подрібнювачів, цей фактор або розглядають, або відносять до окремого експериментального дослідження. На додаток до всього дедалі частіше порушується питання про доцільність використання та виготовлення молоткових дробарок, та заміни їх більш сучасними конструкціями, що забезпечують найкращі питомі показники при якісному подрібненні.

В робочій порожнині роторної дробарки переважатиме абразивний знос. Як абразив виступатимуть як мінеральні домішки, а й дрібні частинки вихідного продукту.

Абразивне зношування згубно впливає на металеві робочі поверхні. Його особливість полягає в прямому руйнуванні поверхневого шару, яке в кожний

момент часу становить незначну частину від числа загальних контактів абразивних частинок з поверхнею.

2.7.1 Способи підвищення зносостійкості деталей роторної дробарки

Зносостійкість робочих поверхонь роторної дробарки залежить від виду матеріалу та кількості (концентрації) абразиву у вигляді мінеральних домішок, що знаходяться в ньому. Заходи боротьби зі зношуванням робочих органів роторної дробарки можна зобразити схематично (рис.2.7). Таким чином, можна виділити способи підвищення зносостійкості роторної дробарки: додаткова обробка продуктів подрібнення, очищення порожнини дроблення і створення в ній сприятливих умов для експлуатації робочих поверхонь, зміцнення робочих органів, своєчасний їх ремонт або заміна, використання спеціалізованих матеріалів [27].

Способи підвищення зносостійкості робочих поверхонь ротора і статора, характеристики яких є визначальними при отриманні готового продукту, що відповідає вимогам, надано на рис.2.8.

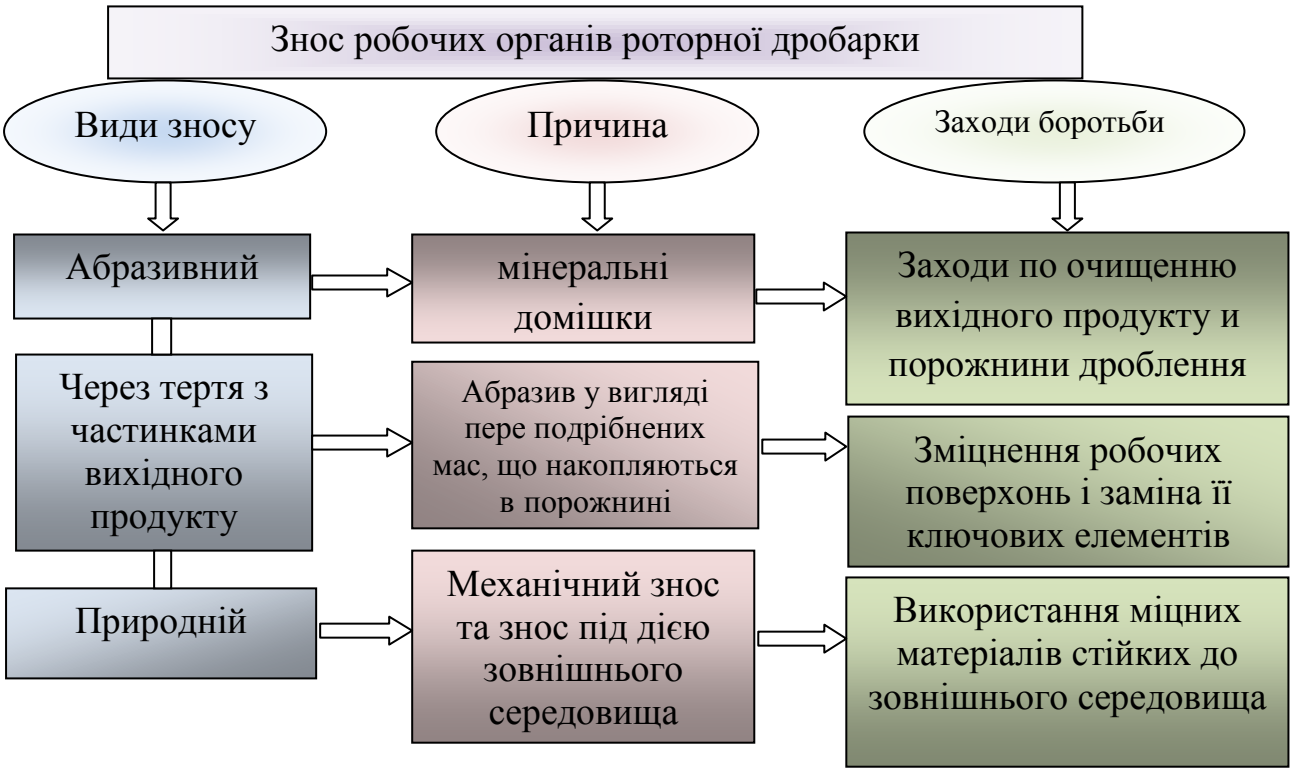


Рисунок 2.7 - Підходи до підвищення зносостійкості у роторній дробарці [28]

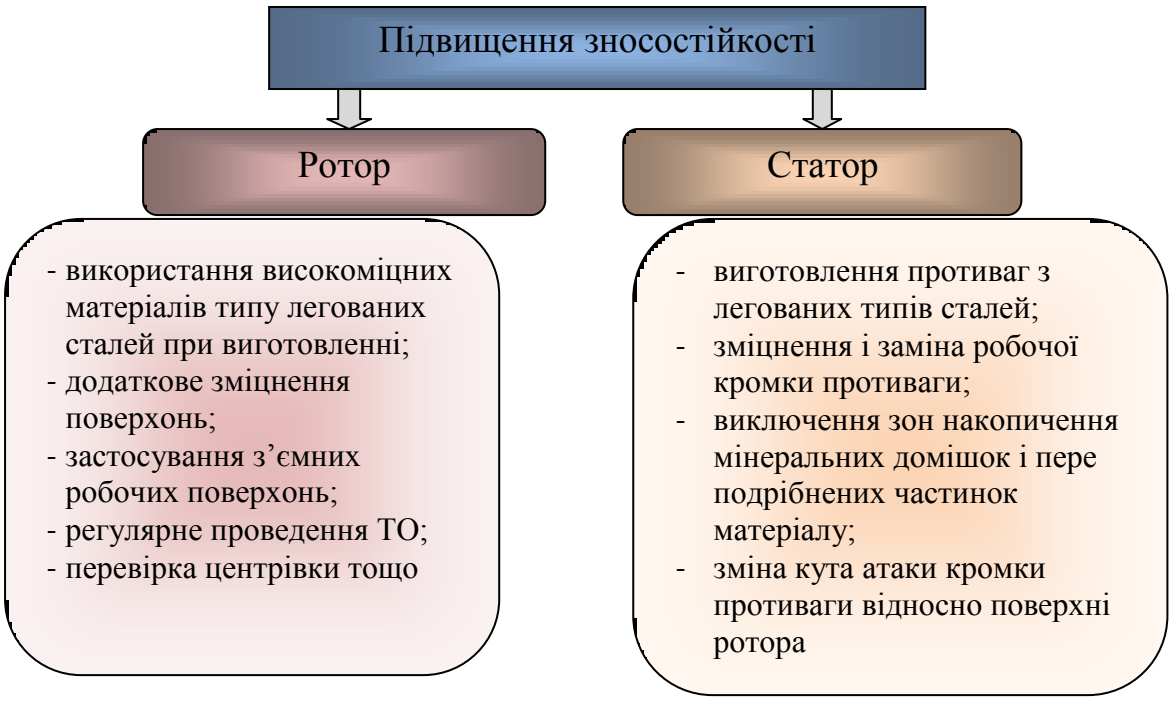


Рисунок 2.3 – Способи підвищення зносостійкості ротору і статору [28]

Ефективність застосування одного або декількох заходів, представлених способів визначається на підставі теоретичних та експериментальних досліджень, а так само залежить від обсягів, виду та властивостей матеріалу, що переробляється [28].

2.8 Процес абразивного зносу била

Знос молотків та бил роторних дробарок досягає інколи 30% витрат, що йдуть на весь процес дроблення й подрібнення, тому у деяких випадках він виявляється вирішальним чинником при проектуванні та експлуатації цього обладнання [14].

Одиниці вимірювання зносу, це:

а) абсолютної зміни розмірів деталей;

б) або їх в одиниці маси:

1) абсолютний знос – що вимірюється втраченої масою деталі;

2) питомий знос, – абсолютна втрата маси деталі, віднесена до маси передробленого матеріалу:

1. нетто $u_н$ – вимірюється питомою втратою маси деталі;
2. брутто $u_б$ – вимірюється масою всієї незношеної деталі в грамах, що відноситься до маси всього матеріалу, що передроблений (тонна на строк роботи).

