

Міністерство освіти і науки України

Запорізький інженерний інститут Запорізького національного університету

Факультет металургії

Кафедра металургійного обладнання

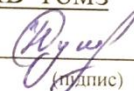
## ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему «ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ КРИХКИХ  
МАТЕРІАЛІВ В ВАЛКОВІЙ ДРОБАРЦІ»

Виконав: магістрант групи МБ-18мз

Сумін М.А.

(ПІБ)

  
(підпис)

спеціальності 133- «Галузеве машинобудування»

(шифр і повна назва)

Спеціалізація

(шифр і повна назва)

освітньо-професійна програма

133.00.12 Металургійне обладнання

(шифр і повна назва)

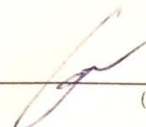
Керівник Шевченко І.А.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Н.контроль Васильченко Т.О.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Запоріжжя – 2020

Факультет металургії

Кафедра металургійного обладнання

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація \_\_\_\_\_

Освітньо-професійна програма 133.00.12 Металургійне обладнання

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Й.К. Огінський

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 року

## ЗАВДАННЯ ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Сумін Микита Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація процесу дроблення крихких матеріалів в валковій дробарці

керівник роботи к.т.н., доцент Шевченко І.А. ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 10 вересня 2019 року №1541-С.







2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: Технологічні вимоги до процесу подрібнення крихких матеріалів; ефективність процесу дроблення дробарками переважної статичної дії; технічні характеристики валкових дробарок. 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 сучасного стану процесу руйнування крихких матеріалів і конструкцій валкових дробарок; 2. Теоретичний аналіз процесу дроблення матеріалів в дробарках переважної статичної дії; 3. Експериментальні дослідження процесу дроблення.

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 \_\_\_\_\_


КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної Роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Узгодження і затвердження теми та змісту роботи; складання бібліографії та опрацювання літературних джерел	01.09.2019 - 17.09.2019	
2	Збирання матеріалу, опрацювання нормативних Документів	17.09.2019- 15.10.2019	
3	Аналіз зібраного матеріалу	15.10.2019- 11.12.2019	
4	Виконання основної частини роботи та проведення експериментальних досліджень	15.10.2019- 01.12.2019	
5	Підготовка висновків	01.12.2019- 11.12.2019	
6	Оформлення роботи	11.12.2019- 20.12.2019	
7	Перевірка відповідності оформлення роботи встановленим вимогам	20.12.2019- 25.12.2019	
8	Рецензування магістерської роботи	25.12.2019 - 08.01.2020	
9	Попередній захист роботи	Згідно графіку	
10	Захист роботи у ДЕК	.01.2020	

Студент

  
(підпис)

Керівник роботи

  
(підпис)

Сумін М.А.  
(прізвище та ініціали)

Шевченко І.А.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Сумін М.А. Оптимізація процесу дроблення крихких матеріалів в валковій дробарці.

Кваліфікаційно-випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник І.А. Шевченко . Інженерний інститут Запорізького національного університету. Факультет металургії, кафедра металургійного обладнання, 2020.

Наведено огляд та аналіз процесу дроблення крихких матеріалів в одновалковій дробарці, при якому відбувається руйнування роздрібнювального шматка, в тому числі, і під дією дотичних напружень. На основі теоретичних і експериментальних досліджень визначено енергоефективність дробарок, у яких в подрібнювальному шматку виникають дотичні напруження, в порівнянні з відомими дробарками стиснення.

Ключові слова: ДРОБАРКА, ВАЛОК, НАПРУЖЕННЯ, РУЙНУВАННЯ, ДРОБЛЕННЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ

## ABSTRACT

Sumin MA Optimization of the process of crushing brittle materials in a roll crusher.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in higher education by specialty 133 - Galusev Machine Wash, scientific supervisor I.A. Shevchenko Zaporizhzhia State Engineering Academy. Faculty of Metallurgy, Department «Metallurgical equipment», 2020.

The review and analysis of the process of crushing of brittle materials in a single-roll crusher, which destroys the crushing piece, including under the action of tangential stresses, is presented. On the basis of theoretical and experimental studies, the energy efficiency of crushers in which tangible stresses are generated in the crushing unit, compared to the known compression crushers, has been determined.

Keywords: CRUSHER, ROLLER, TENSION, DESTRUCTION, CLEARANCE, CRUSHING, PRODUCTIVITY

## АННОТАЦИЯ

Сумин М.А. Оптимизация процесса дробления хрупких материалов в валковой дробилке.

Квалификационная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 133 - Отраслевое машиностроение, научный руководитель И.А. Шевченко. Инженерный институт Запорожского национального университета. Факультет металлургии, кафедра металлургического оборудования, 2020.

Приведен обзор и анализ процесса дробления хрупких материалов в одновалковой дробилке, при котором происходит разрушение дробимого куска, в том числе, и под действием касательных напряжений. На основе теоретических и экспериментальных исследований определены энергоэффективность дробилок, в которых в дробимом куске возникают касательные напряжения, по сравнению с известными дробилками сжатия.

Ключевые слова: ДРОБИЛКИ, ВАЛОК, НАПРЯЖЕНИЯ, РАЗРУШЕНИЕ, ДРОБЛЕНИЕ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	6
ВСТУП.....	7
<b>1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ ВАЛКОВИХ ДРОБАРОК.....</b>	<b>10</b>
1.1 Аналіз сучасних способів руйнування твердих матеріалів.....	10
1.2 Теоретичні принципи раціонального руйнування твердих матеріалів	13
1.3 Аналіз існуючих конструкцій валкових дробарок.....	19
1.3.1 Область застосування і основні конструктивні схеми.....	19
1.3.2 Огляд конструкцій валкових дробарок.....	24
1.4 Конструкції запобіжних пристроїв валкових дробарок.....	35
<b>2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ В ДРОБАРКАХ ПЕРЕВАЖНОЇ СТАТИЧНОЇ ДІЇ...</b>	<b>37</b>
2.1 Силовий аналіз процесу дроблення в одновалковій дробарці. Умови захоплення.....	37
2.2 Визначення напружень, що виникають в руйнованому шматку при дробленні в одновалкової дробарці. Математична модель процесу руйнування.....	43
2.3 Математична модель багатостадійного процесу руйнування дробленого шматка.....	48
2.4 Визначення параметрів одновалкової дробарки.....	52
2.4.1 Розробка методики оцінки енергоефективності дробарок стиснення.....	52
2.4.2 Розрахунок потужності двигуна одновалкової дробарки.....	62
2.4.3 Порівняльний аналіз установчої потужності двигуна одно- і двовалкових дробарок.....	70
2.4.4 Вплив діаметра валка і величини розміру зазору між валком і нерухомою щогою на ступінь подрібнення.....	75
<b>3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ.....</b>	<b>80</b>
3.1 Методика проведення експериментів.....	80
3.1.1 Виготовлення зразків.....	80
3.1.2 Випробування зразків на УИМ – 20.....	80

3.1.3 Силівимірювальна апаратура.....	81
3.2 Результати проведення експерименту.....	82
3.2.1 Опис експериментальної установки.....	82
3.2.2 Силіві характеристики процесу дроблення.....	86
3.2.3 Характер руйнування шматка в одновалкової дробарці.....	89
3.3 Вплив коефіцієнта тертя між подрібнюваністю шматком і нерухомою щогою на мінімальний розмір зазору, при якому відбувається захоплення зразка.....	92
3.4 Визначення положення площини максимальних дотичних напружень.....	95
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
ДОДАТОК А.....	108
ДОДАТОК Б.....	112

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

$\sigma_{zl}$	Границя міцності на злом
$\sigma_{ст}$	Границі міцності на стиск
$\sigma$	Нормальне напруження
$\tau$	Дотичне напруження
$\varepsilon$	Деформація шматка
$E$	Модуль пружності
$D$	Середній розмір куска після подрібнення
$A_{\Sigma}$	Повна витрата енергії на подрібнення матеріалу визначеної крупності
$i$	Ступінь подрібнення матеріалу
$A_v$	Енергія, необхідна для однакової зміни форми геометрично подібних і однорідних тіл
$A_s$	Робота, затрачувана на подрібнення
$\gamma$	Питома поверхнева енергія тріщини
$\Delta S$	Новоутворена, при руйнуванні, поверхня
$tg\alpha$	Коефіцієнт тертя;
$R$	Радіус куска, що руйнується.
$M$	Коефіцієнт Пуассона;
$N_{об}$	Потужність приводу дробарки
$Q$	Продуктивність дробарки
$D$	Діаметр валка
$L$	Довжина валка
$A$	Кут захвату
$N$	Частота обертання валка
$A$	Зазор між валком і нерухомою щокою
$f_2$	Коефіцієнт тертя між шматком подрібнювального матеріалу і щокою
$S_{ск}$	Площа сколювання
$\theta$	Кут, який визначає положення площини максимальних дотичних напружень



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Розвиток металургійної промисловості тісно пов'язаний з ростом обсягів використання мінеральної сировини, що є вихідним компонентом для різних технологічних процесів, при цьому повинен дотримуватися відповідний фракційний склад рудних і нерудних матеріалів. Для отримання необхідного розміру фракції сировини застосовуються різні агрегати. Оскільки переважна більшість шихтових матеріалів, що використовуються в металургії, є крихкими, завдання вирішується шляхом дроблення вихідних шматків великого розміру.

Витрата енергії на дроблення мінеральної сировини при рудо - і вуглепідготовки для ведення металургійних процесів, в світовому енергетичному балансі становить більше 5%. Така витрата енергії в більшій мірі зумовлена високою енергоємністю безпосередньо процесу дроблення, заснованого на стисненні руйнуючих шматків. Тому особливу значущість представляють розробки нових і вдосконалення існуючих процесів дроблення. Відомо, що границя міцності при одноосьовому стисканні в 1,8 ... 2,0 рази більше, ніж границя міцності при зсуві. Тому будь-які зміни технології дроблення крихких матеріалів, спрямовані на генерацію в осередку руйнування зони дроблення деформацій зсуву між шарами матеріалу, що руйнується, сприяють в тій чи іншій мірі зменшенню витрат енергії на подрібнення. Таким чином, актуальними є практично всі наукові і технічні рішення в цьому напрямку.

*Мета роботи:* Проведення аналізу процесу дроблення крихких матеріалів в дробарці, при якому відбувається руйнування роздрібнювального шматка, в тому числі, і під дією дотичних напружень. Визначення на основі теоретичних і експериментальних досліджень енергоефективності дробарок, в яких в подрібнювальному шматку виникають дотичні напруження, в порівнянні відомими дробарками стиснення.

Задачі дослідження:

- проведення силового аналізу процесу руйнування крихких матеріалів в одновалковій дробарці і визначення напружень, що виникають в подрібнювальному шматку крихкого матеріалу, встановлення умов захоплення роздрібнювального шматка в зазор між валком і щогою;

- складання математичної моделі процесу руйнування крихкого матеріалу під дією складного напруженого стану, в тому числі, і для багатостадійного процесу дроблення;

- проведення порівняння енергоефективності одновалкової дробарки з дробарками стиснення (щоговою, конусною, двохвалковою);

- вивчення впливу коефіцієнтів тертя, а також розмірів діаметра валка і величини зазору між валком і щогою на ступінь дроблення.

*Предмет дослідження:* взаємозв'язок енерговитрат на подрібнення крихких матеріалів з параметрами дробарок стиснення.

*Об'єкт дослідження:* технологічний процес дробарки крихких матеріалів і засоби його здійснення.

*Методи дослідження.* Для досягнення мети використано комплекс сучасних загальнонаукових методів:

- *теоретичних:* аналіз нормативної документації, патентів, матеріалів; використання закономірностей і методів теоретичної механіки, опору матеріалів, класичної теорії подрібнення і математичного аналізу.
- *емпіричних:* моделювання, теоретичний обчислювальний експеримент, лабораторні дослідження.

Ступінь достовірності результатів забезпечена використанням апробованих методів дослідження, поєднанням методів теоретичного і експериментального аналізу, збіжністю даних фізичного моделювання і теоретичних досліджень.

Роботу виконана відповідно до плану науково-дослідної роботи студентського наукового гуртка «Технологічне обладнання процесів подрібнення і змішування» кафедри «Металургійне обладнання» ІІ ЗНУ.

*Апробація роботи.* Матеріали основних положень магістерської роботи доповідались на XII університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2019» (15-17 квітня 2019 року) і XXIV науково-технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів II ЗНУ «Металургія як основа сучасної промисловості» 26-29 листопада 2019 р.

*Публікації.* За матеріалами магістерської роботи опубліковано 3 тези:

1. Сумін М. Особливості механіки руйнування твердих матеріалів. *Збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2019»* : у 5 т. / Запорізький національний університет. Запоріжжя : ЗНУ, 2019. – Т.5. с.110-112.
2. Сумін М.А., Шевченко І.А. Теоретичний аналіз процесу дроблення крихких матеріалів в одновалковій дробарці. *Матеріали XXIV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів. Металургія як основа сучасної промисловості.* Том I / II ЗНУ. Запоріжжя: II ЗНУ. 2019 р. с.49.
3. Сумін М.А., Шевченко І.А. Вплив коефіцієнта тертя в одновалковій дробарці на мінімальний розмір зазору для захоплення матеріалу. Матеріали XXIV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів. *Металургія як основа сучасної промисловості.* Том I/II ЗНУ. Запоріжжя: II ЗНУ. 2019 р. с.54.

*Структура та обсяг магістерської роботи.* Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 114 сторінках машинописного тексту, містить 6 таблиць, 45 рисунків, список використаних джерел з 64 найменувань і 2 додатків.

# **1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ ВАЛКОВИХ ДРОБАРОК**

## **1.1 Аналіз сучасних способів руйнування твердих матеріалів**

Процес зменшення розмірів пружно-крихкого тіла від початкової (вихідної) крупності до необхідної шляхом впливу зовнішніх сил називається дробленням чи помелом, а машини, які застосовуються для цих цілей - дробарками або млинами.

Залежно від кінцевої крупності шматків матеріалу розрізняють наступні основні види цього процесу:

- дроблення (велике, середнє, дрібне);
- помел (грубий, тонкий, надтонкий).

У деяких випадках процес дроблення є підготовчим і одержуваний продукт направляється на подальшу переробку, як наприклад, при виробництві агломерату. В інших випадках в результаті дроблення виходить товарний продукт, тобто, процес дроблення має самостійне значення. Для забезпечення ефективності процес дроблення матеріалу від вихідної крупності до кінцевої крупності здійснюється, в більшості випадків, в кілька прийомів, послідовно на декількох дробарках. Частина загального процесу, виконувана на окремій дробарці, називається стадією дроблення.

Способи дроблення реалізують різноманітні типи дробильних машин і апаратів, що розрізняються за принципом дії і конструкції. Пояснюється це специфікою самого матеріалу, а саме необхідними значеннями і видами зусиль для подрібнення, а також розмірами частинок, отриманими після обробки.

Класифікація дробильно-подрібнювального обладнання заснована на різниці в способі руйнування матеріалу, який визначається видом енергії,

використовуваної для руйнування. Відповідно до цього всі машини ділять на 4 основних типи:

- 1) механічні дробарки,
- 2) механічні млини (з тілами, що мелють),
- 3) вибухові пневматичні, електрогідравлічні, електроімпульсні і електротермічні дробильні апарати,
- 4) аеродинамічні і пневмомеханічний млини - струменеві розмельні апарати без тіл, що мелють.

При руйнуванні твердих матеріалів найбільш поширеними є механічні методи впливу на матеріал, так як за допомогою їх можна забезпечити необхідну крупність готового продукту і його форму. Тому механічні методи так відрізняються своїм різноманіттям і поєднанням способів руйнування. Це в свою чергу призвело до різноманіття конструкцій подрібнювального обладнання, які власне і відображають механічні способи руйнування частинок матеріалу [3, 4], рис.1.1. Послідовно можна простежити використання того чи іншого способу в кожному подрібнювальне обладнанні. Найбільш часто використовують різні способи руйнування в одному подрібнювальне обладнанні.

Найбільше застосування отримали механічні дробарки і млини.

У відповідності до ГОСТ 14916-82 « Дробилки. Термины и определения» основними видами дробарок є: щокові, конусні, валкові, роторні, молоткові [1]. Кожному виду властивий свій набір руйнуючих і подрібнюючих сил та їх напрям.

Класифікація конструкцій дробарок і млинів різних типів за способами дії на дробимість матеріалу наведена на рис. 1.1.

У щоковій дробарці руйнування матеріалу відбувається за рахунок стиснення матеріалу між щоками. При реалізації додаткового руху щоки реалізується ще одне зусилля - зрушення. Застосовуються щокові дробарки в основному в гірничодобувній галузі для подрібнення руд. В процесі експлуатації відбувається інтенсивний знос робочої поверхні щік.