Основним чинником, а саме – «мірою абразивності» матеріалу що дробиться або подрібнюється – це питомий знос нетто еталонної деталі,, а саме – зносу деталі яка зношуються в умовах близьких до ідеальних або регламентованих порядком.

Зворотною величиною зносу є – зносостійкість матеріалу била. Вона вимірюється – маса передробленого матеріалу з певної абразивністю, прийнятої за еталон, віднесеної до втраченої масі металу зразка била, параметри зносу якого отримано в умовах, аналогічних при яких визначається абразивність.

Взагалі, термін служби деталей на які впливає абразивне зношування бил залежить від наступних факторів:

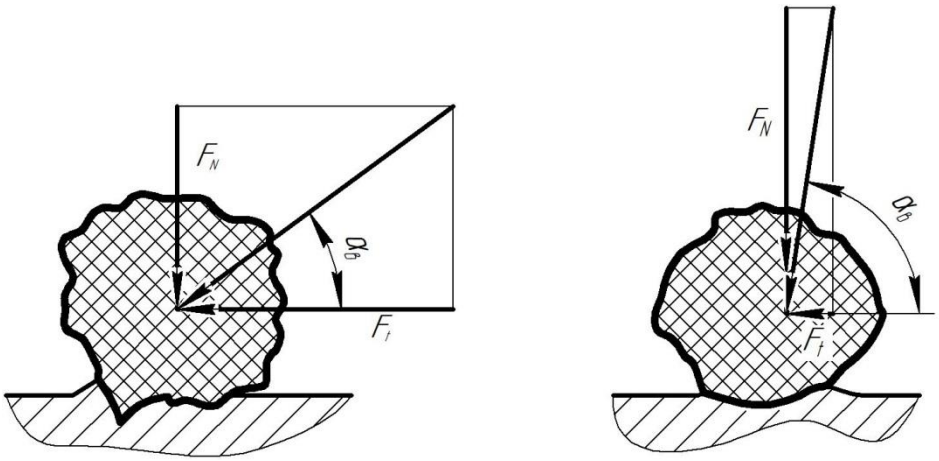
а) маси бил;
б) коефіцієнта використання металу;
в) питомого зносу нетто.

Питомий же зносу нетто залежить від наступних умов:

а) вплив матеріалу, що дробиться, на било;
б) абразивності матеріалу, що дробиться;
в) зносостійкості матеріалу била, що відповідають умовам абразивного зношування.

Вплив абразивного матеріалу, що дробиться на поверхню била носить ударний характер, через що, на поверхнях місця контакту матеріалу з билом виникають досить великі напруження зминання і зсуву. Ці напруження часто перевищують межі міцності металу з якого виготовлено било дробарки.

Наглядне відображення видів впливу абразивного матеріалу зношування поверхню била роторної дробарки показано на рисунку (рис.2.9,а,б).



а б

а – абразивний знос; б – вищерблення при втомлені.

Рисунок 2.9 – Механізм впливу частки абразивного матеріалу, що дробиться на матеріал била [24]

При умовах роботи роторних чи молоткових дробарок можна розглянути ці механізми дії дробимого матеріалу на матеріал бил:

а) абразивне зношування матеріалу відбувається за умови, коли кут зустрічі частки матеріалу, що дробиться, з робочою поверхнею била досить малий (рис.2.11,а), то окремі малі шматки дробимого матеріалу, де твердість шматків яких вище твердості матеріалу била, то ці частки шматків входять в метал під дією нормальної складової ударної сили F_N, а тангенціальна складова F_t, знімає стружку, на поверхні била, як токарний різець;

б) втомне зношування відбувається у разі великих кутів зустрічі сил, коли сила F_t виявляється недостатньою для зсуву частки, та викликає своєю дією в поверхневому шарі лише залишкові деформації (рис.2.9,б), тому ці деформації створюють крім наклепу зі зміцнення, ще й втомні руйнування з викришування частинок металу з била.

До найбільш ефективних способів підвищення зносостійкості робочих поверхонь роторної дробарки можна віднести: зміну геометрії (товщина форма і т.п.); підбір оптимальної кількості робочих елементів, їх швидкості та частоти

взаємодії з вихідним продуктом; підбір оптимального матеріалу, для виготовлення робочих органів, виходячи з виду продукту, що переробляється; зміцнення частини чи всієї робочої поверхні; забезпечення точного та своєчасного прогнозування ресурсу деталей; використання технологічного обладнання для ремонту та ТО.

2.9 Експлуатаційні дані по зносу деталей дробарок

Для створення ефективної дробарки та експлуатації важливо знати особливості зносу її робочих органів, вплив зносу на показники процесу дроблення та працездатність машини, а також володіти даними про терміни служби деталей та методи та їх відновлення. Зношування робочих органів істотно змінює показники роботи роторних дробарок. основними деталями, що зазнають зношування, є била ротора, ротор, відбивні плити і колосникові грати.

На рис.2.10 показано результати дослідів по дробленню граниту Передаточнинського кар'єру (м. Запоріжжя) на роторній дробарці моделі СМ-264 [26].

Крива питомого зносу *I* бил нетто показує збільшення питомого зносу в міру зростання загального зносу бив. Било даної конструкції наприкінці терміну служби мають у 5 разів більший питомий знос, ніж спочатку, причому питомий знос підвищується приблизно пропорційно до збільшення поверхні, що стосується кола ротора.

Наведене співвідношення питомих зносів на початку і кінці зношування характерно для конструкцій, що випускалися раніше, бив з потовщеною робочою частиною била. Для бил нової конструкції зі зменшеною товщиною головки відношення найбільшого та найменшого питомого зносу менше і залежить від товщини била.

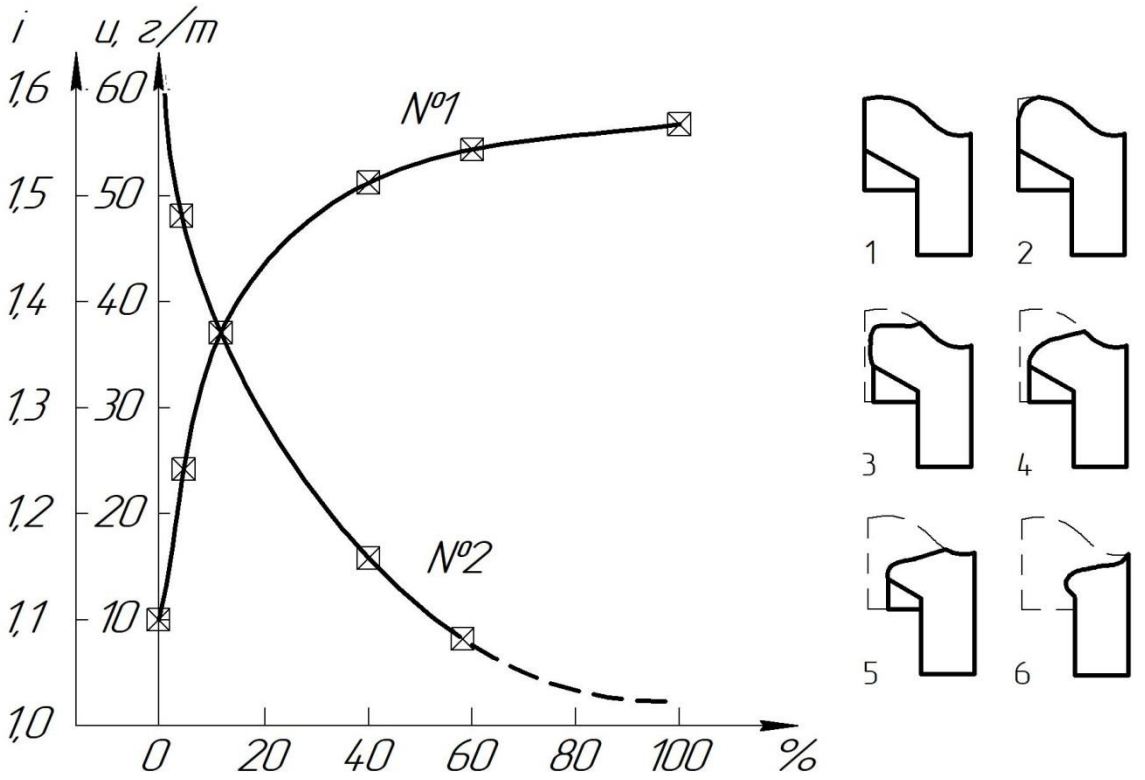
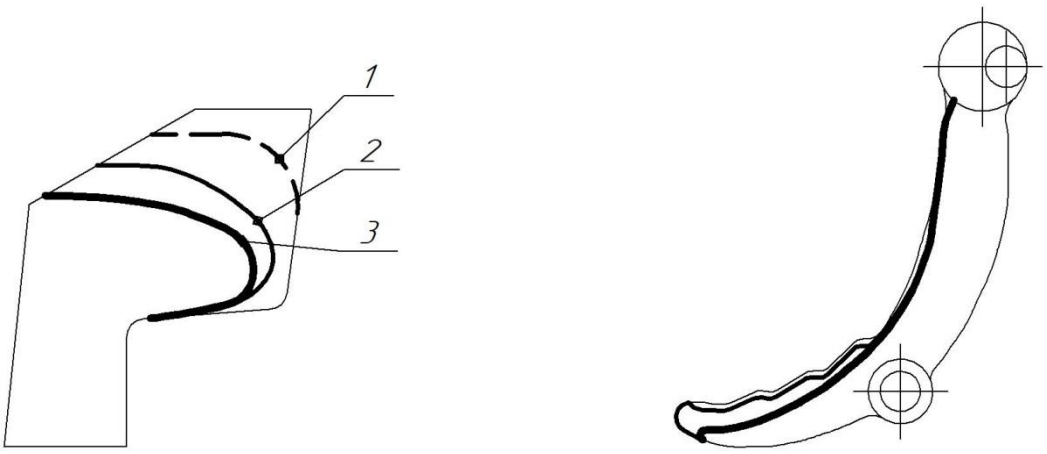


Рисунок 2.10 – Вплив ступеня зносу бил на показники процесу дроблення при нерегульованій ширині вихідної щілини [26]:
I – на знос ; II – на ступінь дроблення (штрихова лінія – екстра полірована);
1-5 стадії зносу

Крива *II* на рис.2.10 показує зміну ступеня дроблення залежно від стану била при незмінному положенні відбивних органів (щілина у дослідах не регулювалася). Зменшення ширини щілини в міру зносу бил дозволяє підтримувати незмінною ступінь дроблення. При роботі дробарок у замкнутому циклі зі збільшенням зносу бил зростає циркуляційне завантаження, яке може збільшуватися до 200 %.

На рис.2.11,а схематично зображено зношення била в поперечному перерізі дробарки моделі С-643, що експлуатується на різних підприємствах. Коефіцієнт використання металу бил даної конструкції складає всього 25%. Характер зношеного профілю бил вказує на недоцільність потовщувати головку.



а б

Рисунок 2.11 – Контури робочих органів дробарки моделі С-643 після переробки кількості *G* вапняку [27]:
а – било; б – нижня колосникова решітка;
Ковронського кар’єру - 18000 м^3; I – Обимиського кар’єру, *G* =78000 м^3;
2 – П’ятовського кар’єру, *G*=22000 м^3; 3 – Ковронського кар’єру, *G*=8000 м^3

Рівномірність зношування била за його довжиною залежить від рівномірності розподілу вихідного матеріалу по довжині ротора. Цей розподіл залежить від умов подачі матеріалу в дробарку та її конструкції. У дробарках первинного дроблення у роторів без торцевих дисків била по довжині зношуються майже рівномірно. У дробарках вторинного дроблення, харчування яких відбувається зазвичай зі стрічкових конвеєрів, що подають матеріал вузьким потоком, знос дещо більший у середній частині била.

Для ротора з торцевими дисками ділянки била, що прилягають до дисків, зношуються менш інтенсивно. Довжина цих ділянок невелика. У дробарці моделі СМД-75, встановленої на Ковровском кар'єрі, ця вага становить близько 15 мм.

Питомі зноси бив, установлення на промислових дробинках, наведені в таблиці.

Зовнішня поверхня ротора піддається інтенсивному зношуванню, особливо якщо дробарки мають надмірно зношені била. При цьому через значне зниження висоти бил ймовірність зіткнення дробимого матеріалу з корпусом ротора збільшується в передбильній його частини. Остання та разом з нею деякі деталі кріплення била піддаються абразивному стиранню. При зношуванні зовнішньої поверхні порушується балансування ротора та зменшується надійність кріплення бил.

Торцева поверхня ротора, якщо вона не захищена торцевими дисками, зазнає абразивне зношування внаслідок попадання дрібних частинок матеріалу між корпусом ротора та корпусом дробарки. Знос торцевої поверхні тягне за собою руйнування деталей кріплення бил [28].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Мета досліджень

Енергоємність процесу подрібнення в роторних дробарках залежить від конструктивних та технологічних факторів, до яких відноситься знос робочого органу, що супроводжується тертям при взаємодії його з матеріалом, що подрібнюється.

Мета експериментальних досліджень полягає у знаходженні взаємозв'язку впливу закругленості робочої кромки бил дробарки на енерговитрати та якість готового продукту.

3.2 Програма досліджень

Для досягнення поставленої мети, що було поставлено вище, необхідно вирішити наступні задачі, а саме:

а) розробити подальшу програму досліджень;
б) розробка лабораторної установки для проведення досліду на знос бил дробарки та енергію руйнування матеріалу, що подрібнюється, на основі існуючого стенда для дослідження матеріалів на тертя та знос [30];
в) виготовити лабораторну установку для проведення досліду на знос бил дробарки та енергію руйнування матеріалу, що подрібнюється;
г) підготувати лабораторне обладнання та інструмент для вимірювань;
д) проведення експериментів для дослідження впливу абразивності на било та закруглення робочої кромки била на процес дроблення;
е) встановити межі точності вимірювань;
ж) встановити залежності впливу абразивності на било та закруглення робочої кромки била на процес дроблення;
з) проаналізувати отримані результати.

3.2.1 Лабораторна установка для проведення досліду на знос бил та дроблення матеріалу

За основу для розробки стенду для проведення дослідження взято існуюче лабораторне обладнання розроблене на кафедрі «Металургійне обладнання» ІННІ ЗНУ - «Стенд для дослідження матеріалів на тертя та знос» для дослідження поведінки матеріалів в абразивному середовищі [30].

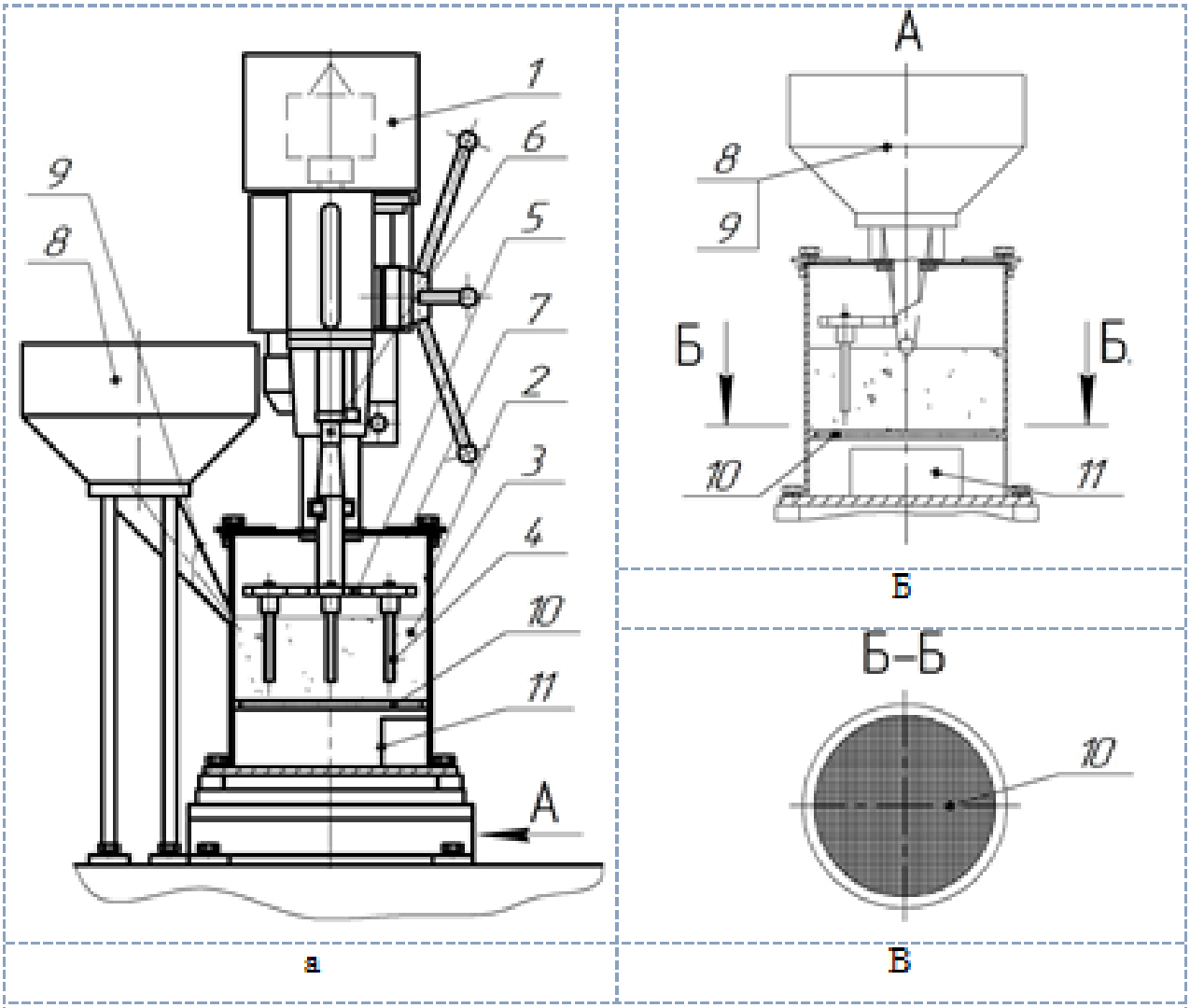
«Стенд для дослідження матеріалів на тертя та знос» створено на базі свердлильного станку та має можливість для його подальшого доопрацювання необхідного для проведення необхідних для нас дослідів.