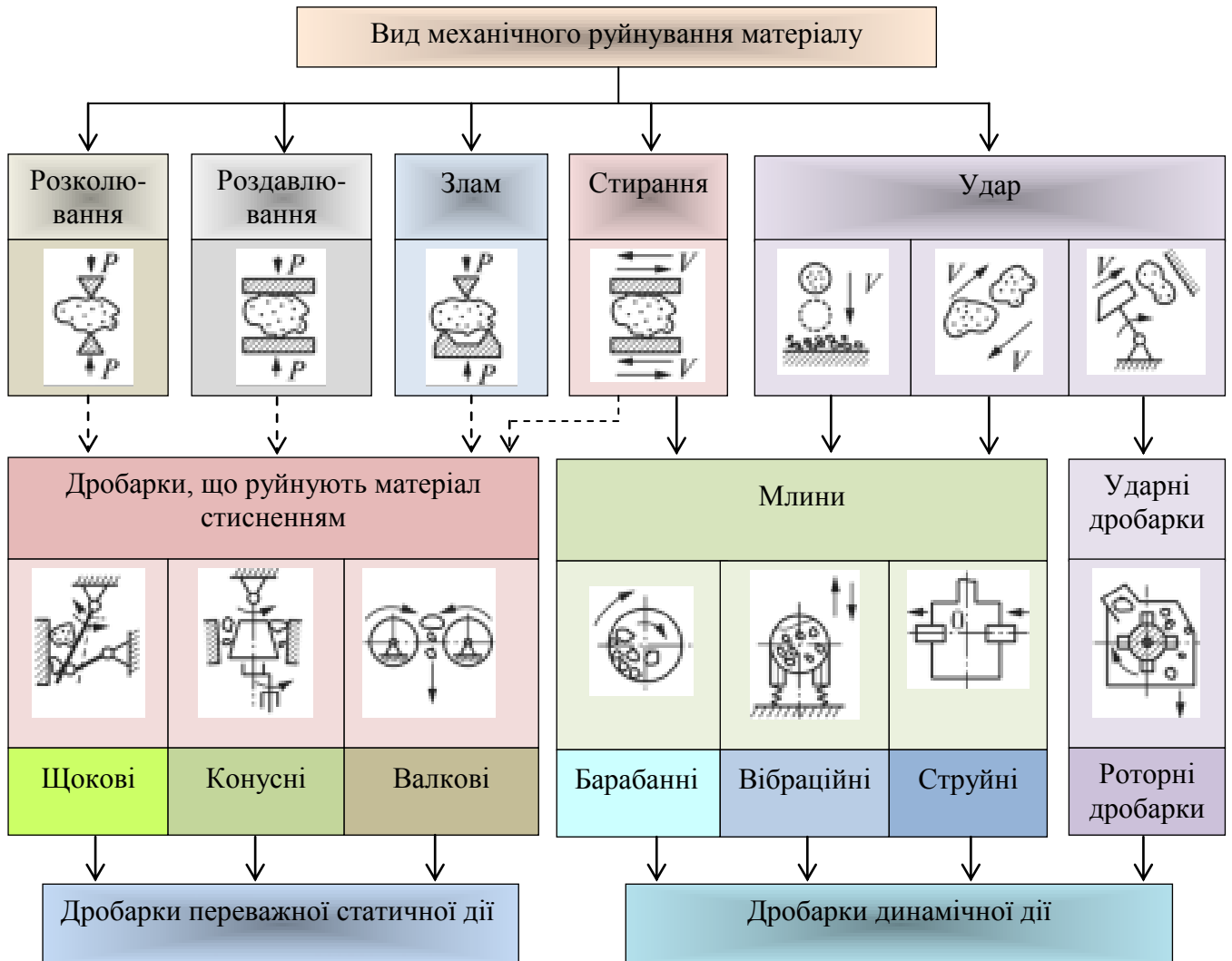


Рисунок 1.1 - Класифікація дробарок і млинів за способами механічного руйнування матеріалів

Конусні дробарки використовуються в гірничодобувних та металургійних галузях промисловості. Руйнування матеріалу відбувається за рахунок стиснення між конусами дробарки. При подрібненні матеріалу також відбувається інтенсивний знос поверхні конуса.

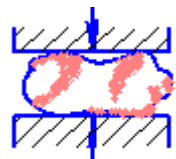
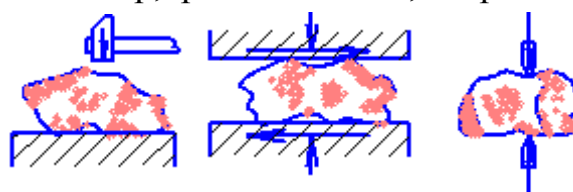

Валкові дробарки - один з найбільш конструктивно простих і поширених видів дробарок [2, 3, 4]. Застосування отримали в металургії, сільському господарстві, медицині, будівництві тощо. У валкових дробарках матеріал руйнується за рахунок стиснення між обертовими валками. Додаткова дія стирання на матеріал можлива при реалізації різних крутних моментів на

валках, або при використанні валків різних діаметрів в одній установці. При застосуванні у виготовленні валків різних профілів і конструктивних елементів можлива реалізація додаткових сил впливу.

Роторні та молоткові дробарки руйнують матеріал за рахунок ударної дії і стирання. Як і валкові дробарки, вони отримали дуже широке застосування в різних галузях. Для таких дробарок характерний підвищений знос бив і молотків внаслідок великих ударних навантажень [5].

Вибір способу руйнування твердих крихких матеріалів залежить від фізичних властивостей і крупності матеріалу (табл.1.1).

Таблиця 1.1 - Вибір методу подрібнення в залежності від фізико-механічних властивостей подрібнювального матеріалу

Матеріал	Метод подрібнення
Твердий й крихкий	Роздавлювання, удар 
Твердий й в'язкий	Роздавлювання 
Крихкий, середньої твердості	Удар, розколювання, стирання 
В'язкий, середньої твердості	Стирання або стирання й удар 

## 1.2 Теоретичні принципи раціонального руйнування твердих матеріалів

В процесі дроблення і подрібнення руйнування відбувається під дією зовнішніх сил. В основі їх лежить створення в руйнуємому об'єкті поля деформацій напружень, що перевищують граничні характеристики міцності матеріалу і спрямованих на розрив зв'язків кристалічної решітки з утворенням поверхні руйнування. Процес, в цілому погано контрольований, протікає хаотично. Саморуйнування відбувається в основному по ослаблених перетинах, які мають дефекти, після переходу за границю міцності нормальних і дотичних напружень, що виникають в матеріалі при його деформаціях, - стиску, розтяганні, вигині, зсуві.

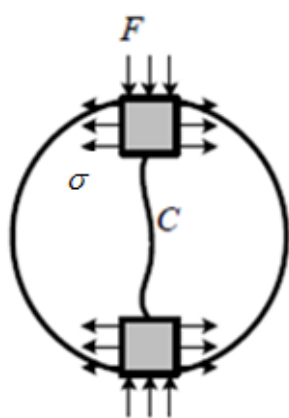
Частинки матеріалу руйнуються в результаті переходу зовнішніх зусиль за границі міцності (границя тимчасового опору) матеріалу. Широко застосовуються методи подрібнення, засновані на утворенні в частинках залишкової деформації шляхом роздавлення [4], коли руйнування відбувається внаслідок переходу напруження за границю міцності матеріалу на стиск; розколювання при переході напруження за границю міцності матеріалу на розтяг; зламу при переході напруження за границю міцності матеріалу на вигин; зрізу в поєднанні зі зломом при переході за границю міцності матеріалу на вигин і зсуву; стирання при переході дотичних напружень за границю міцності зсуву; удару або динамічного впливу, при цьому різновиди пружних деформації тут залишаються тими ж (стиснення, розтягнення, вигин, зсув) і руйнування відбувається при переході напружень за границі міцності матеріалу на стиск, розтяг, вигин і зсув.

Залежно від характеру руйнівного навантаження, дроблення шматків може відбуватися за рахунок механізму розколювання або роздавлення [1, 2]. У першому випадку, площа прикладання навантаження істотно менше розмірів шматка  $S = D^2$  (рис.1.2а). У місцях прикладання навантаження формуються два ядра ущільнення. Поперечне розширення ядер викликає напруження розтягу  $\sigma$ , під дією яких виникає і розвивається поздовжня тріщина

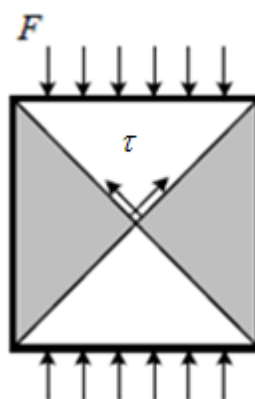


С. В результаті, відбувається розколювання шматка. При лінійному зосередженому навантаженні (розколювання клинами) матеріал розпадається на дві частини.

При роздавлюванні (рис.1.2б) руйнівне навантаження рівномірно розподіляється по площі шматка. Руйнування при цьому визначається дотичними напруженнями, максимальна величина яких досягається в зонах, орієнтованих під кутом  $45^\circ$  до напрямку дії стискаючих зусиль. Внаслідок цього, при руйнуванні шматка, як правило, утворюються два конуса.



а - розколювання;



б – роздавлювання

Рисунок 1.2 - Схеми розколювання і роздавлювання

Така картина спостерігається при повільному додаванню навантаження до ізолюваного зразка. При ударі в крихкому матеріалі утворюється велика кількість локальних ядер ущільнення й тіло руйнується на безліч дрібних частин [3]. В реальних умовах дроблення визначається різним поєднанням механізмів розколювання і роздавлювання. Схематично процес руйнування крихких матеріалів можна представити таким чином [4].

При малих навантаженнях в області між двома локальними ядрами ущільнень виникає тріщина розриву, механізм утворення якої досить точно описується теорією Гриффітса. Умова утворення тріщини – перевищення розтягуючих напружень відповідної межі міцності  $\sigma_p$ . Даний механізм є

основою першого критерію міцності Галілея – критерію найбільших нормальних напружень.

Подальше нарощування навантаження призводить до утворення тріщини в площинах паралельних лінії дії стискаючого навантаження. При цьому матеріал не втрачає своєї несучої здатності. Утворення таких поздовжніх тріщин зумовлено механізмом міжзеренного ковзання, коли за рахунок різниці в пружності зерен відбувається руйнування й відрив частинок один від одного. Це явище відповідає другим критерієм міцності Маріотта – критерієм найбільших подовжень. При цьому критична поздовжня деформація стиснення дорівнює

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\varepsilon_p}{\nu}, \quad (1.1)$$

де  $\varepsilon_p$  - найбільше головне подовження за критерієм Маріотта;

$\nu$  - коефіцієнт запасу міцності.

Умова освіти поздовжніх тріщин наближено записується у вигляді

$$\sigma_{cm} \approx \frac{\sigma_p}{\nu}. \quad (1.2)$$

При подальшому зростанні напруги вступає в дію класичний механізм роздавлювання, і руйнування визначається граничними дотичними напруженнями в майданчиках під кутом  $45^\circ$  до лінії дії навантаження (критерій найбільших дотичних напружень Кулона). Крихий матеріал втрачає несучу здатність при стискаючих напруженнях  $\sigma_{cm}$ , які зазвичай приймають як межа міцності на одновісне стиснення.

Руйнування твердих матеріалів відбувається внаслідок зростання тріщин, й таке руйнування називається крихким. Практично всі скельні породи руйнуються крихко, тобто, внаслідок зростання тріщин, хоча зустрічаються і

процеси пластичного деформування. Теорії крихкого руйнування твердих тіл відповідають на багато практичних питань руйнування гірських порід і дають можливість управляти процесами руйнування породи [1].

Міцність твердих тіл визначається зв'язками між атомами, іонами і молекулами, складовими твердого тіла, причому сила зв'язку електростатичної природи – кулонівська. В нормальному стані, при нормальному тиску і температурі, мікрочастинки, що становлять тверде тіло, знаходяться в стані рівноваги з певним відстанню між ними. Якщо мікрочастинки зрушити від положення рівноваги, тобто зменшити або збільшити відстань між ними, сили, що діють на мікрочастинки, зміняться. Коли на тверде тіло діє якась зовнішня навантаження, то, відповідно, виникає внутрішня сила, яка прагне повернути мікрочастинки в початкове положення. Якщо в тверде тіло ввести тріщину і прикласти навантаження, то тріщина не буде рости, і тіло збережеться в початковому стані за умови, що значення навантаження буде менше критичного. Однак якщо навантаження перевищить критичне значення, то тріщина збільшиться в розмірі, що, в кінцевому підсумку, призведе до поділу тіла тріщиною на окремі частини, і воно почне руйнуватися. Ця перша теорія тіл з тріщинами була розроблена Гріффітсом в 1924 році [5].

Вплив часу навантаження на міцність твердого тіла описує кінетична теорія міцності академіка С. Н. Журкова [6]. Іони твердого тіла коливаються біля положення рівноваги, відхиляючись на деякі відстані  $\Delta a$ ; внаслідок теплових флуктуацій, в якийсь момент часу, іони розходяться на величину більше  $\Delta a$ . Якщо в твердому тілі діє напруження  $\sigma_p$  розтягу, то воно фіксує розбіжність іонів, і вони вже не можуть повернутися в стан рівноваги. Таким чином, виникає точковий дефект, навколо якого концентруються напруги. Цей дефект під дією напруг, що розтягують і теплових флуктуацій розвивається, перетворюючись в кінцевому підсумку в тріщину.

У промисловості використовуються дробарки для руйнування матеріалів стисненням (валкові, щокові, конусні) і ударом (роторні, молоткові), тому

властивості подрібнюваністю на рівні кількісних оцінок і характеристик подрібнюваністю вивчені для цих двох видів руйнівної дії [7].

У щоківній дробарці матеріал дробиться роздавлюванням, розколюванням і частковим стиранням в просторі між двома щоками при їх періодичному зближенні.

У конусних дробарках матеріал дробиться роздавлюванням, зломом, частковим стиранням між двома конічними поверхнями, одна з яких рухається ексцентрично по відношенню до іншої, здійснюючи безперервне дроблення матеріалу.

У валкових дробарках матеріал роздавлюється між двома валками, що обертаються один назустріч іншому, нерідко, валки обертаються з різною частотою, і тоді роздавлювання матеріалу поєднується з його стиранням.

У молоткових дробарках матеріал подрібнюється, в основному, ударом по ньому шарнірно підвішених молотків, а також стиранням.

У роторних дробарках дроблення матеріалу здійснюється в результаті удару по ньому жорстко прикріплених до ротора бил, удару шматків матеріалу про відбивні плити і зіткнення шматків.

Процес руйнування крихких порід ударом і процес руйнування стисненням відрізняються один від одного і вимагають різних енерговитрат, необхідних для руйнування матеріалу (руйнування стисненням вимагає півтора кратної кількості витрати енергії, в порівнянні з руйнуванням ударом [8]). Однак у дробарок ударної дії є серйозний недолік, пов'язаний з якістю готової продукції, всього лише 25 - 30% готового продукту із заданим діапазоном крупності отримують при переробці в ударних дробарок [9].

Кожен вид руйнування матеріалу має як переваги, так і недоліки. У даній роботі розглянуті тільки дробарки для руйнування матеріалу стисненням, а зокрема – валкові.

## 1.3 Аналіз існуючих конструкцій валкових дробарок

### 1.3.1 Область застосування і основні конструктивні схеми

Валкові дробарки знайшли широке застосування в різних галузях промисловості: в металургії, на гірничо-збагачувальних комбінатах, при виробництві будівельних матеріалів, сільському господарстві, медицині тощо. Валкові дробарки - один з найбільш конструктивно простих і поширених видів дробарок [2, 3, 4]. Питома вага дробарок даного типу в кольоровій металургії доходить до 40%. Вперше валкова дробарка виготовлена в 1806 р. у Великій Британії.

Валкові дробарки застосовуються для дроблення матеріалів середньої і високої твердості (міцністю до 150 МПа), особливо ефективні валкові дробарки для подрібнення в'язких і вологих матеріалів. Валкові дробарки незамінні для циклів вторинного дроблення твердих порід, таких як вапняк, вугілля, рудні матеріали.

У відповідності до ГОСТ 14916-82 «Валкова дробарка - дробарка, дроблення в якій здійснюється стисненням матеріалу між обертовими валками або валком і нерухомою плитою».

Матеріал, що надходить в дробарку зверху, захоплюється валками, дробиться в просторі між валками і в якості дробленого продукту під дією сили тяжіння випадає з дробарки.

У валкових дробарках матеріал руйнується за рахунок стиснення між обертовими валками. Можлива додаткова стираюча дія на матеріал при реалізації різних крутних моментів на валках, або при використанні валків різних діаметрів в одній установці. При застосуванні у виготовленні валків різних профілів і конструктивних елементів можлива реалізація додаткових сил впливу.

Основними робочими елементами є масивні пустотілі цільні або збірні валки циліндричної форми (рис.1.3).