Опис конструкції стенду надано поверхнево та буде наді необхідні доробки для того щоб виконати поставлені задачі, що показана на рисунку (рис. 3.1).

Стенд для дослідження на тертя та знос створено на базі свердлильного станку 1, на який змонтований корпус 2 з абразивним середовищем 3 (роль абразивного середовища може виконувати будь-який матеріал, дію якого необхідно дослідити на елемент що випробується) та зануреному у нього зразками для дослідження 4, які кріпляться на хрестовині з валом 5, які закріплені на шпинделі 6 свердлильного верстату 1, завдяки чому хрестовина зі зразками й може обертатися. Сам корпус, для проведення безпечних робіт та для унеможливлення розкидання абразивного середовища, при проведенні експерименту, закривається кришкою з ущільнювачами 7.

Оскільки необхідно провести експерименти які імітують процес дроблення у молотковій та роторній дробарці, то вище згадана конструкція не підходить у тому вигляді в якому вона є через те, що не можна оцінити на скільки впливає матеріал, що подрібнюється, за знос била. В свою чергу, немає інформації як впливає цей знос била на якість дроблення цього матеріалу. Це відбувається через те, що матеріал знаходиться у закритій ємності і щоб аналізувати на скільки потрібного розміру фракції він став при проведенні дослідження – необхідно: зупиняти проведення досліду, вивантажувати матеріал з ємності

(корпусу), проводити ситовий аналіз, знову повертати матеріал до ємності та продовжувати дослід далі. Ще й при чому під ситовий матеріал, готовий продукт необхідно буде видаляти з досліду й замінювати його на крупнішу фракцію,яка за розмірами не проходить через чарунки сита.



1 – свердлильний станок; 2 – корпус (ємність); 3 – матеріал, що дробиться; 4 – зразок для дослідження (било); 5 – хрестовина з валом; 6 – шпиндель свердлильного станку; 7 – кришка з ущільненнями; 8 – бункер; 9 – рукав; 10 – сито; 11 – отвір для розвантаження; а – загальний вид; б – вид зі сторони отвору 11 без свердлильного станку; в – сито.

Рисунок 3.1 – Стенд



Рисунок 3.2 – Стенд для дослідження зносу

Необхідні зміни конструкції стенду полягають в наступному (рис.3.1): на платформу, поруч із стендом з лівої сторони, на висоті більшій ніж кришка корпусу (ємності), встановлюється бункер 8 який поєднується з корпусом 2 отвором з течкою 9; в середину корпусу встановлюється змінне сито 10 на висоті 70-80 мм від низу корпусу, а з протилежної сторони, відносно бункеру, стенду у корпусі виконується отвір 11, верхня грань якого знаходиться нижче сита.

3.2.2 Методика експерименту

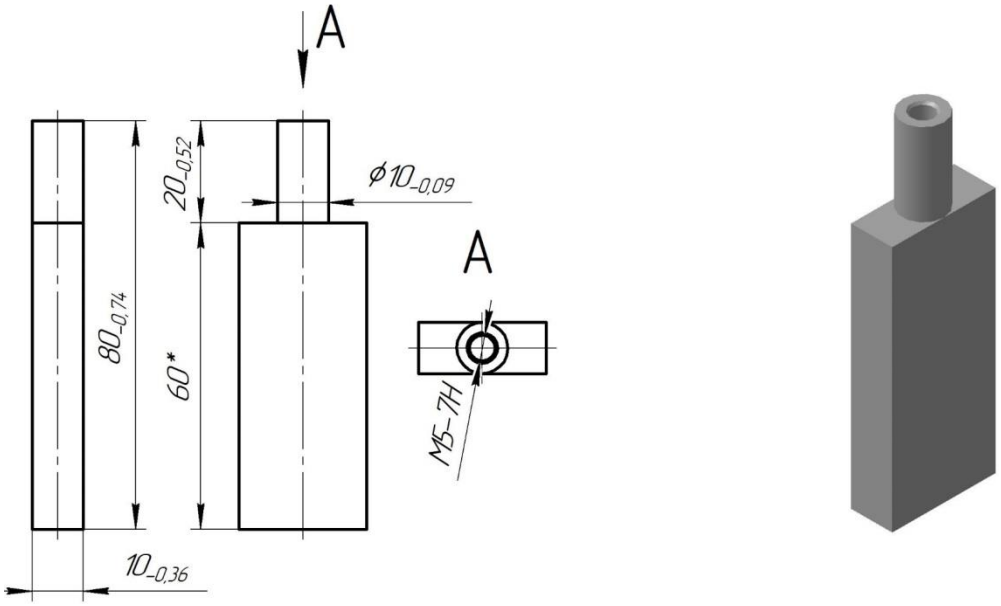
Сутність цих конструкційних змін та принцип їх дії, в наступному: перед експериментом у середину корпусу 2 встановлюється сито з необхідним

розміром чарунок, била (зразки) 4 кріпляться на хрестовину з валом 5, встановлюються на шпиндель 6 та заводяться у корпус 2 за умови, щоб від нижньої частини бил до сита була деяка відстань, все це закривається кришкою 7, вмикається двигун свердлильного станку 1, у бункер 8 додається матеріал, що подрібнюється матеріал, який по течці 9 надходить до корпусу 2, матеріал який в процесі експерименту набув достатнього розміру щоб пройти крізь чарунки сита 10 потрапляє на низ корпусу 2, з якого через отвір 11 потрапляє на наступний етап для вимірювання.

Експерименти проводилися на двох швидкостях: 30 м/с та 60 м/с.

Спочатку підготовлюється матеріал що буде дробитися – це агломерат, який використовується в металургії в доменних печах, з фракційним змістом: 15 мм та 20 мм у рівних пропорціях у обсязі 500 кг.

Далі – це виваження кожного била, що буде використовуватися у дослідах, а потім закріплення била у кількості 2 одиниці (рис.3.3) одне навпроти іншого у хрестовині 5. Матеріал била – Сталь 45 по ГОСТ 1050-60 з твердістю 28 HRC, ударною в'язкістю KSU=9 кгс·м та показниками зносостійкості - C_{30} =3,6 кг/т, C_{60} =1,1 кг/т.



а б

а – било у трьох проекціях з розмірами; б – било

Рисунок 3.3 – Модель била

Після встановлення бил корпус закривається кришкою, запускається двигун свердлильного станку, після чого до бункера подається заздалегідь підготовлений матеріал та підсипається поступово під час експерименту, так як матеріал, що дробиться, у корпусі буде зменшувати сої розміри до достатньої величини, щоб пройти крізь чарунки сита.

Після закінчення експерименту била знімаються з хрестовини, після чого їх необхідно очистити від зайвого матеріалу, що подрібнюється, а потім зважити била та обміряти робочу кромку.

3.2.3 Методика замірювання зносу била ваговим способом

Методика по визначення масового зносу бил через різницю маси бил запозичена з роботи [22].

Зважування проводилося на лабораторних терезах з точністю до 1 грама, а для порівняння оцінки якості бил визначалася інтенсивністю зношування

$$s = \frac{\Delta m}{Q}, \tag{3.1}$$

де: Δm – середній масовий знос бил, г;

Q – напрацювання лабораторного стенду, т.

Середній масовий знос бил знаходиться

$$\Delta m = \sum \frac{\left(m_{ni} - m_i\right)}{n}, \tag{3.2}$$

де: m_{ni} – вага нового i-го била, г;

m_i – вага зношеного i-го била, г.

n – кількість бил, що випробовуються.

3.2.4 Методика замірювання закруглення била ваговим способом

Вимірювання кромки била проводилось за допомоги індикаторна-вимірювального приладу, а саме – індикатору годинникового типу на основі порівняння розмірів по точкам на еталоном білі, який не використовувався у експериментах з тими що пройшли випробування.

Схема вимірювання надано на рисунку (рис.3.4)

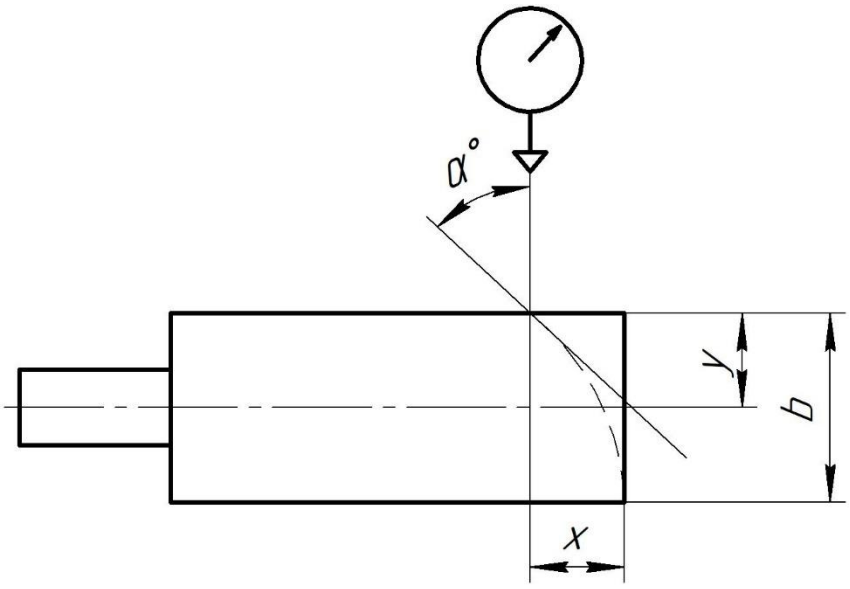


Рисунок 3.4 – Схема заміру зносу на білі та вимірювання кутів атаки матеріалу що до робочої поверхні била

3.2.5 Точність вимірювань при експериментах

Для оцінювання точності отриманих результатів, а саме – втрати ваги била та зміна його геометричних параметрів робочої кромки, необхідно кожний замір оцінювати на похибки [22-24]:

а) абсолютна похибка

$$\Delta A = A_X - A, \tag{3.3}$$

де: A_X – середнє арифметичне вимірювання;

A – те що спостерігаємо вимірювального значення;

б) відносна похибка

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A} 100\%. \tag{3.4}$$

Відносна ж похибка вже отриманих результатів

$$\delta = \frac{\delta_A}{\left(A - A_{сер}\right)} 100\%. \tag{3.5}$$

де: $A_{сер}$ – середнє значення параметрів, що вимірюється, після зносу, що приймається за дійсне значення.

Середня похибка при достатньо великій кількості вимірів вона наближається по своєму значенню до абсолютної точності приборів та інструментів, що використовуються при вимірюваннях.

Результати розрахунків похибок при проведених вимірювань надаються у таблиці (табл.3.1) [23].

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків похибок

Значення вимірювань	Показання приладів	Похибка	
		абсолютна	відносна, %
Вага била	128	±0,001 г	013
	123	±0,001 г	0,08
	111	±0,001 г	0,12
Лінійний знос била	5,85	±0,01 мм	0,13
	6,2	±0,01 мм	0,11
	6,08	±0,01 мм	0,09

3.3 Встановлення отриманих залежностей

3.3.1 Залежність питомого зносу била від кута атаки

При розгляданні взаємодії била зі шматками дробимого матеріалу, то виходячи з моделі взаємодії вважається, що радіус закруглення робочої кромки била дорівнює $r = 0$, та й весь обсяг матеріалу захоплюється билом, при контакті била з дробимим матеріалом, на висоту x (рис.3.4). Проте, через таку умову, що кромка має все одно якесь закруглення, то й частина дробимого матеріалу, який проникає на глибину рівної x буде відштовхнуте назад, з зони дії била, і станеться те, що – фактично захоплений билом обсяг шматку дробимого матеріалу скоротиться на величину пропорційну x.

Описати процес взаємодії дробимого матеріалу з билом, який наданий вище, можна наступним образом (рис.3.4):

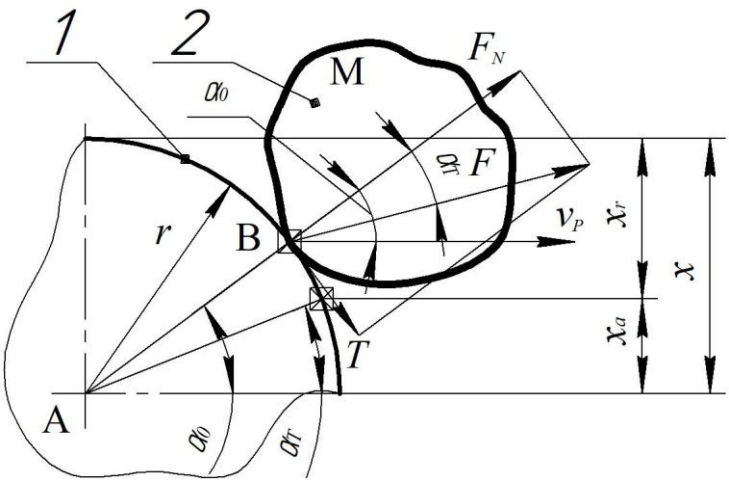
а) шматок матеріалу M контактує з билом у точці $Б$, яка знаходиться під кутом, який дорівнює φ_0 до горизонтальної площини лінії;

б) відповідно до цього на шматок M діє сила реакція F, яка є сумою сили нормальної реакції F_N та сили тертя T, де кутами: α_0 – кут нормальної сили та α_T – кут тертя;

в) Реакція F та швидкість ротору v_P разом утворюють кут α_0 - α_T, під величиною якого реакція F прагне виштовхнути шматок дробимого матеріалу або його частку з зони дії била ротора;

г) За умови же, коли ці два кута рівні, $\alpha_0 = \alpha_T$, то й складова F дорівнює нулю [49,50].

Відповідно до вище наданого можна зробити наступний висновок: всі шматки, що б’ються в закруглену частину била на глибині x_r, який відповідає куту α_T, виштовхуються з зони дії била, після чого било може захопити лише ті шматки матеріалу, які ударяться о било на ділянці $x_a = x - x_r$.



1 – кромка била; 2 – шматок матеріалу, що подрібнюється.

Рисунок 3.5 – Взаємодія била з часткою матеріалу

Залежність питомого зносу від кута зустрічі наведено на графіку (рис.3.6). З графіку видно, що існує оптимальна величина кута α, при якому відбувається максимальне зношування кромки била, й ця величина від 23^0 до 57^0.

На цей діапазон кутів, при яких спостерігається найбільш інтенсивне зношування, впливають:

а) кількість впливів абразивних частинок;

б) швидкість зіткнення;

в) сили удару;

г) абразивність матеріалу, що подрібнюється, а саме - сукупність властивостей, до яких відносяться: мікротвердість окремих частинок,їх величина і форма кромок, міцність сполучної основи, процентний вміст твердих частинок, що перевищують мікротвердість металу робочого органу та інші.