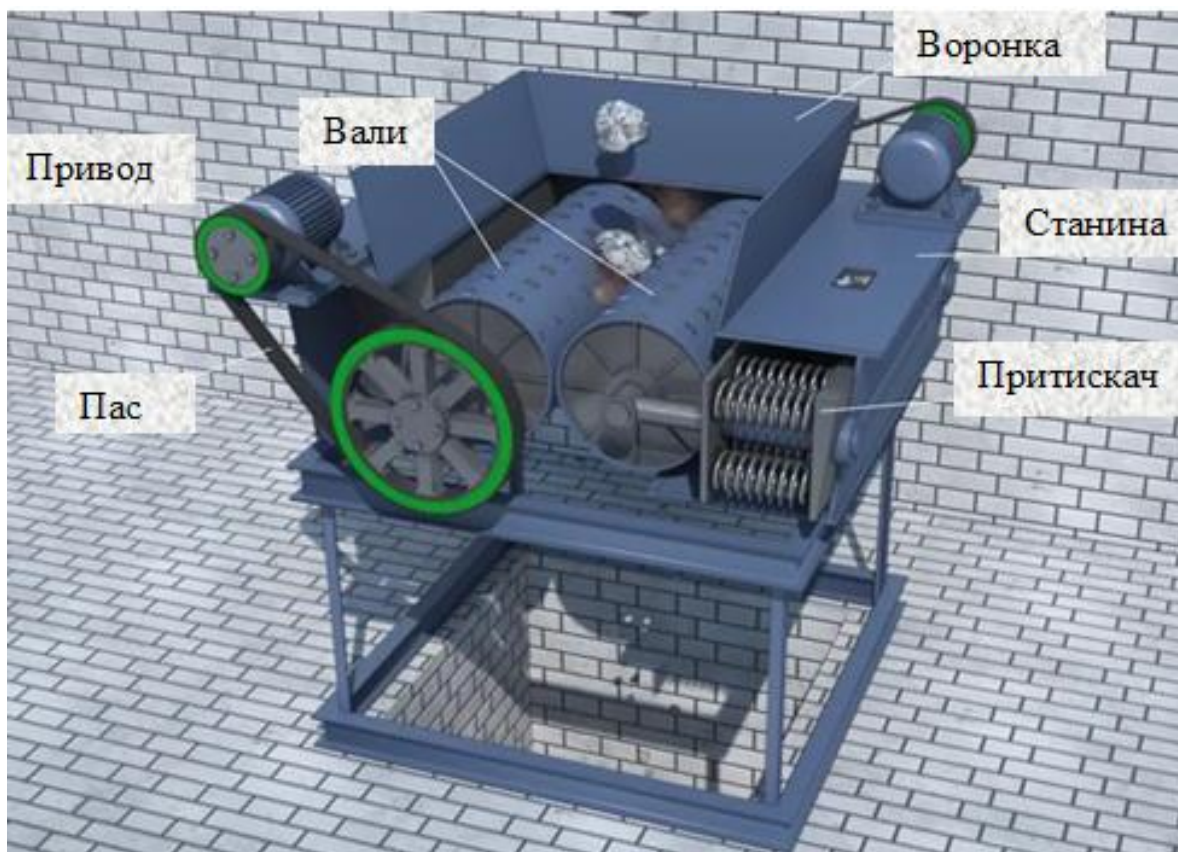
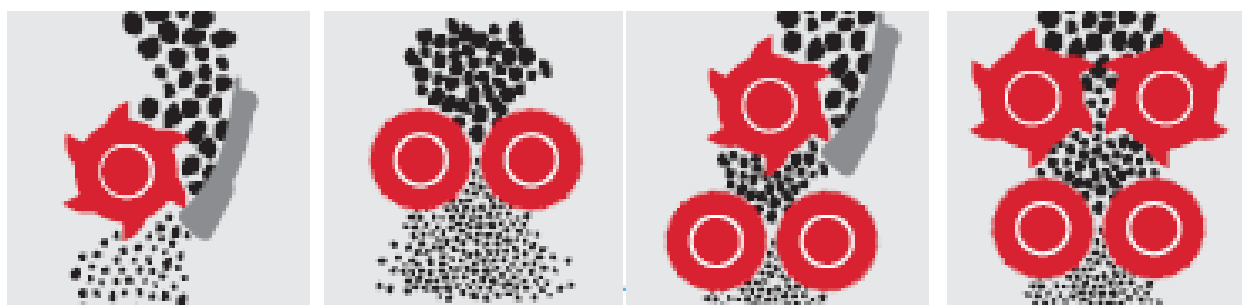


Рисунок 1.3 - Валкова дробарка

Валкові дробарки відрізняються різноманіттям конструктивних рішень в залежності від виду оброблюваної сировини. Класифікують їх за такими основними ознаками:

- за принципом дії (за характером дії на подрібнювальний матеріал): валкові дробарки, які діють роздавлюванням; дробарки, в яких матеріал подрібнюється роздавлюванням і одночасно стиранням, розколюванням або розриванням; дробарки, в яких матеріал подрібнюється роздавлюванням і частково ударом.
- за кількістю робочих органів (числом валків) - одно-, двох-, тривалкові та чотиривалкові (рис.1.4): одновалкові дробарки мають один єдиний приводний валок. Подрібнення відбувається між робочим органом і колосниковою решіткою або підвішеною щогою; двохвалкові - з одним рухомим валком для регулювання ступеня подрібнення матеріалу, і одним нерухомим робочим органом. Тривалкові і чотиривалкові - дозволяють

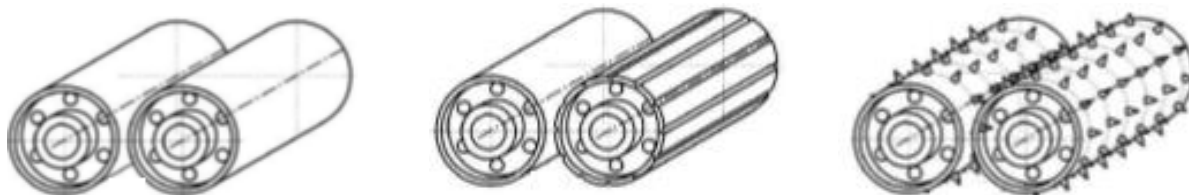
домогтися тонкого подрібнення подрібнювальних матеріалів або ж середнього ступеня подрібнення матеріалів з підвищеною твердістю.



а – одновалкова; б – двохвалкова; в – тривалкова; г - чотиривалкова

Рисунок 1.4 – Схеми розташування валків

- *за формою робочих поверхонь валків*: дробарки з гладкими, рифленими, зубчастими, ребристими (рис.1.5). Валкові дробарки з гладкою поверхнею валків застосовуються головним чином для середнього і дрібного дроблення твердих матеріалів. Іноді їх застосовують для дрібного дроблення вугілля і коксу. Гладкі валки здійснюють дроблення, переважно, роздавлюванням. Однократність стиснення шматків дробленого матеріалу при проходженні між валками обумовлює малий вихід дрібниці в подрібненому продукті. Ці дробарки не переподрібнюють матеріал. Зубчасті і рифлені валки забезпечують краще захоплення більших шматків матеріалу, а також більш ефективно їх розколювання. Ці валки подрібнюють головним чином за рахунок розколювання матеріалу.



а – гладкі;

б – рифлені;

в - зубчасті

Рисунок 1.5 - Види валків в валкових дробарках:

- залежно від частоти обертання валків (швидкохідні - колова швидкість валків становить 4...7 м/с; тихохідні - 2...3 м/с).

Для зубовалкових дробарок висоту зубів вибирають в залежності від матеріалу. Для твердих матеріалів зуби повинні бути короткими з тупим кутом і зрізом в вершині, для м'яких порід зуби роблять довгі з гострим кутом при вершині.

В зубовалкових дробарках матеріал подрібнюється в основному розколюванням, в гладко валкових - роздавлюванням і частково стиранням.

Валки, як правило, обертаються з однаковою швидкістю. В тому випадку, коли швидкості різні, посилюється стираюча дія валків на дроблений матеріал.

Застосування валків з різною робочою поверхнею - гладкою, ребристою, дірчастій або зубчастої - диктується фізико-механічними властивостями дробленого матеріалу, а також технологічним призначенням продукту дроблення.

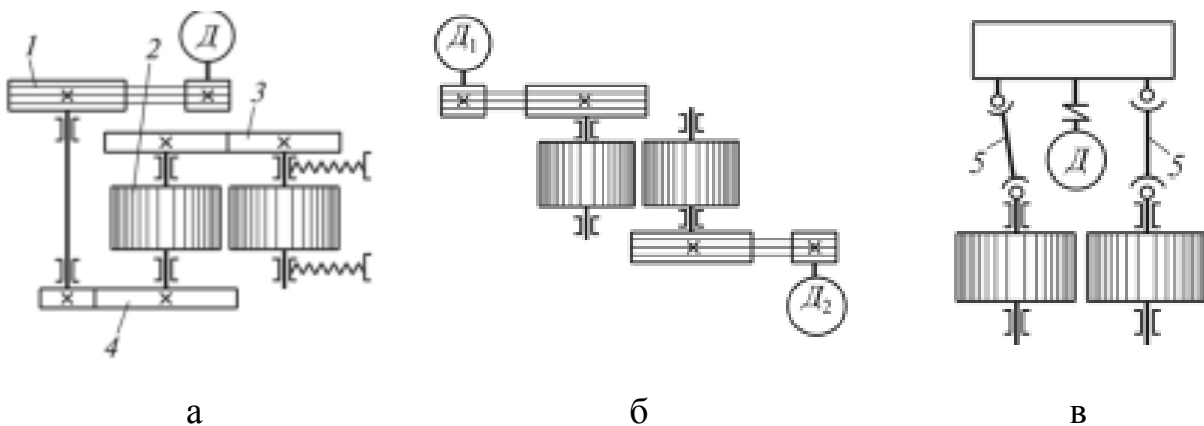
Діаметр гладких валків має бути в 15-20 разів більше розміру шматка, що надходить, а оскільки зазвичай валки виготовляють діаметром не більше 1200 мм (рідше 1500 мм), то розмір надходячих шматків подрібнювального матеріалу не повинен перевищувати 70 мм. Тому валкові дробарки з гладкими валками придатні лише для середнього і дрібного дроблення. Один з істотних недоліків дробарок з гладкими валками - випуск продукту лещадної форми. Дробарки з ребристими або рифленими валками можуть захоплювати шматки, розміри яких в 1,5-2,0 рази більше розміру шматків, що захоплюються гладкими валками: валки з зубчастою поверхнею дроблять шматки, розмір яких становить 0,5 і більше діаметра валка.

Для правильної експлуатації валкових дробарок необхідна безперервна і рівномірна подача дробленого матеріалу по всій довжині валка. Ступінь подрібнення залежить від властивостей дробленого матеріалу і конструкції валків. При дробленні в зубчатих валках в'язких глинистих матеріалів ступінь подрібнення доходить до 11-12 і навіть більше. Для дроблення кам'яних порід



середньої і малої міцності використовують дробарки з гладкими валками, для кращого захоплення шматків один з валків виконують рифленим.

Валкові дробарки складаються з валків, вальниць опорних валків, системи стиснення і налагодження, і системи приводу. Привід валкової дробарки може бути одинарним (рис. 1.6 а) - один двигун для двох валків - і подвійним - кожен валок приводиться в обертання від свого двигуна (рис. 1.6б). В якості приводу також використовують редуктор з карданним валом 5 (рис.1.6в) Готовий продукт відрізняється рівномірністю.



1 - клинопасова передача, 2 - валок, 3, 4 - зубчата передача, 5 - карданний вал

Рисунок 1.6 - Схеми приводу двовалкової дробарки

Найбільш часто застосовують валкові дробарки з однією парою рухомих і з іншою парою нерухомих опор. В цьому типі дробарок рухомі опори ковзають по напрямних. Рухомі вальниці утримуються на місці пружинами, що стискаються спеціальними болтами. При попаданні недробімих предметів пружини під дією навантаження, що збільшується, стискаються, в наслідок чого збільшується зазор між валками і недробімих предмет випадає з дробарки. Під дією пружин вальниці з валком повертаються в початкове положення. Дробарки з рухомо встановленими вальницями на обох валках через складність конструкції не знайшли достатньо широкого застосування. Розміри розвантажувального отвору в дробарках всіх типів регулюються за допомогою прокладок або пересувних конусів.

### 1.3.2 Огляд конструкцій валкових дробарок

Досвід багатьох фірм свідчать про значне поширення валкових дробарок різних конструкцій. Останнє пояснюється тим, що валкові дробарки найбільш пристосовані для переробки матеріалів, схильних до налипання або містять липкі включення. Застосування дробарок інших типів на переробці таких матеріалів або взагалі неможливо, або викликає часті простої, пов'язані з тривалою і трудомісткою очищення камери дроблення [10].

Відомо, що в дробарках з гладкими валками продукт не пере подрібнюється [11]. Це пояснюється тим, що руйнування матеріалу в валковій дробарці з гладкими валками йде способом «шматок про броні» (руйнування шматка відбувається по робочій поверхні дробарки), без пресування.

Валкова дробарка з гладкими валками – машина дрібного дроблення, тому що відповідно до умови  $D = (14..20) \cdot d$ , де  $D$ - діаметр валка;  $d$  - розмір роздрібнюванню шматка.

Тому для прийому вхідного шматка 100 мм (верхня межа крупності харчування дробарок дрібного дроблення) треба мати півтораметрові валки, а щоб приймати вхідні шматки 200 мм (серединна крупність харчування дробарок середнього дроблення), треба мати валки діаметром більше трьох метрів.

Для збільшення коефіцієнта тертя матеріалу об поверхню валків в період захоплення і зменшення його пере подрібнення, в процесі дроблення застосовуються валки з рифленими робочими поверхнями [12]. Для дроблення вугілля і їх продуктів, солей, мерзлих і не перезвожених матеріалів з грудками домішками використовуються зубчасті валки. Також випускаються зубчасті дробарки з різною швидкістю обертання валків, щоб забезпечити руйнування матеріалу не тільки за рахунок стиснення, але і за рахунок зусиль розтягу та зсуву [9].

При різній швидкості обертання валків одна сторона шматка крихкого матеріалу переміщається швидше за іншу і відбувається переорієнтація положення його таким чином, що він потрапляє і зтягується валками тоншою стороною, що має сприяти зменшенню прикладених зусиль і кількості пере подрібненого матеріалу [13].

Основні конструктивні схеми одновалкових дробарок представлені на рисунку (рис.1.7).

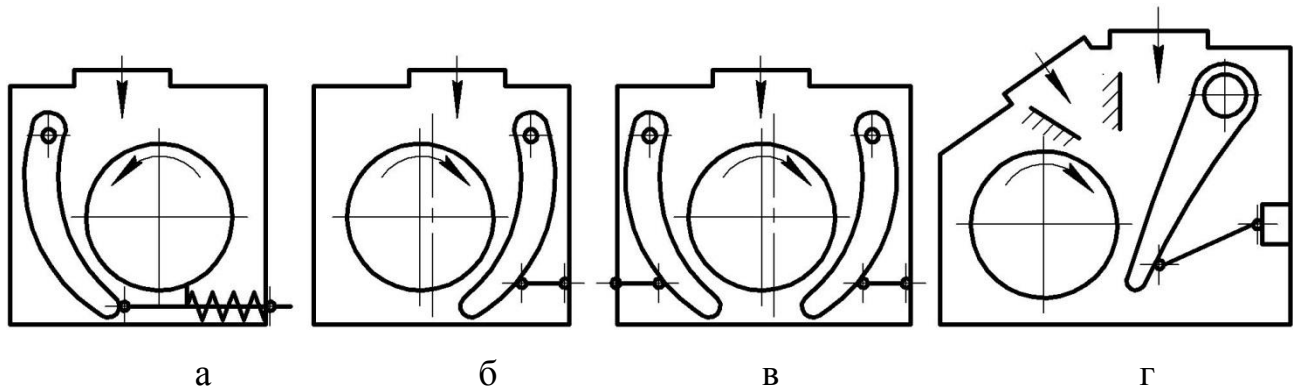


Рисунок 1.7 – Основні конструктивні схеми одновалкових дробарок

Схему *а*, де камера дроблення утворена поверхнями валка і нерухомою футерування, застосовують при зубчастому валку [7]. Одновалкову зубчасту дробарку використовують для дроблення вугілля, агломерату та ін. Дробарка складається з зубчастого валка і колосникових решіток, шарнірно підвішеній у верхній частині рами. Нижній кінець колосникових решіток притягнутий пружиною до регульованого упору, що дозволяє змінювати зазор між зубами і колосникових решітками, і оберігає дробарку від поломок при попаданні недробимих предметів.

За схемами *б* і *в* (рис.1.7) виконані одновалкові дробарки, які принципово відрізняються від усіх інших конструкцій. Валки цих дробарок спираються на підшипники, які закріплені на ексцентричній частині валу.

За схемою *б* виконана валковий-щоків дробарка-гранулятор «Гравілор» фірми АБМ. На ексцентриковому валу на роликів підшипниках закріплений валок, облицьований бандажем з трикутними рифленнями. Верхня частина

нерухомої щоки підвішена на осі, з'єднаної з бічними стінками корпусу. Нижня частина щоки спирається на розпірну плиту, яка впирається в регулювальний пристрій, що дозволяє регулювати зазор між нею і валком. Машина призначена для приготування дрібного щебеню з підвищеним вмістом зерен кубоподібної форми.