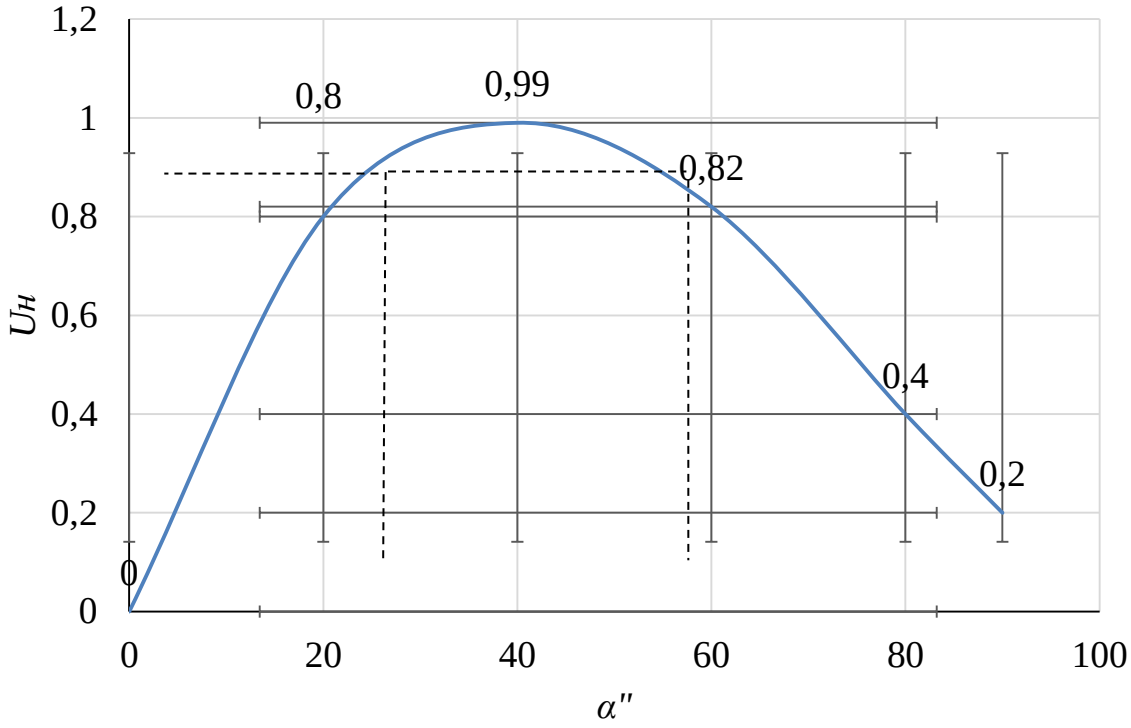
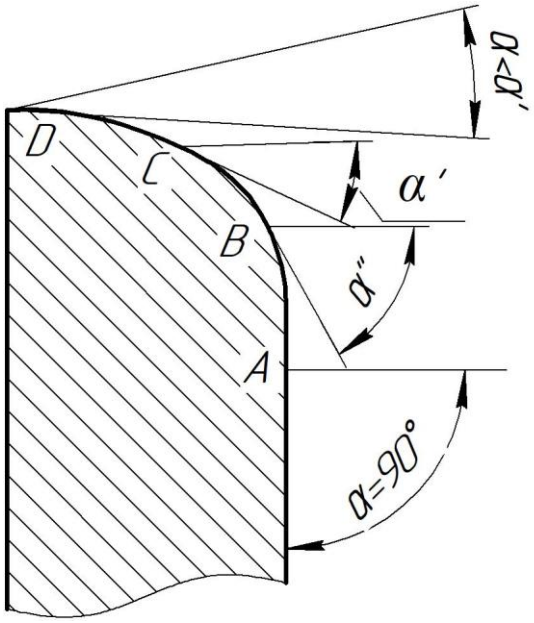


Рисунок 3.6 – Залежність питомого зносу матеріалу бил від кута атаки матеріалу, що дробиться

Поверхні контакту частинок матеріалу з поверхнями бил мають обмежені розміри, що зумовлює високу інтенсивність впливів, тому й найбільш високий питомий знос, який перевищує на порядок питомі зноси інших деталей роторної дробарки, мають била. При розгляданні схеми била (рис.3.6) можна виділити три поверхневих зони, ділянки, взаємодії шматків дробимого матеріалу з билом: *AB*, *BC* та *DC*. Так, кути атаки часток шматків дробимого матеріалу на робочу поверхню *AB* близькі до 90°, а із зовнішньою поверхнею *DC* – до нуля, тому перехідна частина між цими поверхнями, ділянка *BC*, яка завжди має оптимальний кут контакту, і саме ця частина найінтенсивніше зношується, і випереджаючи у зносі інші прилеглі поверхні, змінює їх нахил до лінії польоту шматків, наближаючи кут зустрічі до оптимального.



AB – перша робоча поверхня; BC – друга робоча поверхня; CD – третя робоча поверхня. Кути атаки поверхонь била

Рисунок 3.7 – Кути атаки поверхонь била

3.3.2 Залежність питомого зносу від ширини била

Форма била під час його експлуатації змінюється. Це спричиняє й зміну питомого зносу, але на початку зношування. Коли робоча кромка била загострена, спостерігається інтенсивне зношування, що обумовлене високими питомими навантаженнями. До моменту, що відповідає точці *X* (рис.3.8), питомий знос дещо знижується, а далі знову росте (рис.3.9)

Проаналізував вплив ширини верха била (рис.3.8, 3.9) є підстави вважати, що збільшення площі верхніх поверхонь бив, що контактують з матеріалом, що подрібнюється, підвищує питомий знос бил. Це стає через збільшенням зовнішньої поверхні бил, а робота внаслідок цього дроблення не зростає, лише подовжується шлях ковзання абразивних частинок матеріалу, що дробиться, по поверхні бив, що ще більше призводить до зносу їх, і саме тому потрібно прагнути робити била як умова мінімальної товщини.

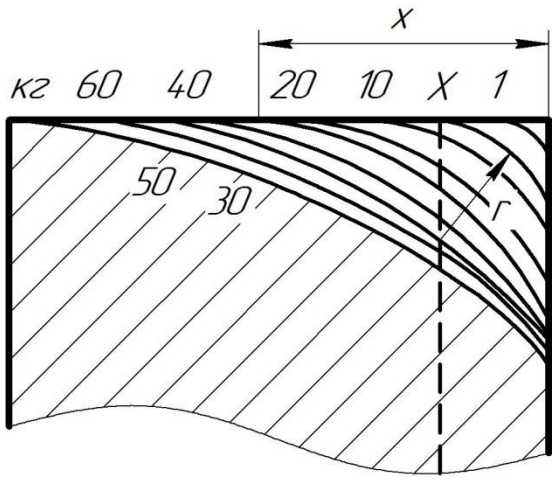


Рисунок 3.8 – Зміна форми кромки била

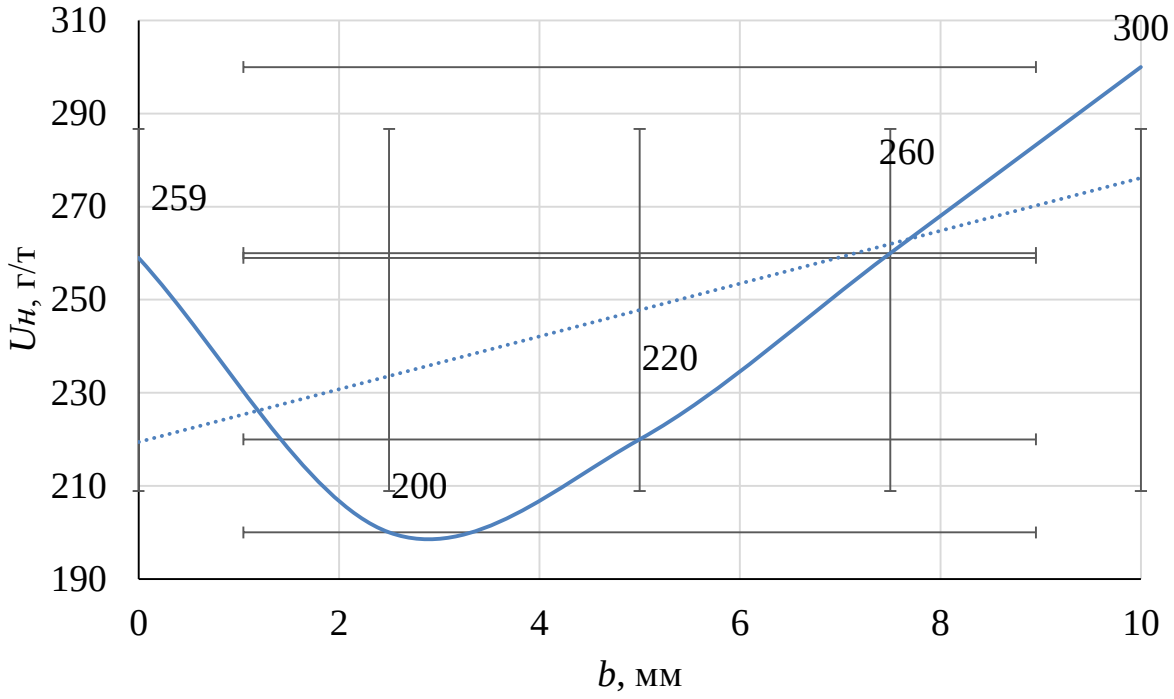


Рисунок 3.9 – Залежність питомого зносу матеріалу бил від їх ширини

3.3.3 Залежність ступеня дроблення та питомого зносу від зносу била

На графіку (рис.3.10) зображено криву питомого зносу від більшого зростання зносу бил, а на графіку (рис.3.12) – показано зменшення ступеня дроблення від збільшення загального зносу бил.

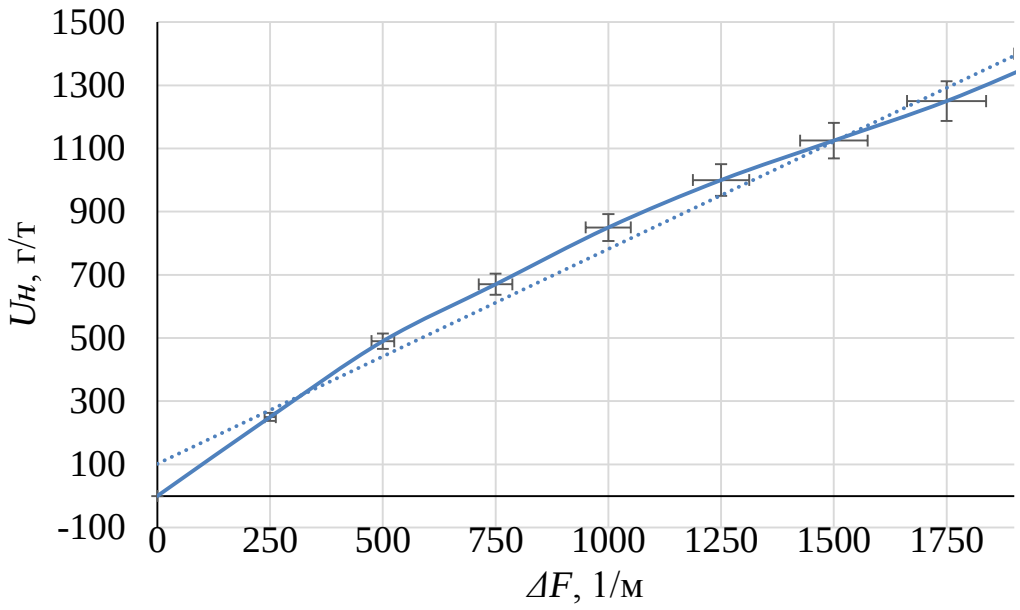


Рисунок 3.10 – Залежність питомого зносу била від ступеня дроблення

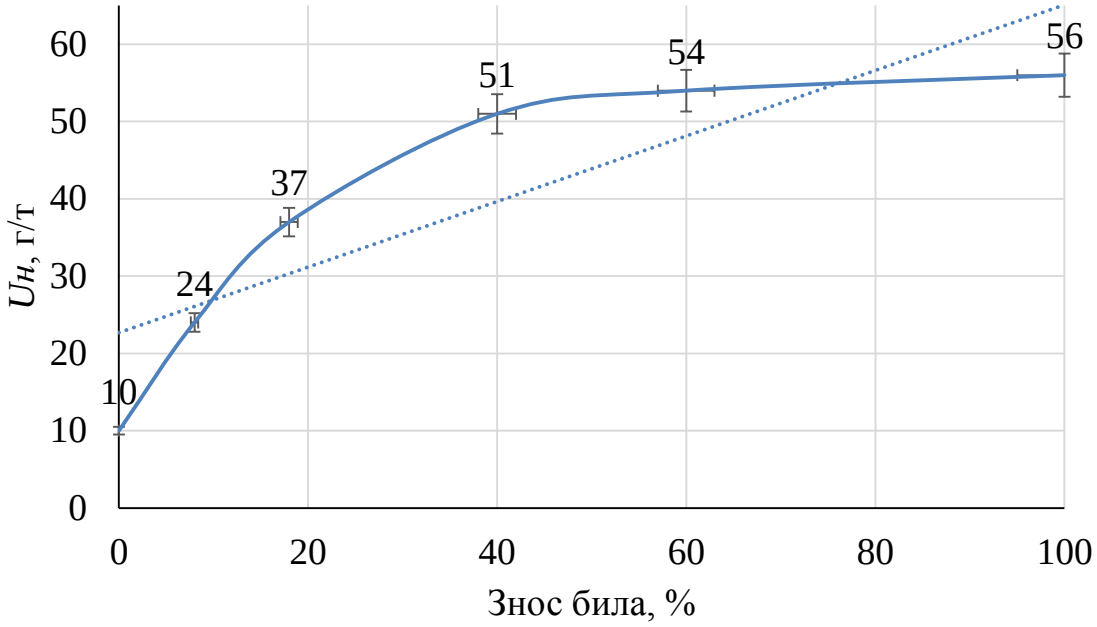


Рисунок 3.11 – Залежність питомого зносу била від зносу бил

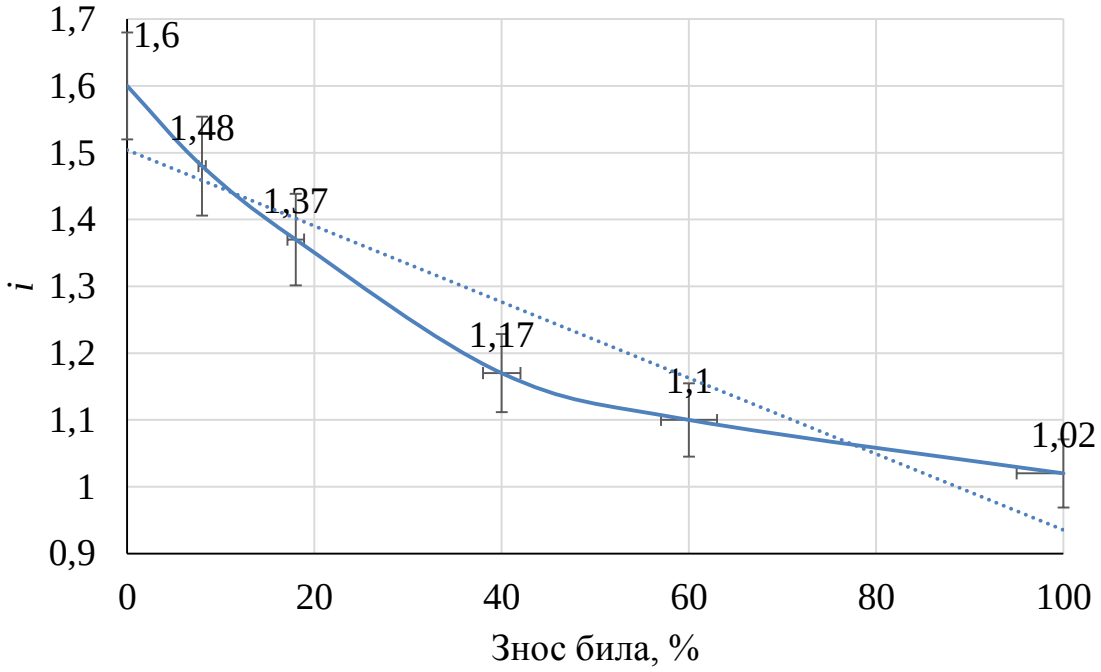


Рисунок 3.12 – Залежність ступеня дроблення від зносу бил

Згідно з проведеними дослідженнями можна зробити наступні висновки:

а) оптимальна величина кута α, при якому відбувається максимальне зношування кромки била, складає від 23^0 до 57^0;

б) збільшення площі верхніх поверхонь бив, що контактують з матеріалом, що подрібнюється, підвищує питомий знос бил, а робота внаслідок цього дроблення не зростає, лише подовжується шлях ковзання абразивних частинок матеріалу, що дробиться, по поверхні бил, що ще більше призводить до зносу їх. Тому потрібно робити била як умова мінімальної товщини;

в) зростання загального зносу бил негативно впливає на ступінь дроблення (має різко падаючу криву – по експоненті) та майже дзеркально ступеню дроблення зростає питомий знос бил. Це в свою чергу, досить негативно впливає на продуктивність й якість готового продукту.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз теоретичних та експериментальних досліджень дозволив встановити:

1. Дробарки ударної дії являють собою велику групу подрібнювальних машин, що широко застосовуються в металургійній галузі промисловості для сухого дроблення найрізноманітніших матеріалів: руд, вугілля, вапна, флюсів, мінеральних солей тощо. Загальною ознакою в роботі цих машин є дроблення ударами, які наносяться по подрібнювальному матеріалу робочими частинами механізмів машин. Іноді до удару додається стираюча або розривна дія.
2. Деталі в роторній дробарці піддаються різному впливу абразивного матеріалу і мають неоднакове питомий знос. Найбільше зношуються била ротора. Знос молотків та бил роторних дробарок досягає інколи 30% витрат, що йдуть на весь процес подрібнення, тому у деяких випадках він виявляється вирішальним чинником при проектуванні та експлуатації цього обладнання.
3. Енергоємність процесу подрібнення в роторних дробарках залежить від конструктивних та технологічних факторів, до яких відноситься і знос робочого органу. Наведені аналітичні залежності продуктивності та енергоємності процесу, ресурсу роторної дробарки та оцінка ефективності її роботи, які враховують знос робочих органів та якість подрібнення.