У схемі *в* дві камери дроблення, поверхня робочих органів гладка. У порівнянні з дробаркою, виконаної за схемою *б*, вузол кріплення валка не має принципових відмінностей, а наявність двох камер дроблення, приблизно в 2 рази збільшує продуктивність машини. За схемою *в* виконана дробарка «Ротекс». Дробарка «Ротекс» забезпечена подвійним запобіжним пристроєм: приводний шків пов'язаний з ексцентриковим валом за допомогою фрикційної муфти, що обмежує момент, а між щокою і корпусом дробарки розташовані попередньо напружені спіральні пружини, стискають при попаданні недробимих предметів.

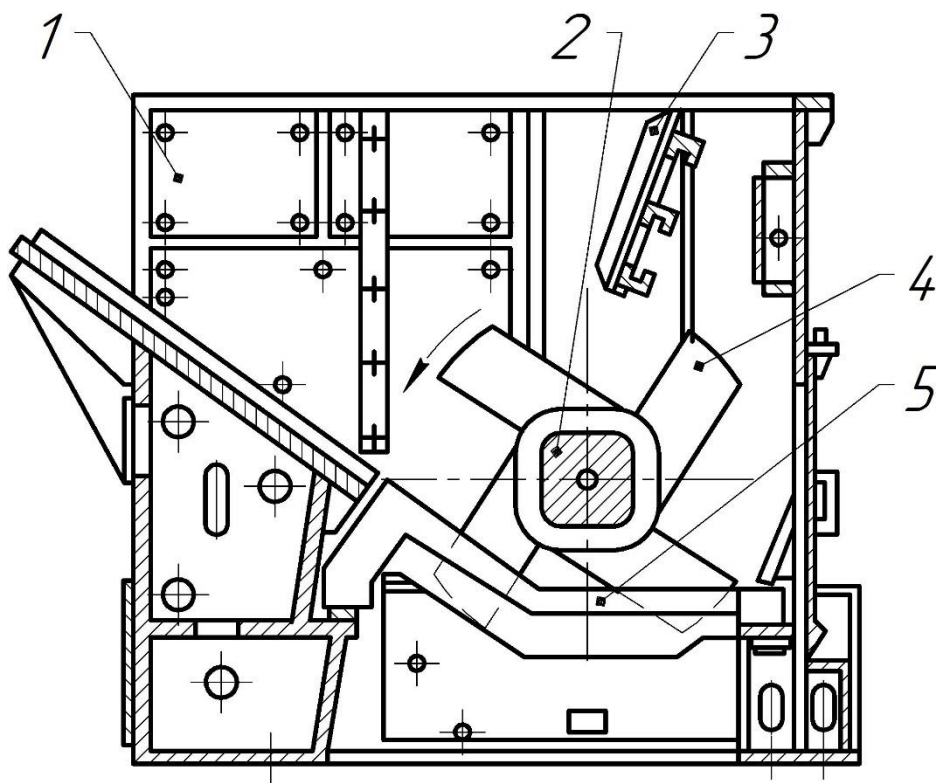
Схема *г* застосована в валково-щоківій дробарці, вперше запропонованої фірмою Даймонд. На загальній рамі змонтовані рухлива і нерухома щоки, а також валок. Рухома щока має складний рух. Привід валка пов'язаний ланцюговою передачею з ексцентриковим валом рухомий щоки. Матеріал надходить в камеру дроблення, утворену нерухомою і рухомою щоками, роздроблений матеріал надходить на другу стадію дроблення – між обертовим валком і нижньою частиною тієї ж рухомий щоки. У цю ж камеру дроблення може додатково подаватися невеликий матеріал. Використання такої дробарки на 30 - 40% знижує вагу всієї установки. Експлуатація показала, що дані дробарки мають низьку надійність і тому випуск їх обмежений.

Для дроблення агломерату на агломераційних фабриках, в ряді випадків, довго зубчасті валки встановлюють безпосередньо над решітками, по яким рухаються пласти агломерату, причому зуби валка проходять в зазори між колосниками (рис.1.8).

Одновалкові довго зубчасті дробарки типу СМД-1, СМД-2А і СМД-3Б призначені для дроблення агломерату температурою 600-850°C і тому для

відводу теплоти, що надходить до цапф вала, при безпосередньому контакті ротора з гарячим агломератом, вал виконують порожнистим, і в ньому передбачена циркуляція води для охолодження.

Станина являє собою зварену конструкцію з листового прокату, в нижній її частині розташовані змінні колосники, а бічні стінки облицьовані зносостійкими плитами. Вал ротора встановлений на підшипниках кочення. На валу насаджені зірочки і дистанційні втулки. При роботі дробарки ротор захоплює зірочками надходить в дробарку «пиріг» агломерату, дробить його на шматки і продавлює в зазори колосникових решіток.



1 – корпус; 2 – вал; 3 – відбійна плита; 4 – зубчастий вінець; 5 – колосник;

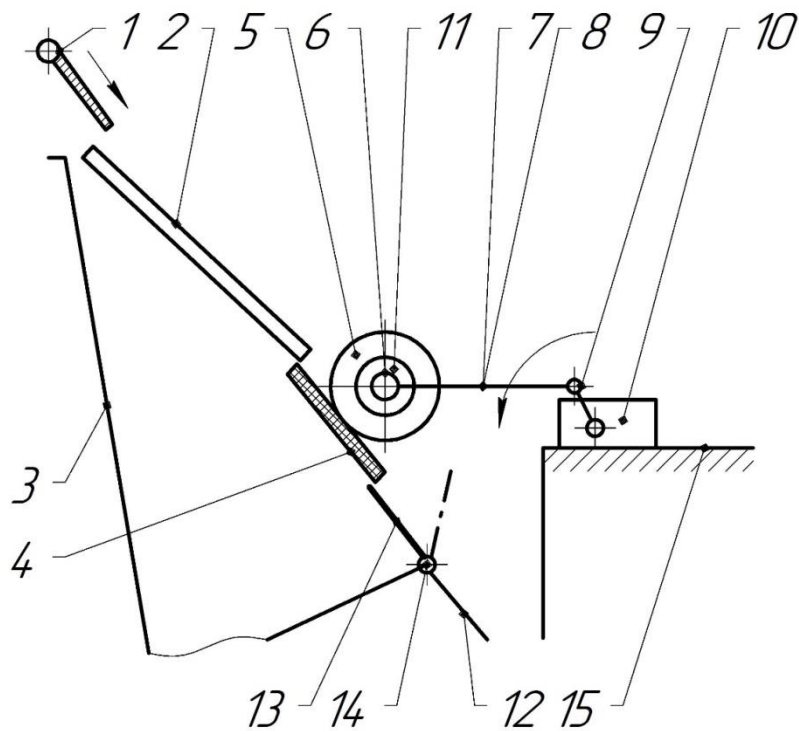
Рисунок 1.8 – Одновалкова зубчаста дробарка

До одновалкової дробарки можна віднести пристрій для подрібнення, представлений на рисунку (рис.1.9) [14].

Пристрій для подрібнення складається з завантажувального пристосування 1 з можливістю подачі матеріалу на похилу колосникові грати 2

з шириною щілин між колосниками, відповідної допустимому максимальному розміру матеріалу в його товарній масі. Під решітками 2 розміщена приймальня воронка 3 для матеріалу. За нижньою кромкою колосникових решіток 2 східчасто по відношенню до неї розміщена похила плита 4 з можливістю перекочування по ній уважченого катка 5 циліндричної форми. Ось 6 катка 5 за допомогою двох тяги 7 і 8 кінематично пов'язана з кривошипно-шатунним механізмом 9, забезпеченим приводом 10. На осі 6 катка 5 з двох сторін встановлені обгінні муфти 11 з можливістю забезпечення обертання катка 5 в напрямку колосникових решіток 2 і гальмування катка 5 при його реверсі. Під нижньою кромкою плити 4 на стику приймальні воронки 3 і воронки 12 для подрібнених матеріалів встановлений шибер 13 з можливістю його повороту щодо горизонтальній осі 14 і фіксації. Пристрій діє таким чином. Спочатку включають привід 10 кривошипно-шатунного механізму 9, завдяки чому тягам 7 і 8 повідомляється зворотно-поступальний рух. Від тяг 7 і 8 зворотно-поступальний рух отримує вісь 6 і пов'язаний з нею каток 5, який починає перекочуватися по поверхні плити 4 в напрямку колосникових решіток 2 і ковзати по поверхні плити при зворотному русі тяг 7 і 8. Після цього попередньо матеріал по завантажувальному пристосуванню 1 подається на похилі колосникові грати 2, на яких відбувається відділення товарної частини. Частки розміром більше ширини щілини між колосниками скочуються вниз до катка 5. Коток 5, накочуючись на ці частинки, руйнує їх до тонкозернистої структури, а при зворотному русі подрібнена маса ковзанням вниз періодично скидається з плити 4.

До одновалкової дробарки також відносяться і машини для виправлення форми зерен матеріалу, представлені двома конструкціями. Одна з цих конструкцій наведена на рис.1.10 [15].



- 1 – завантажувальне пристосування; 2 – решітка; 3 – воронка;  
 4 – похила плита; 5 – каток; 6 – ось; 7,8 – тяги;  
 9 – кривошипно-шатунний механізм; 10 – привод;  
 11 – муфта обгінна; 12 – воронка; 13 – шибер;  
 14 – горизонтальна ось; 15 – корпус

Рисунок 1.9 – Пристрій для подрібнення огрудкованих частинок цементу

Машина для виправлення форми зерен матеріалу призначена для виробництва нерудних матеріалів. Складається з похилих до горизонту жолобів 2 і 3 з перегином 7 в їх середній частині. Ділянка перегину виконаний у вигляді змінної масивної плити 4 із зносостійкого матеріалу. У напрямних 5 і 6 встановлені підпружинені пружинами 7, 8 до них повзуни 9 і 10; з розміщенням в них підшипників вала 11 з закріпленням на ньому валком 12. Валок 12 встановлений з виключенням можливості прямого взаємодії з нижнім 2 і верхнім 3 жолобами, виконаними в зоні їх змикання у вигляді плити 4, для чого направляють 5 і 6 забезпечені упорами 13. На верхньому жолобі 3 встановлена кришка 15 з можливістю пропуску під нею по жолобу 3 зерен матеріалу

максимального розміру. Вал 11 валка 12 кінематично, через ремінну передачу 17, пов'язаний з приводним двигуном, 18 – місце подачі матеріалу, 19 – місце розвантаження продукту. Машина для виправлення форми зерен матеріалу діє таким чином – зерна лещатної форми 14 подаються на верхній жолоб 3, на якому в процесі руху по ньому орієнтуються в поздовжньому напрямку завдяки хвилястому поперечним профілем цього жолоба. У зоні перегину жолобів 2 і 3, потрапляючи на плиту 4, зерна матеріалу захоплюються обертовим, від приводу 17, валком 12. Валок 12 постійно підпружиненим пружинами 7 і 8, тому з розрахунковим зусиллям, регульованим гвинтовими упорами 16, притискає до плити 4 захоплені їм зерна матеріалу 14, які під дією створюваного валком 12 згинального моменту ламаються на плиті 4, приблизно, в середній своїй частині. Виправлені за формою зерна матеріалу тим же валком 12 виштовхуються на нижній жолоб 2 і самопливом розвантажуються в приймальний пристрій.

Зерна матеріалу не роздавлюються в машині, а ламаються, тобто, матеріал піддається деформації вигину, а оскільки межа міцності рудних матеріалів на вигин значно нижче межі міцності на стиск, виправлення форми зерен відбувається при меншому робочому зусиллі, а значить і менших витратах енергії. Упори 13 повинні бути встановлені так, щоб в нижньому положенні валка 12 зазор між ним і плитою 4 становив менше мінімального розміру зерен оброблюваного матеріалу 14. За такої умови матеріал повинен почати дробитися, не доходячи до перегину, а в момент, коли шматок торкнеться плити 4 і обертового валка 12 і станеться захоплення. Тоді висновок, що шматки матеріалу ламаються в місці перегину, викликає незадоволеність, так як шматки матеріалу будуть підходити до місця перегину роздробленими. Отже, твердження про те, що шматки матеріалу піддаються деформації вигину необґрунтовано і вимагає проведення аналізу процесу руйнування.



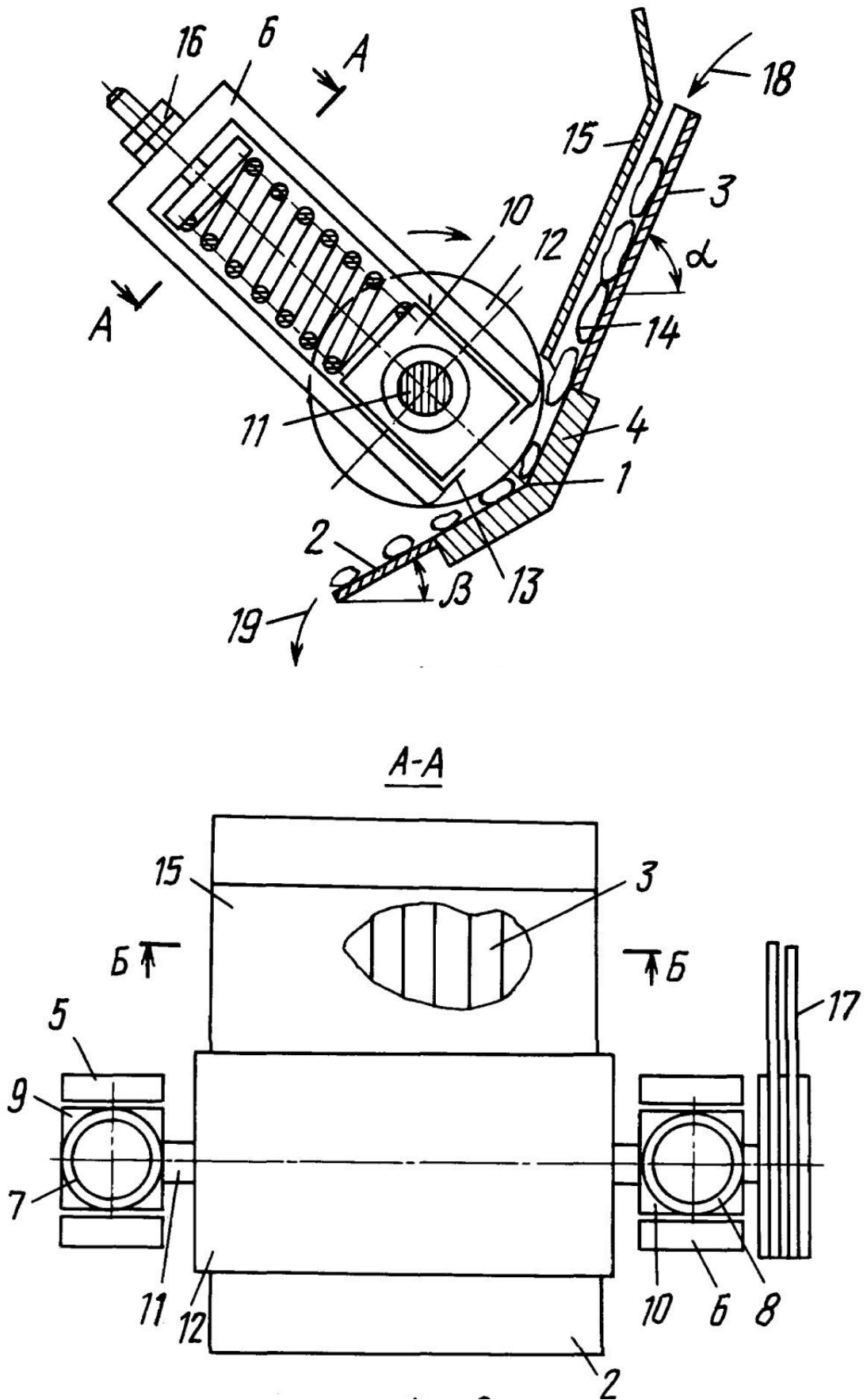
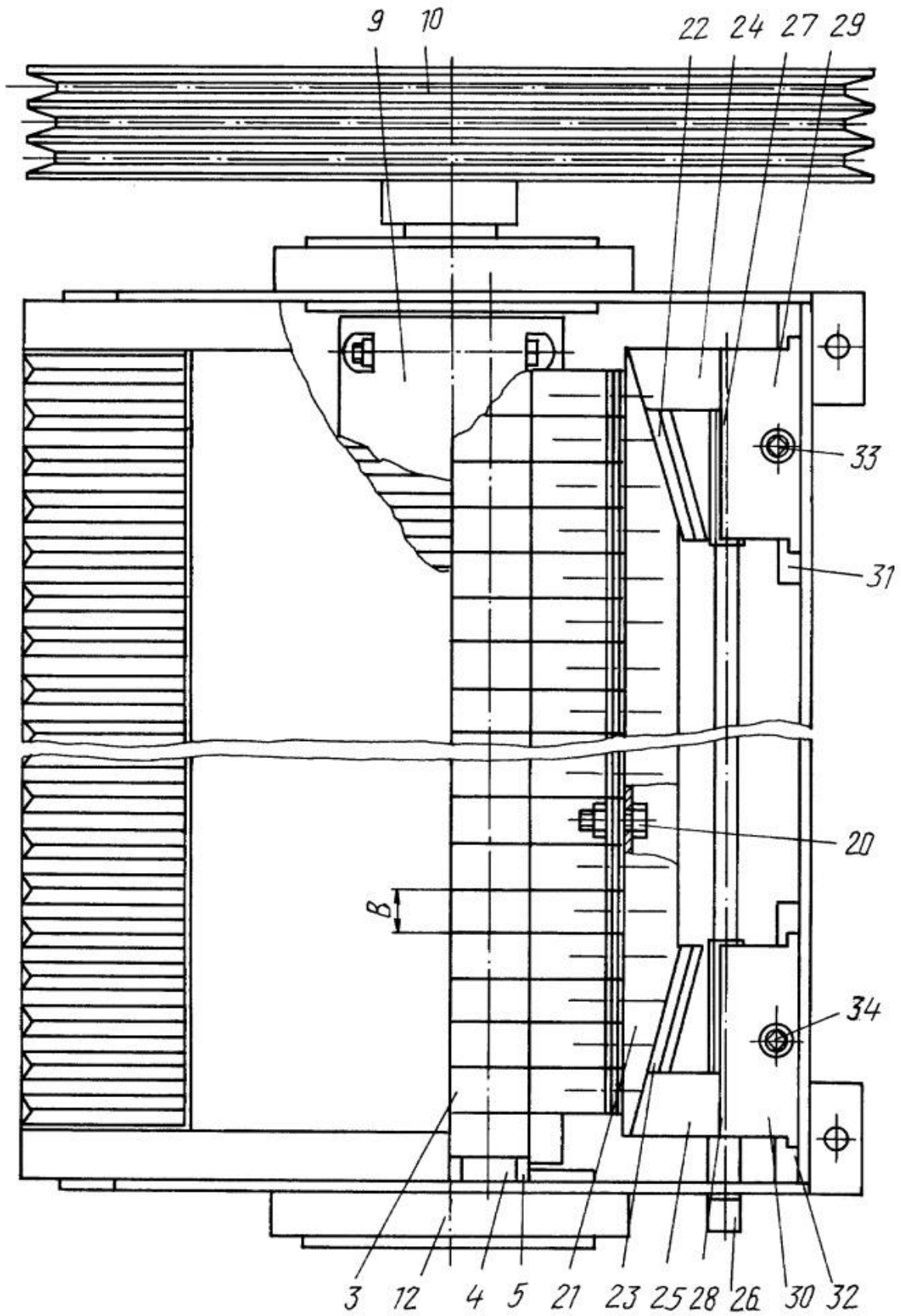