В ході експериментальних досліджень наведено взаємозв'язок впливу закругленості робочої кромки бил дробарки на енерговитрати та якість готового продукту:

а) отримано графік залежності питомого зносу матеріалу бил від кута атаки матеріалу та визначено оптимальна величина кута α, при якому відбувається максимальне зношування кромки била, й ця величина від 23^0 до 57^0;

б) збільшення площі верхніх поверхонь бил, що контактують з подрібнювальним матеріалом, підвищує питомий знос бил, а робота внаслідок цього дроблення не зростає, лише подовжується шлях ковзання абразивних частинок подрібнювального матеріалу по поверхні бил, що ще більше призводить до їх зносу. Тому потрібно робити била як умова мінімальної товщини;

в) при зростанні загального зносу бил чи молотків – це негативно впливає на ступень дроблення та майже дзеркально ступеню дроблення зростає питомий знос бил, це в свою чергу, досить негативно впливає на продуктивність й якість готового продукту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. 284 с.
2. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин. Донецк : Східний видавничий дім. 2000.
3. Гірничий енциклопедичний словник / За ред. В.С.Білецького. тт. 1-3, 2001-2004.
4. ДСТУ 2411-94. Дробарки. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1994. 16 с. (Інформація та документація).
5. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія / Сокур М. І., Кіяновський М. В., Воробйов О. М., Сокур Л. М., Сокур І. М. Кременчук : видавництво ПП Щербатих О. В., 2014.304 с.
6. М.Г. Маліч, Д.В. Кресс, З.М. Різо. До питання визначення кількості енергії, необхідної для дезінтеграції гірських порід до певного розміру // *Системні технології / Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. Дніпро, НМетАУ №4 (141). Дніпро : 2022. С 115-130, МНБ : DOI 10.34185/1562-9945-4-141-2022.
7. М. Маліч, Л. Васильєв, Д. Васильєв Оцінка енергії руйнування зразків гірських порід при асиметричному навантаженні // *Матеріали міжнародної конференції* . Дніпро : Національний технічний університет, 2021. С. 132-139
8. В.С. Блохін, В.І. Большаків, Н.Г. Маліч. Основні характеристики технологічних машин. Машини для дезінтеграції жорстких матеріалів: навчальний посібник ч.1. Дніпропетровськ; ІМА – прес. 2006. 404с.
9. Сокур М. І., Білецький В. С., Ведмідь І. А., Робота Є.М. Рудопідготовка: дроблення, подрібнення, грохочення : монографія. Кременчук : ПП Щербатих О. В. 2020. 494 с.

10. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л.В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Київ : Ліра-К 2020. 634 с.
11. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г., Ангеловский А.А. Механіка створення форм руйнування зразків гірських порід : монографія. Дніпро, ІМА-прес. 2018. 172с.
12. Інтернет ресурс http://uk.wikipedia.org/wiki/Дроблення_і_подрібнення
13. Інтернет ресурс https://uk.wikipedia.org/wiki/Молоткова_дробарка.
14. Шмиг Р.А., Боярчук В.М. , Добрянський І.М., Барабаш В.М. Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури. Львів, 2010. 222 с. ISBN 978-966-7407-83-4.
15. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. Донецьк : Донбас, 2004. Т.1. 640 с. ISBN 966-7804-14-3.
16. Білецький В.С., Смирнов В.О., Сергєєв П.В. Моделювання процесів переробки корисних копалин : посібник. НТУ «Харківський політехнічний інститут», Львів : «Новий Світ - 2000», 2020. 399 с.
17. Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / Сокур М.І. та ін.. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с. ISBN 978-617-639-139-5.
18. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 655 с. ISBN 5-11-004083-4.
19. Кузьо І.В., Ванькович Т.М., Зінько Я.А. Теоретична механіка. Динаміка : навчальний посібник Кн.1. Львів : Растр-7, 2012. 444 с.
20Троханяк В.І., Богдан Ю.О. Застосування методу кінцевих елементів при побудові сітки в ANSYS Medhing для CFD моделей. Вісник приазовського державного технологічного університету. 2015, №30. С.181-189.
21. Mohs, F. Grundriss der MineralogieDresden, 1822.
22. Vasil’ev L.M. Theoretical ground for origination of normal horizontal stresses in rock masses / L.M. Vasil’ev, D.L. Vasil’ev // Journal of Mining Science – 2013. Vol. 49, №2 , USA– pp 240-24733.

23. Shulat'ev V., Mochnatkin V., Krasikow D. Doskonalenie ksztaltu obudowy korpusu kosiarkorozdrabniacza KIR-1,5. *Ekologiciczne aspekty mechanizacji produkcji roslinnej*: X Miedzynarodowesympozjum. Warszawa. Melitopol, 2003. p. 217–224.
24. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper . *Journal fur die reine und angewandte Mathematik*. 1882. Iss. 92. p. 156–171.
25. Laursen, T.A. Computational Contact and Impact Mechanics : *Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis*. New York : Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2002. p. 454
26. Berggren, J. Lennart. Mathematics in Medieval Islam. *The Mathematics of Egypt, Mesopotamia, China,* India, and Islam : A Sourcebook. Princeton University Press. 2007. p. 518.
27. ДОСТ 21153.2–84. Методи визначення границі міцності при стисканні.
28. ДОСТ 28985–91. Метод визначення деформаційних характеристик при односному стисканні.
29. Пустильник Е.І. Статистичні методи аналізу і обробки спостережень. Наука, 1968. 288 с.
30. Стенд для дослідження матеріалів на тертя та знос : пат. 131442 Україна : G01N 3/56. № u 2018 08516 ; заявл. 06.08.2018 ; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1. 2 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця – Результати розрахунку руйнування розривом від дії відцентрових сил

σ, МПа	$D_{част}$, мм	p, Кг/м^3	m, кг	$S_{сеч.част}$, м^1	$F_{разр}$, Н	Радіус центра ваги r_1, мм	Швидкість обертання частинки на радіусі v_1, м/с	Частота обертання частинки n, об/хв	Швидкість обертання на поверхні частинки v, м/с
40	0,1	2000	$1{,}04667 \cdot 10^{-9}$	$7{,}85 \cdot 10^{-9}$	0,314	0,01875	173,21	88257365,99	461,88
	0,2		$8{,}37333 \cdot 10^{-9}$	$3{,}14 \cdot 10^{-8}$	1,256	0,0375	173,21	44128683	461,88
	0,3		$2{,}826 \cdot 10^{-8}$	$7{,}065 \cdot 10^{-8}$	2,826	0,05626	173,21	29419122	461,88
	0,4		$6{,}6986710^{-8}$	$1{,}256 \cdot 10^{-7}$	5,024	0,075	173,21	22064341,5	461,88
	0,5		$1{,}30833 \cdot 10^{-7}$	$1{,}962510^{-7}$	7,85	0,09375	173,21	17651473,2	461,88
	0,6		$2{,}260810^{-7}$	$2{,}82610^{-7}$	11,304	0,1125	173,21	14709561	461,88
	0,7		$3{,}5900710^{-7}$	$3{,}846510^{-7}$	15,386	0,13125	173,21	12608195,14	461,88
	0,8		$5{,}3589310^{-7}$	$5{,}02410^{-7}$	20,096	0,15	173,21	11032170,75	461,88
	0,9		$7{,}630210^{-7}$	$6{,}358510^{-7}$	25,434	0,16875	173,21	9806373,999	461,88
	1		$1{,}0466710^{-6}$	0,000000785	31,4	0,1875	173,21	8825736,599	461,88

ДОДАТОК В

Таблиця – Знос бил роторних дробарок, виготовлених зі сталі марки 110Г13Л (C_{30}=5 кг/г, C_{60}=1,7 кг/г)

Модель дробарки	Характеристика горної породи				Режими роботи дробарки						Знос бил в г/м^3		
	Найменування	Родовище	$И_{30}$ в г/т	$И_{60}$ в г/т	$v_р$, м/с	S_1 в мм	S_2 в мм	S_3 в мм	D_{max}	t	$И_Н$	$И_б$	$К_{ИС}$
СМД-60	Вапняк	Ковровський кар’єр	8-20	32-86	26,8	250	240	-	600	2,86	0,4	1,8	0,2
СМД-75	Вапняк	Ковровський кар’єр	8-20	32-86	30,8	110	80	50	250	2,83	3,0	10,1	0,3
СМД-87	Титано-магнетитова руда	Сарбайський рудник	360	1290	30,0	400	120	-	1100	8,4	3,7±2,1	-	-
СМД-87	Железна руда	Стойленський кар’єр	140	420	30,0	400	120	-	1200	12,2	1,4±1,1	-	-