Рисунок 1.10 – Машина для виправлення форми зерен матеріалу

Конструкція машини для виправлення форми зерен матеріалу представлена на рисунку (рис.1.11) [16].

Машина складається з комплекту щік 1 ламаного профілю з утворенням в місці перегину тупого кута, виконаних із зносостійкого матеріалу і прикріплених за допомогою болтів 2 до маятникам 3, шарнірно встановленими на осі 4, закріпленої в провушинах 5 корпусу 6. Завантажувальне пристосування виконано у вигляді жолоба 7 з хвилястим поперечним профілем з кроком, рівним ширині щік, причому жолоб 7 забезпечений кришкою 8 з можливістю пропуску під нею зерен матеріалу максимального розміру. Валок 9 за допомогою клинопасової передачі 10 кінематично пов'язаний з приводним двигуном і спирається на підшипники, розташовані в корпусах підшипників 12 корпусу 6 машини. Для виключення прямого взаємодії щік 1 з валком 9 маятники 3 забезпечені упорами 17 з можливістю їх взаємодії з обмежувачами 18, закріпленими на корпусі 6. Зусилля притиснення щік 1 до зерен матеріалу регулюється плоскими пружинами 19, закріпленими болтами 20 на загальній горизонтальній балці 21 з дзеркально скошеними на кінцях крайками. Краї забезпечені направляючими 22, 23, контактують з клиновими повзунами 24 і 25, кожен з яких забезпечений однією матковою гайкою з можливістю її взаємодії з одним загальним для обох плазунів горизонтальним гвинтом 26. Клинові повзуни 24, 25 встановлені з можливістю переміщення в напрямних 27, 28 повзунів 29, 30, розміщених в напрямних 31, 32 корпусу 6. Кожен з повзунів 29, 30 забезпечений однією матковою гайкою з можливістю її взаємодії з вертикальним гвинтом 33, 34 відповідно.



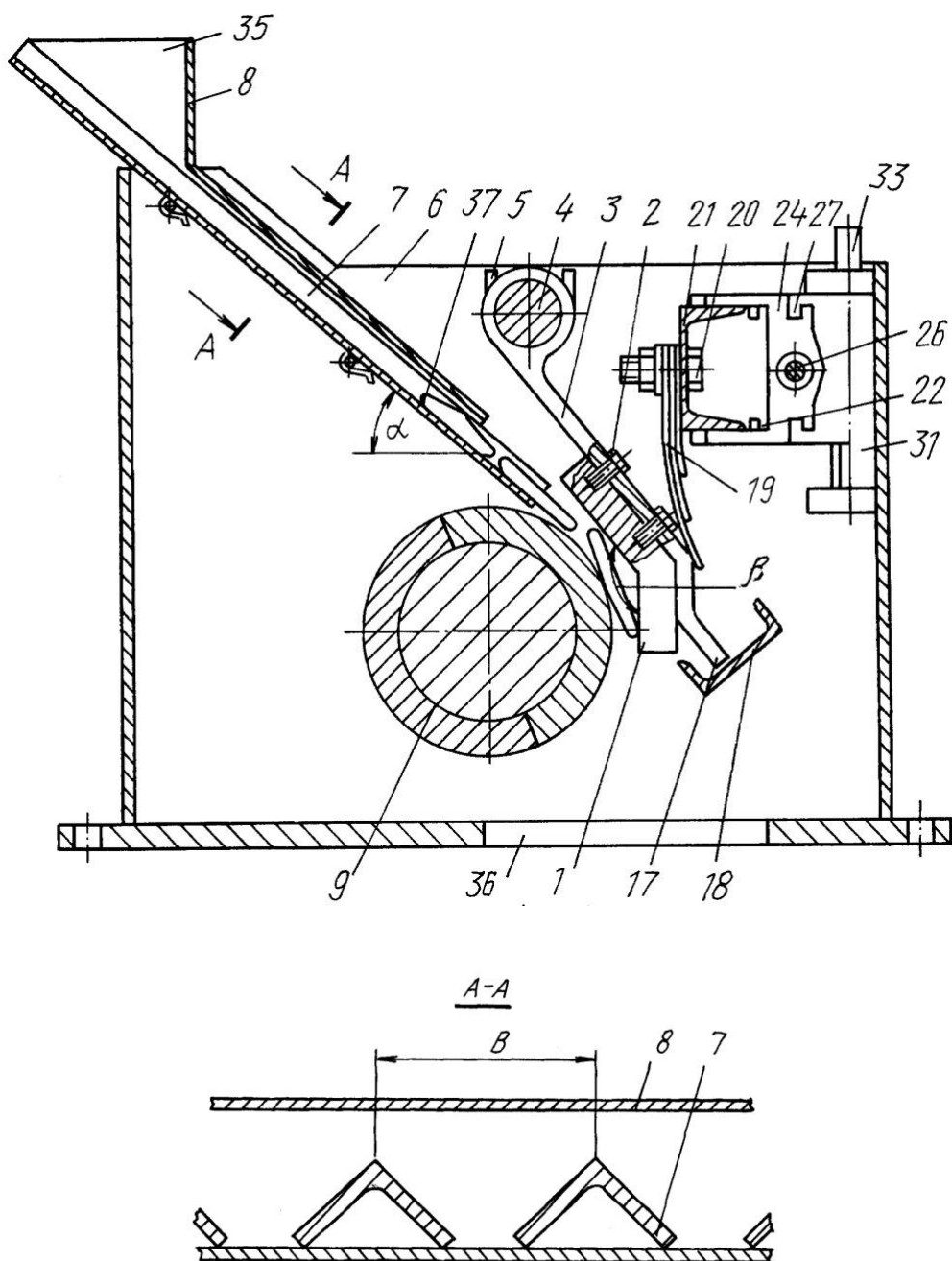


Рисунок 1.11 – Машина для виправлення форми зерен матеріалу

Машина для виправлення форми зерен матеріалу діє таким чином. Зерна лещадної форми 37 подаються в пункт завантаження 35 на завантажувальний жолоб 7. З завантажувального жолоба 7 зерна матеріалу 37 захоплюються обертовим валком 9 і подаються в зону перегину щік 1. Щіки 1 постійно підпружинені пружинами 19, тому з розрахунковим зусиллям, регульованим гвинтовими упорами 26, 33, 34 притискають до валку 9 захоплені їм зерна

матеріалу 37. Під дією створюваного валком 9 згинального моменту зерна матеріалу 37 ламаються між валком і щоками приблизно в середній своїй частині. Виправлені за формою зерна матеріалу тим же валком 9 виштовхуються і розвантажуються через розвантажувальний пристрій 36 в приймальний пристрій. Зерна матеріалу не роздавлюються в машині, а ламаються, тобто, щебінь піддається деформації вигину. Це твердження, як і в разі попередньої конструкції, вимагає проведення аналізу процесу руйнування і докази наявності деформації вигину.

Установча потужність електродвигуна валкової дробарки визначається з урахуванням потужності, витраченої на подолання всіх сил опорів при роботі машини [7]:

$$N_{\text{об}} = \frac{N_1 + N_2}{\eta}, \quad (1.3)$$

де  $N_1$  - потужність, необхідна для дроблення матеріалу;

$N_2$  - потужність, яка витрачається на тертя в підшипниках;

$\eta$  - ККД передачі.

#### 1.4 Конструкції запобіжних пристроїв валкових дробарок

При експлуатації валкових дробарок досить звичайне явище - це потрапляння разом з подрібнювальним матеріалом недробимого предмета, що в ряді випадків призводить до аварійних поломок вузлів дробарки.

Існують запобіжні пристрої, при роботі яких основні кінематичні ланки не будуть руйнуватися при перевищенні навантажень. Такі пристрої можуть бути пружинними, фрикційними та гідравлічними.

Конструкція запобіжного пристрою, яка представлена, застосовується в валково-щоківій дробарці (рис.1.2б). Верхня частина щоки підвішена на осі з'єднаної з бічними стінками корпусу, при цьому нижня частина щоки

спирається на розпірну плиту, що складається з двох частин, які з'єднані між собою болтами. Болти служать запобіжниками і зрізуються при попаданні в камеру дроблення недробимих предметів. Недоліком даної конструкції є низька продуктивність дробарки, так як при попаданні в камеру дроблення недробимих предметів запобіжні болти зрізуються, і процес дроблення зупиняється до відновлення працездатного стану дробарки [7].

Пружинні запобіжні конструкції використовуються досить часто. Перевагою цих пристроїв є простота і можливість порівняно легко вбудовувати їх в існуючі моделі без значних змін їх конструкцій.

Відома конструкція пружинного запобіжного пристрою, що застосовується в валково-шоковій дробарці (рис.1.2а). Верхня частина щоки підвішена на осі, з'єднаної з бічними стінками корпусу, при цьому нижня частина щоки притягнута пружиною до упору. При попаданні в камеру дроблення недробимого матеріалу пружина розтягується, зазор між валком і нерухомою щокою збільшується і недробимий матеріал видаляється з зони дроблення [7].

Поширена ще одна конструкція пружинного запобіжного пристрою. Корпус підшипника вала обертається валка спирається на пружину і може переміщатися. В результаті цього, при попаданні недробимого предмета валок може переміститися і пропустити недробимий предмет, після чого під дією пружини валок повертається у вихідне положення [17].

Наведені вище конструкції пружинних запобіжних пристроїв захищають дробарку від перевантажень, але мають істотний недолік, так як недробимий предмет потрапляє в готовий продукт, то якість готового продукту погіршується.

## 2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ В ДРОБАРКАХ ПЕРЕВАЖНОЇ СТАТИЧНОЇ ДІЇ

### 2.1 Силовий аналіз процесу дроблення в одновалковій дробарці.

#### Умови захоплення

Дроблення шматка крихкого матеріалу неправильної форми - складний процес, оскільки при руйнуванні виникає кілька точок дотику з поверхнею дробильних елементів, через які передається руйнівний вплив на шматок крихкого матеріалу. Вирішення завдання про енерговитрати при руйнуванні окремого шматка правильної форми спрощується [18]. Оскільки форма подрібнювального матеріалу не впливає на величину і напрямки сил, то для наочності перетин шматка прийнято квадратним (рис.2.1).

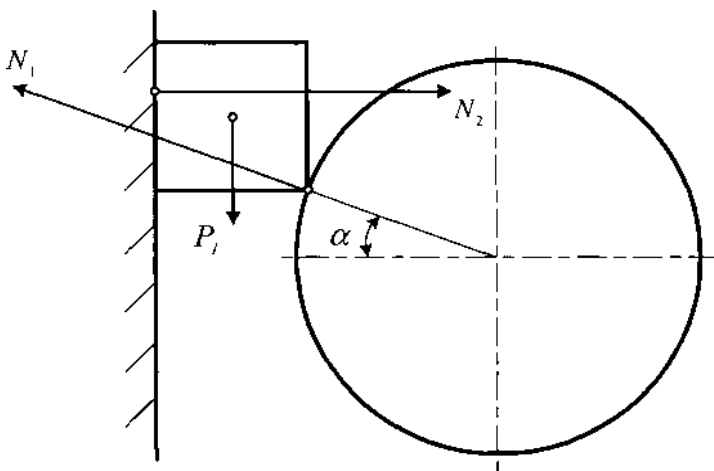


Рисунок 2.1 – Подрібнювальний шматок в одновалковій дробарці

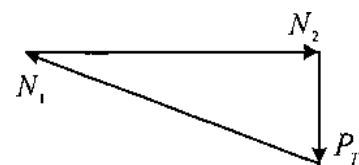


Рисунок 2.2 – План сил, що діють на шматок крихкого матеріалу

При зіткненні подрібнюванню шматка з дробильними елементами під дією сили тяжіння шматка  $P_1$ , на шматок з боку валка і з боку щоби будуть діяти сили нормального тиску  $N_1$  і  $N_2$ . Сила нормального тиску  $N_1$ , спрямована

по радіусу валка в точці дотику від валка, а сила нормального тиску  $N_2$  спрямована по горизонталі від нерухомої щоби.

Під дією системи сил (рис.2.2) шматок, що дробиться, знаходиться в рівноважному стані.

При обертанні валка в місці торкання валка і шматка виникає сила тертя, що діє на валок і спрямована по дотичній в зворотний бік обертання валка, перешкоджаючи його руху.

Відповідно, на подрібнювальний шматок буде діяти реактивна сила тертя  $F_1$ , яка дорівнює за величиною силі тертя діючої на валок і спрямована по дотичній в протилежну сторону (рис.2.3)

$$F_1 = N_1 \cdot f_1 \quad (2.1)$$

де  $f_1 = \operatorname{tg} \beta_1$  - коефіцієнт тертя між шматком і валком;

$\beta_1$  - кут тертя між подрібнювальним матеріалом і валком.

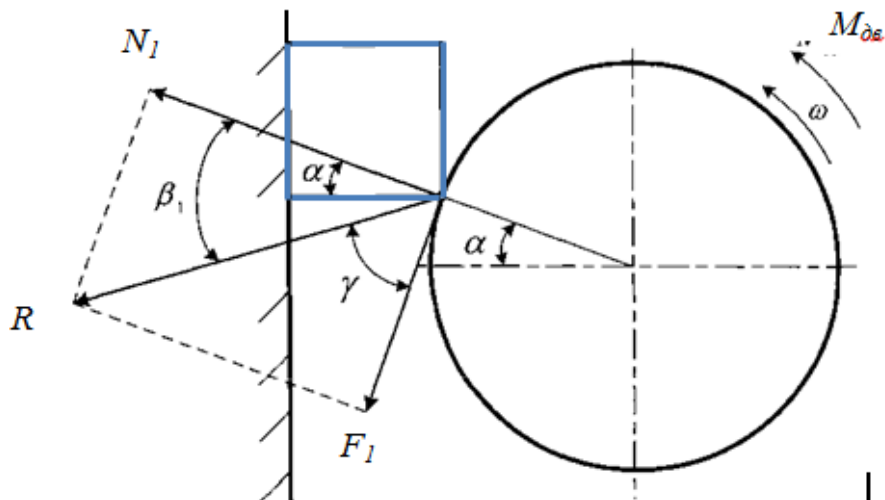


Рисунок 2.3 – Схема сил, що діють на шматок подрібнювального матеріалу з боку валка



Сила нормального тиску, що виникає при роботі двигуна, багаторазово перевищує, силу нормального тиску, що виникає під дією сили тяжіння  $P_1$ , тому сила тяжіння  $P_1$  в подальшому не враховується через її незначність у порівнянні з силами, що виникають в процесі дроблення матеріалу.

Для забезпечення захоплення шматків матеріалу в щілину між валком і нерухомою щогою необхідно, щоб проекція на вертикальну вісь рівнодіючої сили  $R$  була спрямована вниз, що виконується в тому випадку, якщо рівнодіюча сила  $R$  відхилена вниз від горизонталі.

Оскільки кут між силою нормального тиску  $N_1$ , і рівнодіючою силою  $R$  є кут тертя між шматком і валком  $\beta_1$ , то зтягування шматка в зазор між валком і щогою відбудеться, як видно з рисунка 2.3, при виконанні наступної умови

$$\beta_1 > \alpha, \quad (2.2)$$

де  $\alpha$  - кут захвату.

Кут тертя  $\beta_1$  між шматком подрібнювального матеріалу і валком має бути більше, ніж кут захоплення  $\alpha$ , в цьому випадку рівнодіюча сил тертя і нормального тиску  $R$  буде відхилена вниз від горизонталі під кутом  $\varphi$  (Рисунок 2.4).

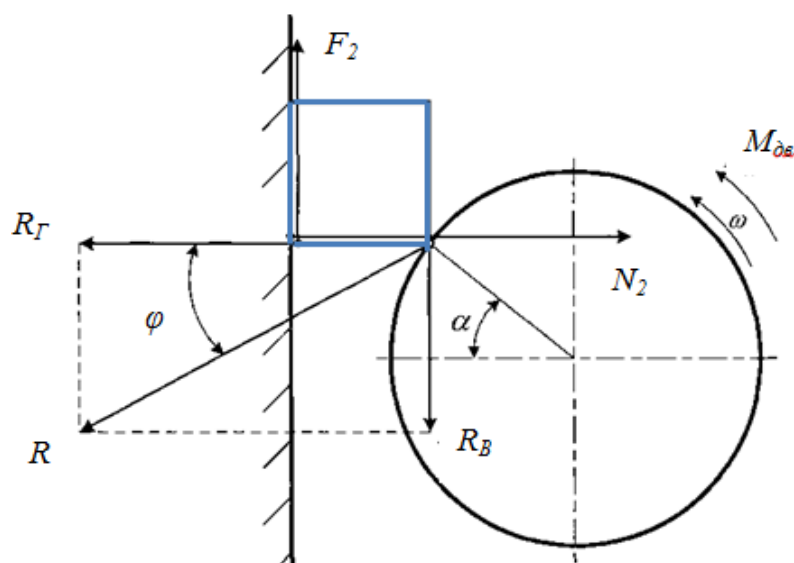


Рисунок 2.4 – Схема сил, що діють на шматок дробленого матеріалу

Кут  $\varphi$  визначається наступним чином:

$$\varphi = \beta_1 - \alpha \quad \text{чи} \quad \varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma, \quad (2.3)$$

де  $\gamma = \arctg \frac{N_1}{F_1} = \arctg \frac{N_1}{N_1 f_1} = \arctg \frac{1}{f_1}$  - кут між напрямком дії рівнодіючої сили  $R$  і силою тертя  $F_1$ .

Під дією горизонтальної складової рівнодіючої  $R_r = R \cdot \cos \varphi$  сили  $R$  виникає нормальна сила  $N_2$ , спрямована по горизонталі від нерухомої щоки, і, відповідно, сила тертя  $F_2 = f_2 \cdot R_r = f_2 \cdot R \cdot \cos \varphi$ , спрямована вертикально вгору і перешкоджає руху шматка подрібнювального матеріалу в щілину між валком і нерухомою щокою. Таким чином, для забезпечення захоплення шматка подрібнювального матеріалу, необхідно, щоб вертикальна складова  $R_B = R \cdot \sin \varphi$  рівнодіючої сили  $R$  була більше сили тертя  $F_2$ , отже, виконувалася умова

$$R_B > F_2, \quad (2.4)$$

тоді

$$R \cdot \sin \varphi > f_2 \cdot R \cdot \cos \varphi, \quad (2.5)$$

або після перетворення

$$\operatorname{tg} \varphi > f_2 = \operatorname{tg} \beta_2, \quad \varphi > \beta_2 \quad (2.6)$$

де  $\beta_2$  - кут тертя між подрібнювальним матеріалом і нерухомою щокою.

Якщо в вираз (2.6) підставити рівність (2.3), то одержимо співвідношення

$$\frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma > \beta_2 \quad \text{або} \quad \beta_1 - \alpha > \beta_2. \quad (2.7)$$

З аналізу рівняння випливає, що чим менше кут тертя між шматком подрібнювального матеріалу і нерухомою щогою  $\beta_2$  і більше кут тертя між шматком подрібнювального матеріалу і валком  $\beta_1$ , тим більший, при інших рівних умовах, можна задавати кут захоплення  $\alpha$ . Тоді для збільшення ступеня подрібнення в одновалковій дробарці необхідно збільшувати коефіцієнт тертя між шматком подрібнювального матеріалу і валком і зменшувати його між шматком подрібнювального матеріалу і щогою [19].

Захоплення подрібнювального шматка в зазор між валком і нерухомою щогою залежить від коефіцієнтів тертя між шматком і тілами подрібнення, а тому, процес дроблення в одновалковій дробарці забезпечується наявністю сил тертя [20].

На шматок подрібнювального матеріалу в вертикальній площині діють дві паралельні сили: сила тертя  $F_2$  і вертикальна складова  $R_B$  рівнодіючої сили, нерівні за величиною і спрямовані в протилежні боки (рис.2.5), тоді за правилом додавання двох не рівних за величиною паралельних сил, спрямованих в протилежні боки, їх рівнодіюча їм паралельна, спрямована в бік більшої сили і дорівнює за величиною їх різниці, а її лінія дії лежить за більшою силою [21].

В даному випадку, на шматок подрібнювального матеріалу діє сила  $T = R_B - F_2$ . Для визначення закону руху тіла під дією сили  $T$  необхідно в центрі ваги перерізу цього тіла прикласти дві рівні за величиною між собою і рівнодіючої силі  $T$  - сили  $T'$  і  $T''$ , спрямовані в протилежні сторони, при цьому рівновага тіла не зміниться. Тоді сила  $T''$  буде прагнути затягнути шматок подрібнювального матеріалу в щілину між валком і нерухомою щогою, а пара сил  $T$  і  $T''$  створюють момент, під дією якого шматок кубічної форми повертається і його заклинює по ребру. Таким чином, нерухома щока не дає повернутися подрібнювальному шматку, а по лінії контакту шматка і нерухомої

щоки виникає реактивна сила і, відповідно, момент  $M$ , який врівноважує шматок і не дає йому повернутися. Під дією зовнішнього моменту в подрібнювальному шматку виникає внутрішній крутний момент, що викликає дію дотичних напружень.

Якщо в подрібнювальному шматку виділити елементарний перетин  $d_x$  (рис.2.6), то видно, що на шматок подрібнювального матеріалу діють як стискаючі сили (горизонтальна складова рівнодіючої сили  $R$  і нормальна сила  $N_2$ ), що викликають в шматку дію нормальних стискаючих напружень, так і крутний момент, що викликає дію дотичних напружень. Отже, в подрібнювальному шматку створюється складний напружений стан з одночасною дією нормальних і дотичних напружень [22, 23]. Оскільки в дробарці руйнується крихкий матеріал, то для визначення еквівалентної напруги слід використовувати першу гіпотезу граничних станів [24].

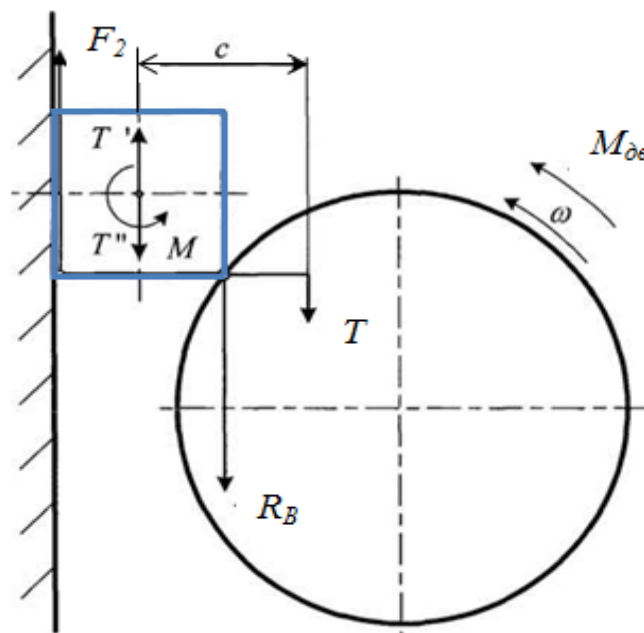


Рисунок 2.5 – Схема сил, що діють на шматок подрібнювального матеріалу у вертикальній площині

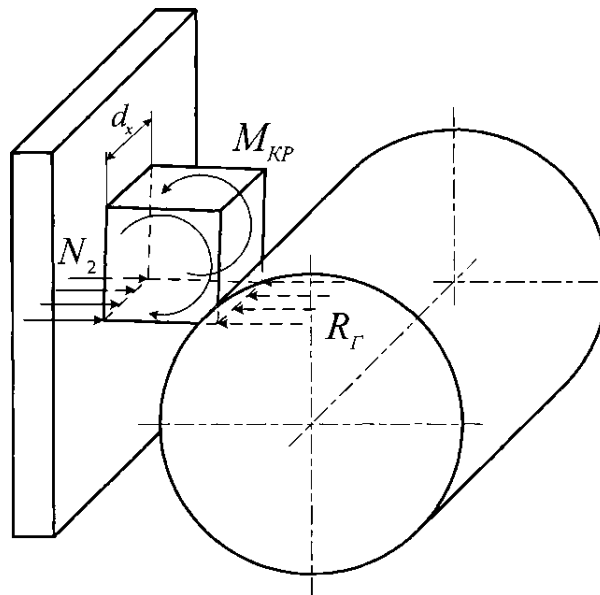


Рисунок 2.6 – Силкові чинники, які діють на подрібнювальний шматок в одновалковій дробарці

При складному напруженому стані в подрібнювальному шматку матеріалу виникають напруження, які досягають граничного значення при меншій силі дроблення, ніж при лінійному напруженому стані, що виникає, коли дроблення матеріалу проводиться в двовалковій дробарці з гладкими валками [25]. Таким чином, при однаковому ступені подрібнення використання одновалкової дробарки більш ефективніше, ніж двовалкової.

## 2.2 Визначення напружень, що виникають в руйнованому шматку при дробленні в одновалкової дробарці. Математична модель процесу руйнування

Шматок подрібнювального матеріалу кубічної форми піддається одночасній дії крутних і стискаючих навантажень. Для аналізу напруженого стану обрана довільна точка, взята на шматку подрібнювального матеріалу. Головні напруження в даній точці подрібнювального шматка виражаються

через напруження на майданчику його поперечного перерізу, що проходить через цю точку.

Від крутіння в поперечному перерізі подрібнювального шматка виникають дотичні напруження, а від стиснення – нормальні напруження. Вибір напрямку осей координат показано на рисунку (рис.2.7). Внаслідок такого вибору осей координат компоненти напружень в даній точці запишуться

$\sigma_z = \sigma$  - нормальні напруження, що виникають від сили стискання;

$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau$  - дотичні напруження, що виникають від крутіння;

$\sigma_x = \sigma_y = \tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$ .

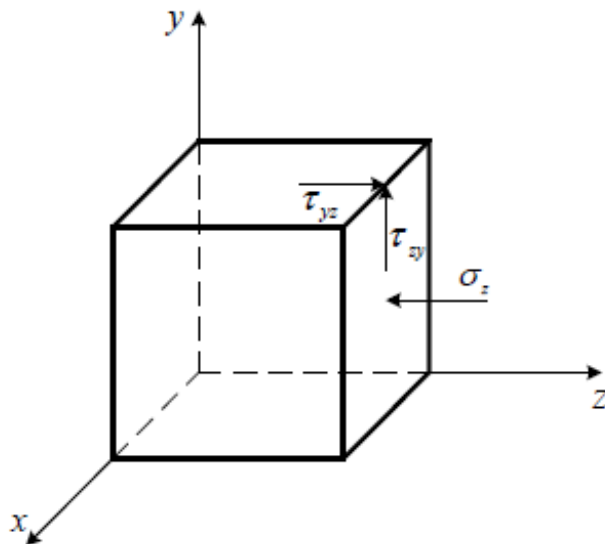


Рисунок 2.7 – Напруження, що діють на точку, розташовану на подрібнювальному шматку

Таким чином, в даній точці має місце частинний випадок плоского напруженого стану.

З положень теорії опору матеріалів відомо [24]

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_1 & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_1 & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_1 \end{vmatrix} = 0, \quad (2.8)$$

Після визначення головних напружень по заданим компонентам

$$\begin{vmatrix} -\sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_1 & \tau_{zy} \\ 0 & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (2.9)$$

Рішення отриманої матриці буде виглядати наступним чином

$$\sigma_1 \cdot \left( (-\sigma_z - \sigma_1) \cdot (-\sigma_1) - \tau_{zx}^2 \right) = 0. \quad (2.10)$$

Прирівнюючи нулю кожен із співмножників:

$$\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma - \tau^2 = 0, \quad (2.11)$$

$$\sigma_1 = 0. \quad (2.12)$$

Рішення отриманого квадратного рівняння (2.11) набуде вигляду

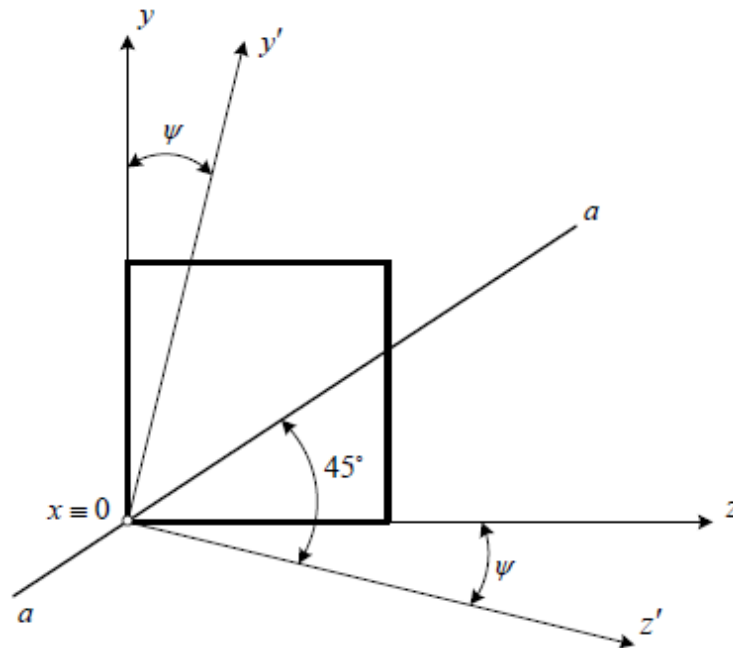
$$\sigma_1 = -\frac{\sigma}{2} \pm \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2}. \quad (2.13)$$

Другий доданок у виразі для  $\sigma_1$  завжди більше першого, отже, в подрібнювальному кубіку, на відміну від загального випадку плоского напруженого стану, відразу можна головним напруженням приписати індекси, при цьому треба врахувати, що  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

Тоді

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} - \frac{\sigma}{2}, \\ \sigma_2 &= 0, \\ \sigma_3 &= -\frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} - \frac{\sigma}{2}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Рішення  $\sigma_2$  приводить до вже відомого головного майданчику, перпендикулярного осі  $x$ . На цьому майданчику, як видно на рисунку (рис.2.7)  $\tau_{xz} = \tau_{xy} = \sigma_z = 0$ . Інші два рішення визначають напруги на двох інших головних майданчиках, паралельних осі  $x$ .



$z', y'$  - нормалі до головних майданчиків

Рисунок 2.8 – Положення нормалей до головних майданчиків

Кут, на який потрібно повернути вісь  $z$ , щоб вона збіглася з напрямом нормалі до головному майданчику з напруженням  $\sigma_1$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_z}{\tau_{zy}}, \quad (2.15)$$

Для першої головного майданчика формула (2.15) набуде вигляду

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sigma_1 + \sigma}{\tau}. \quad (2.16)$$



Руйнування подрібнювального шматка визначається дотичними напруженнями, максимальна величина яких досягається в майданчиках, орієнтованих під кутом  $45^\circ$  до головних майданчиків. На рисунку 2.8 видно, що максимальні дотичні напруження діють по лінії  $a-a$ .

Максимальне дотичне напруження в подрібнювальному шматку дорівнюватиме

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2}. \quad (2.17)$$

Таким чином, руйнування шматка кубічної форми буде проходити по площині, як показано на рисунку 2.9.

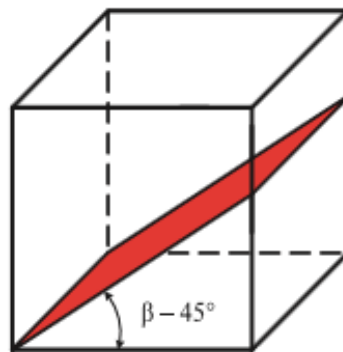


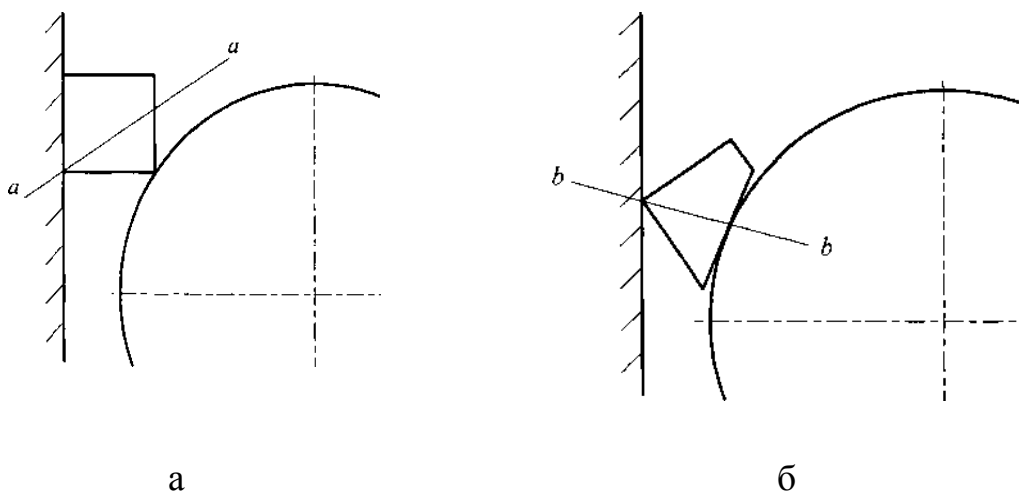
Рисунок 2.9 – Площина дії максимальних дотичних напружень

Якщо змінити умови подрібнення, які впливають на значення величини крутного моменту або стискаючих сил, що діють на подрібнювальний шматок в одновалковій дробарці, то, в результаті й зміняться величини дотичних і нормальних напруг, відповідно й кут  $\psi$ , але характер руйнування при цьому не зміниться і руйнування буде проходити по площинах максимальних дотичних напружень.

## 2.3 Математична модель багатостадійного процесу руйнування дробленого шматка

При отриманні дрібної фракції процес руйнування роздрібнюванню шматка відбувається в кілька стадій. Якщо після дроблення шматка по площині максимальних дотичних напружень утворюються нові шматки, які не проходять в щілину між валком і нерухомою щогою, то утворені шматки знову дробляться до тих пір, поки не проваляться в цю щілину. В якості роздрібнювального шматка розглянемо руйнування зразка кубічної форми:

- 1) руйнування зразка відбувається по площині дії максимальних дотичних напружень  $a-a$  (рисунок 2.10а);
- 2) провалюється нижня частина зразка, яка знаходиться під площиною  $a-a'$ ;
- 3) потім відбувається переорієнтація верхньої частини зразка;
- 4) руйнування верхньої частини відбувається також по площині максимальних дотичних напружень  $b-b$  (рисунок 2.10б);
- 5) новоутворені шматки матеріалу проходять в зазор між валком і нерухомою щогою, якщо їх розмір стає менше, ніж розмір зазору.



а) - руйнування первинного шматка; б) - руйнування вторинної шматка

Рисунок 2.10 - Багатостадійний процес руйнування зразка

Положення площини максимальних дотичних напружень  $b-b$  визначається наступним чином.

На отриманий шматок діють і нормальні стискаючі сили, і крутний момент, відповідно, в шматку виникає складний напружений стан з одночасною дією нормальних і дотичних напружень (рисунок 2.11).

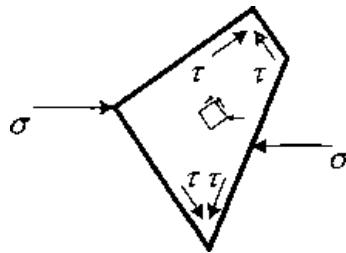


Рисунок 2.11 - Напруження, що діють на шматок, отриманий після руйнування шматка кубічної форми

Для аналізу напруженого стану обрана довільна точка, взята на шматку дробленого матеріалу, і вибрано напрямок осей координат (рисунок 2.12).

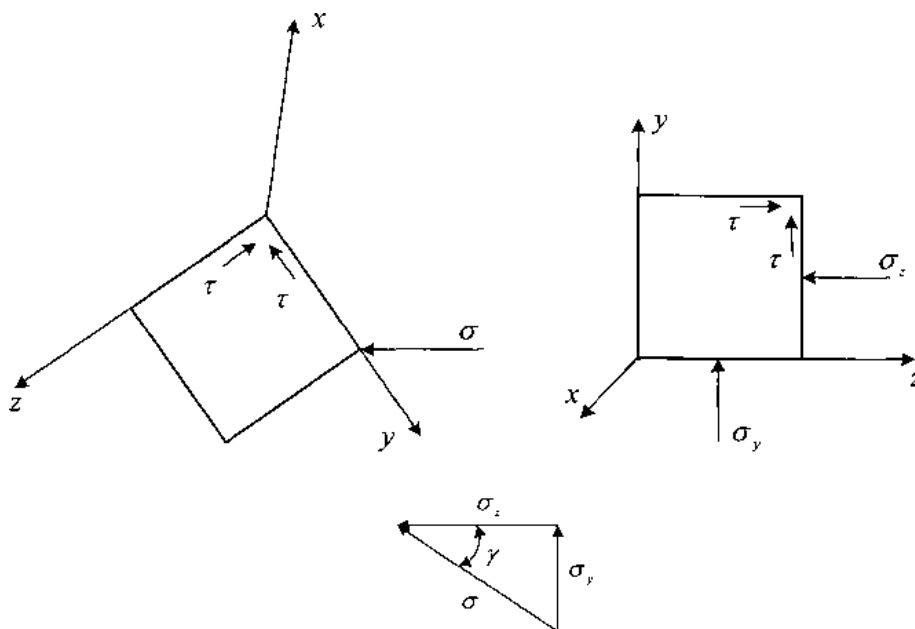


Рисунок 2.12 - Напруження, що діють на точку, розташовану на подрібнювальному шматку

Внаслідок такого вибору осей координат компоненти напружень в даній точці запишуться:

$\sigma_z = \sigma \cos \gamma$  і  $\sigma_y = \sigma \sin \gamma$  - нормальні напруження, що виникають від сили стиску;

$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau$  - дотичні напруження, що виникають від крутіння;

$$\sigma_x = \tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0.$$

Після визначення головних напружень по заданих компонентів:

$$\begin{vmatrix} -\sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y - \sigma_1 & \tau_{zy} \\ 0 & \tau_{yz} & -\sigma_z - \sigma_1 \end{vmatrix} = 0, \quad (2.18)$$

Рішення отриманої матриці буде виглядати наступним чином:

$$\sigma_1 = [(-\sigma_z - \sigma_1)(\sigma_y - \sigma_1) - \tau_{zy}^2] = 0. \quad (2.19)$$

Прирівнюючи нулю кожен із співмножників:

$$\sigma_1^2 = \sigma_1 \sigma_z - \sigma_1 \sigma_y + \sigma_z \sigma_y - \tau^2 = 0, \quad (2.20)$$

і

$$\sigma_1 = 0. \quad (2.21)$$

Після підстановки значень  $\sigma_z$  і  $\sigma_y$  в квадратне рівняння (3.20):

$$\sigma_1^2 + \sigma_1(\sigma \cos \gamma - \sigma \sin \gamma) + \sigma^2 \cos \gamma \cdot \sin \gamma - \tau^2 = 0. \quad (2.22)$$

Рішення отриманого квадратного рівняння (2.22) набуде вигляду:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma(\sin \gamma - \cos \gamma) \pm \sqrt{\sigma^2(\cos \gamma - \sin \gamma)^2 - 4(\sigma^2 \cos \gamma \cdot \sin \gamma - \tau^2)}}{2}, \quad (2.23)$$

Після перетворення:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma(\sin \gamma - \cos \gamma) \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2 - 6\sigma^2 \cos \gamma \cdot \sin \gamma}}{2}. \quad (2.24)$$

Другий доданок у виразі для  $\sigma_1$  завжди більше першого, отже, в подрібнювальному кубуку, на відміну від загального випадку плоского напруженого стану, відразу можна головним напруженням приписати індекси, при цьому треба врахувати, що  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

Тоді

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma \cdot (\sin \gamma - \cos \gamma) \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2 - 6\sigma^2 \cos \gamma \cdot \sin \gamma}}{2}, \\ \sigma_2 &= 0, \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma \cdot (\sin \gamma - \cos \gamma) - \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2 - 6\sigma^2 \cos \gamma \cdot \sin \gamma}}{2}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Рішення  $\sigma_2 = 0$  приводить до вже відомого головного майданчика, перпендикулярного осі  $x$ . На цьому майданчику  $\tau_{xz} = \tau_{xy} = \sigma_x = 0$ . Інші два рішення визначають напруження на двох інших головних майданчиках, паралельних осі  $x$ .

Кут, на який потрібно повернути вісь  $z$ , щоб вона збіглася з напрямом нормалі до головному майданчику з напругою  $\sigma_1$ :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_z}{\tau_{zy}}, \quad (2.26)$$

для першого головного майданчика формула набуде вигляду:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sigma_1 + \sigma \cos \gamma}{\tau}. \quad (2.27)$$

Руйнування роздрібнювального шматка визначається дотичними напруженнями, максимальна величина яких досягається в майданчиках, орієнтованих під кутом  $45^\circ$  до головних майданчиків (рис.2.13)

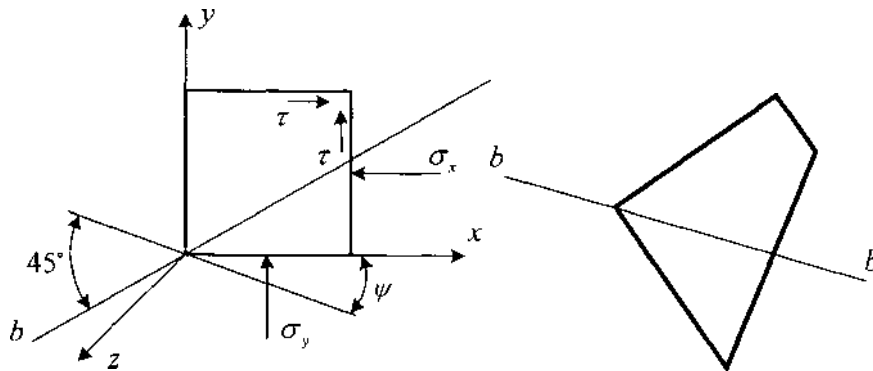


Рисунок 2.13 – Положення площини *b-b* на обраній точці в подрібнювальному шматку

## 2.4 Визначення параметрів одновалкової дробарки

Процес дроблення в одновалкової дробарці і його результати, тобто, вихід придатної продукції залежить від різних параметрів. Оскільки процес дроблення в одновалкової дробарці не вивчений, то виникає необхідність визначення параметрів, що впливають на одну з основних характеристик процесу дроблення - ступінь дроблення.

### 2.4.1 Розробка методики оцінки енергоефективності дробарок стиснення

Потужність приводу дробарок стиснення (щокрової, конусної, двовалкова) можна визначити за формулою [21]:

$$N = K \cdot \frac{\sqrt{i-1}}{\sqrt{D_{cp}}} \cdot Q \cdot \gamma, \quad (2.28)$$

де  $K$  - це коефіцієнт пропорційності між витраченою роботою і знову отриманої поверхнею;

$i$  - ступінь дроблення;

$D_{cp}$  - середній розмір роздрібнюванню шматка;

$Q$  - продуктивність дробарки;

$\gamma$  - щільність матеріалу.

З аналізу формули розрахунку потужності приводу дробарок стиснення (3.1) видно, що потужність трьох різних дробарок, в яких дробиться матеріал однакової крупності і з однаковими характеристиками, залежить від продуктивності  $Q$  і коефіцієнта пропорційності  $K$ . Коефіцієнт пропорційності для різних типів дробарок різний і визначити його практичне значення досить складно, що ускладнює визначення потужності. Тому приймається, що буде дробитися матеріал з однаковими характеристиками в дробарках (щогова, конусна, валкова) з однаковою потужністю приводу.

Одним з найважливіших показників роботи дробарки є ефективність, яка визначається масою дробленого матеріалу, що отримується при витрачанні одиниці електроенергії і за визначенням залежить, головним чином, від міцності дробленого матеріалу [54]. Однак, таке визначення справедливо тільки для однієї конкретної дробарки. Якщо порівнювати дробарки різного типу, то вище наведений критерій не є явним, так як їх ефективність необхідно порівнювати при дробленні матеріалу з однаковою міцністю. Тому в даному випадку необхідно використовувати інший критерій, наприклад, продуктивність, тобто, скільки буде потрібно часу для дроблення однакового обсягу (однакового по крупності і характеристикам) матеріалу при інших рівних умовах: однаковим ступенем дроблення, зокрема ходів робочого органу і потужності приводу.

Потужність щоквої, конусної і двовалкова дробарок буде:

$$N_K = N_{\text{щ}} = N_{\text{дв}} = K_K \cdot \frac{\sqrt{i-1}}{\sqrt{D_{\text{ср}}}} \cdot Q_K \cdot \gamma = K_{\text{щ}} \cdot \frac{\sqrt{i-1}}{\sqrt{D_{\text{ср}}}} \cdot Q_{\text{щ}} \cdot \gamma = K_{\text{дв}} \cdot \frac{\sqrt{i-1}}{\sqrt{D_{\text{ср}}}} \cdot Q_{\text{дв}} \cdot \gamma. \quad (2.29)$$

Чим більше буде продуктивність дробарки, тим менше буде коефіцієнт пропорційності, і, оскільки, потужності двигунів однакові, то очевидно, що дробарка, яка за менший час переробить заданий обсяг, витратить менше енергії. Визначення та порівняння продуктивності щоквої, конусної і двовалкової дробарок виявить, яка з дробарок стиснення буде найбільш ефективна при інших рівних умовах.

Продуктивність в загальному випадку визначається як добуток обсягу переробленої продукції за заданий число ходів робочого органу:

$$Q = \mu V n. \quad (2.30)$$

Визначимо продуктивність для щоквої, конусної і двовалкової дробарок:

- Щокві дробарка.

При виведенні формули продуктивності найчастіше приймається методика, запропонована проф. Л. Б. Левенсоном [21], по якій розвантаження матеріалу з вихідної щілини дробарки відбувається тільки при відході рухомої щоки і при цьому за один оборот валу з дробарки випадає деякий обсяг матеріалу  $V$ , укладений в призмі висотою  $h$  (рис.2.14).



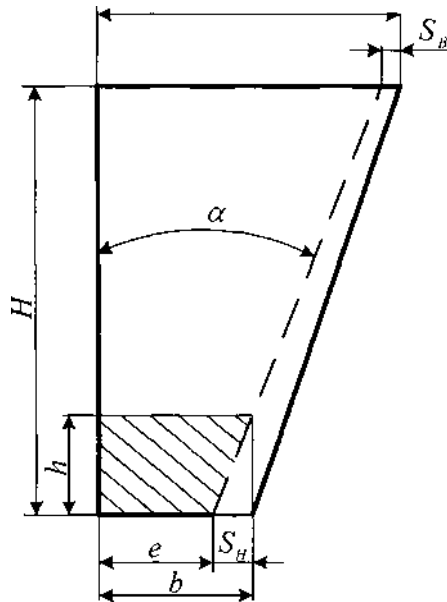


Рисунок 2.14 - Схема вивантаження шокової дробарки

Обсяг призми  $V$  визначається наступними параметрами: висотою  $h$ , верхньою основою трапеції, рівної  $e + S_H = b$ , нижньою основою трапеції, рівної  $e$  і довжиною  $L$ , що дорівнює ширині камери дроблення.

Площа трапеції:

$$F = \frac{e+b}{2} \cdot h, \quad (2.31)$$

висота:

$$h = \frac{S_H}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (2.32)$$

тоді обсяг буде дорівнює:

$$V = FL = \frac{(e+b)S_H L}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.33)$$

Підставивши об'єм призми, обчисленої за формулою (2.33), в вираз формула (2.30) потужність запишеться:

$$Q = \frac{(e + b)\mu S_H Ln}{2tg \alpha}. \quad (2.34)$$

Б. В. Клушанцев запропонував визначати продуктивність щоківих дробарок за формулою, в якій в порівнянні з виразом (2.34) додатково враховуються деякі параметри, що впливають на продуктивність:

$$Q = \frac{\mu S_{CP} b Ln (B - b)}{2B tg \alpha}, \quad (2.35)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт розпушення матеріалу: для міцних порід  $\mu = 0,2 - 0,3$ ; для глини  $\mu = 0,4 - 0,6$  [9];

$S_{CP}$  - середній хід стиснення, м;

$b$  - ширина вихідної щілини, м;

$L$  - довжина рухомий дробить плити, м;

$B$  - ширина приймального отвори дробарки, м;

$\alpha$  - кут захоплення.

Середній хід щоки дорівнює напівсумі величин ходів стиснення вгорі і внизу  $S_H$  камери дроблення:

$$S_{CP} = \frac{S_H + S_B}{2}. \quad (2.36)$$

У результаті спеціальних досліджень зроблені наступні рекомендації для визначення оптимального ходу рухомої щоки [38]:

- внизу з простим рухом щоки  $S_H = 0,008 + 0,266$ , м ;
- вгорі з простим рухом щоки  $S_B = 0,02B$ , м;

тоді середній хід щоки буде дорівнює:

$$S_{CP} = \frac{0,008 + 0,26b + 0,02B}{2} = 0,004 + 0,13b + 0,01B, \text{ мм} \quad (2.37)$$

Після підстановки формули (3.10) в вираз продуктивності (2.35):

$$Q = \frac{\mu(0,004 + 0,13b + 0,01B)bLn(B-b)}{2Btg\alpha}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (2.38)$$

- Конусна дробарка.

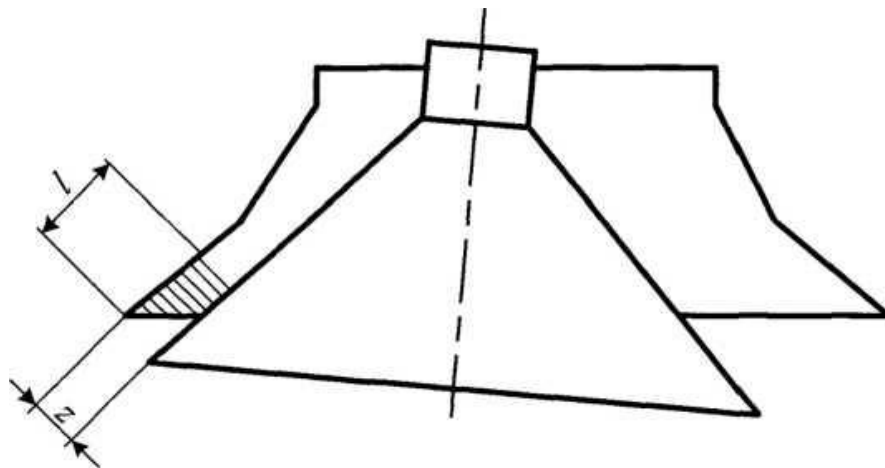


Рисунок 2.15 - Схема конусної дробарки

При розрахунку продуктивності конусних дробарок середнього дроблення (рис.2.15) приймають [21], що за один оберт ексцентрикової втулки шматок матеріалу проходить довжину паралельної зони, тоді за один оберт з дробарки вивантажиться порція матеріалу об'ємом:

$$V = \pi z l D_c, \quad (2.39)$$

де  $z$  - ширина паралельної зони (величина вихідної щілини), м;

$l$  - довжина паралельної зони, м;

$D_c$  - діаметр окружності, описуваної центром ваги перерізу матеріалу, укладеного в паралельній зоні, м.

Для спрощення розрахунку беруть  $D_c = D$  (де  $D$  - діаметр рухомого конуса), тоді продуктивність дробарки

$$Q = \mu \pi n z l D. \quad (2.40)$$

Оскільки, довжина кола дорівнює  $L = \pi D$ , то після підстановки  $L$  в формулу (2.40), продуктивність конусної дробарки запишеться

$$Q = \mu n L z l, \quad \text{м}^3 / \text{с}, \quad (2.41)$$

де  $L$  - довжина кола основи конуса.

- Двохвалкова дробарка:

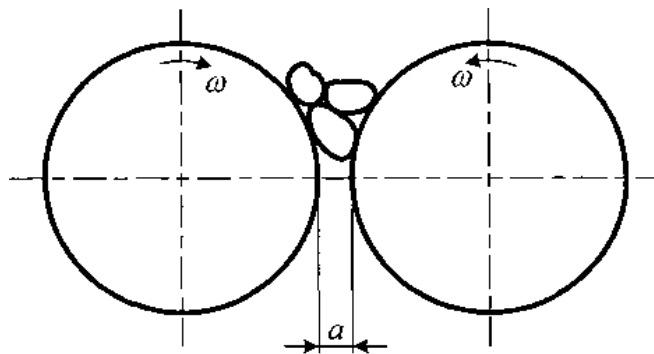


Рисунок 2.16 - Схема двошвалкової дробарки

Продуктивність двовалкової дробарок (рис.2.16) можна обчислити, якщо уявити процес дроблення як рух стрічки матеріалу [9]. За один оберт валка обсяг стрічки матеріалу, що пройшла через вихідну щілину:

$$V = \pi DLa, \quad (2.42)$$

де  $D$  - діаметр валка, м;

$L$  - довжина валка, м;

$A$  - ширина вихідної щілини, м.

Тоді продуктивність дробарки

$$Q = \pi DLa n, \quad (2.43)$$

діаметр валка  $D$  дорівнює:

$$D = \frac{D_{CB} \cos \alpha - a}{1 - \cos \alpha}, \quad (2.44)$$

де  $D_{CB}$  - середньозважений розмір вихідного шматка;

$\alpha$  - кут захоплення.

Після підстановки виразу (2.44) в формулу (2.43), продуктивність двовалкової дробарки можна визначити наступним чином

$$Q = \pi \frac{D_{CB} \cos \alpha - a}{1 - \cos \alpha} Lan \mu, \quad \text{м}^3 / \text{с}. \quad (2.45)$$

Порівняння формул (2.38, 2.41, 2.45) продуктивності для трьох типів дробарок [55] виявить, яка з них буде найбільш енергоефективною при інших рівних умовах. З аналізу цих формул можна зробити висновок, що вони включають в себе однакові параметри:  $\mu$ - коефіцієнт, враховує розпушення матеріалу;  $n$  - число ходів робочого органу;  $L$  - довжина робочої поверхні (для шокової дробарки це ширина поверхні рухомої дроблячої плити, для конусної - довжина кола основи конуса, для двовалкової - довжина валка);  $b, z, a$  - ширина вихідної щілини для шокової, конусної, двовалкової дробарок, відповідно. Якщо врахувати, що добуток ширини вихідної щілини на довжину робочої поверхні дорівнює площі вихідного отвору  $A_{щ}$ , тоді формули (2.38, 2.41, 2.45) приймуть наступний вигляд:

- для шокової дробарки:

$$Q = n\mu A_{щ} \frac{(0,04 + 0,13b + 0,01B)(B - b)}{2B \operatorname{tg} \alpha}, \quad (2.46)$$

- для конусної дробарки:

$$Q = n\mu A_{щ} l, \quad (2.47)$$

- для двохвалкової дробарки:

$$Q = n\mu A_{щ} \pi \frac{D_{CB} \cos \alpha - a}{1 - \cos \alpha}. \quad (2.48)$$

Оскільки ступінь дроблення в валкових дробарках в середньому дорівнює 4, і приймаючи таку ж ступінь дроблення у інших типів дробарок, за умови, що  $l \approx \frac{D_{CB}}{\sin \alpha}$ , а також, з огляду на, що  $D_{CB} \approx B$ , тоді, після перетворення, формули (2.46, 2.47, 2.48) запишуться

- для щоклової дробарки:

$$Q_{щ} = n\mu A_{щ} D_{CB} \frac{0,02}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (2.49)$$

- для конусної дробарки

$$Q_K = n\mu A_{щ} D_{CB} \frac{1}{\sin \alpha}, \quad (2.50)$$

- для двохвалкової дробарки

$$(2.51)$$

Кут захоплення, що залежить від коефіцієнта тертя роздрібнованню шматка о робочий орган, змінюється в межах від 16 до 22 градусів, тоді аналіз виразів (3.22, 3.23, 3.24) показує, що продуктивність двовалкової дробарки вище, ніж у конусної і щоклової дробарок. Оскільки приймається, що потужності приводів дробарок рівні, значить на дроблення певної кількості матеріалу двовалковою дробаркою буде потрібно менше часу і, отже, витрат електроенергії буде менше.

## 2.4.2 Розрахунок потужності двигуна одновалкової дробарки

У одновалкової дробарці крім стискаючих сил діє і крутний момент, що викликає дію дотичних напружень, і руйнування дробленого матеріалу відбувається по площині дії максимальних дотичних напружень [56], які визначаються за формулою (2.17):

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2}.$$

Щоб зруйнувати матеріал максимальне дотичне напруження повинно  $\tau_{\max} = \tau_{cm}$  досягти граничного значення .

Визначаються нормальні і дотичні напруження, що діють на шматок дробленого матеріалу.

Нормальна напруження при стисканні дорівнює:

$$\sigma_{cm} = \frac{R_r}{\mu \cdot F}, \quad (2.52)$$

де  $R_r$  - сила, необхідна на дроблення матеріалу (горизонтальна складова рівнодіючої сили);

$\mu$  - коефіцієнт розпушення;

$F$  - площа, на якій діє сила  $R_r$  (рис.2.17).

$$F = L \cdot l, \quad (2.53)$$



де  $L$  - довжина валка (щоки);

$l$  - висота ділянки подрібнення матеріалу

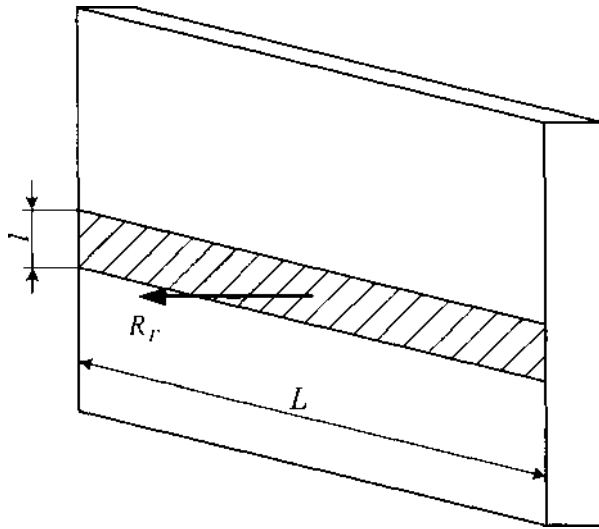


Рисунок 2.17 - Нерухома щока одновалкової дробарки

При підстановці формули (2.53) вираз (2.52) набуде вигляду

$$\sigma = \frac{R_r}{\mu \cdot l \cdot L}. \quad (2.54)$$

З теорії пружності відомо, що дотичне напруження при крученні деталі не круглого поперечного перерізу дорівнює [52]

$$\tau = \frac{M}{\chi \cdot h \cdot b^2}, \quad (2.55)$$

де  $M_{кр}$  - внутрішній крутний момент;

$\chi$  - коефіцієнт, що залежить від ставлення сторін  $h$  і  $b$ ;

$h$  - велика сторона, а  $b$  - мала сторона роздрібнювального шматка.

Внутрішній крутний момент визначається наступним чином:

$$M_{кр} = T \cdot c, \quad (2.56)$$

де  $T = R_B - F_2$  - різниця між вертикальної складової рівнодіючої сили і силою тертя між подрібнювальним матеріалом і нерухомою щогою (рис.2.5);

$c$  - плече дії сили  $T$ , яке з огляду на правило складання двох паралельних сил нерівних за величиною визначається наступним чином [57]:

$$c = \left( \frac{F_2}{T} + \frac{1}{2} \right) \cdot D_{CB}. \quad (2.57)$$

З проведеного аналізу сил, що діють на шматок відомо, що вертикальна складова рівнодіючої сили дорівнює:

$$R_B = R_T \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.58)$$

сила тертя між подрібнювальним матеріалом і нерухомою щогою:

$$F_2 = R_T \cdot f_2. \quad (2.59)$$

З урахуванням формул (2.58) і (2.59) сила  $T$  запишеться:

$$T = R_{\Gamma} \cdot (\operatorname{tg} \varphi - f_2), \quad (2.60)$$

а плече  $c$  дорівнюватиме:

$$c = \frac{D_{CB}}{2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi + f_2}{\operatorname{tg} \varphi - f_2}. \quad (2.61)$$

Після підстановки формул (2.60) і (2.61) в вираз (2.56) внутрішній крутний момент буде дорівнює:

$$M_{KP} = \frac{1}{2} \cdot R_{\Gamma} \cdot D_{CB} \cdot (\operatorname{tg} \varphi + f_2), \quad (2.62)$$

тоді формула (2.55) дотичних напружень набуде вигляду:

$$\tau = \frac{R_{\Gamma} \cdot D_{CB} \cdot (\operatorname{tg} \varphi + f_2)}{2 \cdot \mu \cdot \chi \cdot h \cdot b^2}. \quad (2.63)$$

При дробленні шматків матеріалу кубовидної форми можна прийняти, що сторони  $h$  і  $b$  рівні, тобто  $h \approx b = D_{CB}$  - середньозважений розмір вихідного шматка, тоді при цих умовах  $\chi = 0,21$ . З урахуванням вище сказаного формула дотичних напружень запишеться:

$$\tau = \frac{R_{\Gamma} \cdot (\operatorname{tg} \varphi + f_2)}{0,42 \cdot \mu \cdot D_{CB}^2}. \quad (2.64)$$

При підстановці формули (2.54) і (2.64) в формулу максимальних дотичних напружень (2.17) визначаються максимальні дотичні напруження, по площині дії яких, руйнується дроблений шматок

$$4\tau_{cm}^2 = \left( \frac{R_{\Gamma}}{l \cdot L \cdot \mu} \right)^2 + 4 \cdot \left( \frac{R_{\Gamma} \cdot (\operatorname{tg} \varphi + f_2)}{0,42 \cdot \mu \cdot D_{CB}^2} \right)^2, \quad (2.65)$$

звідки сила, необхідна на дроблення дорівнює:

$$R_{\Gamma} = \frac{2 \cdot \mu \cdot \tau_{cm}}{\sqrt{\left( \frac{1}{l \cdot L} \right)^2 + \left( \frac{4,76 \cdot (\operatorname{tg} \varphi + f_2)}{D_{CB}^2} \right)^2}}. \quad (2.66)$$

Необхідна установча потужність  $N_{\partial\partial}$  електродвигуна валкової дробарки по формулі (1.3):

$$N_{\partial\partial} = \frac{N_1 + N_2}{\eta},$$

де  $N_1$  – потужність, що витрачається на подрібнення матеріалу;

$N_2$  – потужність, що витрачається на подолання тертя в вальницях;

$\eta$  - ккд передачі.

Сила тертя подрібнювального матеріалу о валок  $F_1$  визначається з силового аналізу (рис.2.3 і 2.4):

$$F_1 = \frac{R_\Gamma}{\cos \varphi} \cdot \cos \gamma. \quad (2.67)$$

Добуток сили тертя на радіус  $R$  валка уявляє собою момент сили, на подолання якого витрачається потужність двигуна.

$$M' = F_1 \cdot R. \quad (2.68)$$

Добуток моменту сили тертя і кутової швидкості валка  $\omega = 2\pi n$  (де  $n$  – частота обертання валка, об/хв) визначає потужність  $N'$ , необхідну на подолання сили тертя обертового валка о шматок дробленого матеріалу:

$$N' = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M', \quad (2.69)$$

або

$$N' = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{R_\Gamma \cdot \cos \gamma}{\cos \varphi} \cdot R. \quad (2.70)$$

Потужність, необхідна на подолання сили тертя дробленого матеріалу о нерухому щоку дорівнює:

$$N'' = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M'', \quad (2.71)$$

де  $M''$  - момент сили, на подолання якого витрачається потужність двигуна  
рівний:

$$M'' = F_2 \cdot (R + a), \quad (2.72)$$

де  $R$  - радіус валка;

$a$  - зазор між валком і нерухомою щогою.

З урахуванням формули (2.59) і (2.72) потужність, необхідна на подолання сили тертя дробленого матеріалу про нерухому щого, буде дорівнювати:

$$N'' = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R_f \cdot f_2 \cdot (R + a). \quad (2.73)$$

Потужність необхідна на дроблення матеріалу  $N_1$ , дорівнює сумі потужностей на подолання тертя обертового валка о дроблений матеріал і подолання тертя дробленого матеріалу про нерухому щого:

$$N_1 = N' + N'', \quad (2.74)$$

або

$$N_1 = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R_f \cdot \left( \frac{R \cos \gamma}{\cos \varphi} + f_2 \cdot (R + a) \right). \quad (2.75)$$

Потужність, необхідна на подолання сили тертя в вальницях валка дорівнює:

$$N_2 = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M''', \quad (2.76)$$

де  $M'''$  - момент сили, необхідний на подолання сили тертя рівний:

$$M''' = \frac{1}{2} d_n R_\Gamma f_3, \quad (2.77)$$

де  $d_n$  - діаметр шийки вала;

$f_3$  - коефіцієнт тертя в підшипнику,

тоді потужність  $N_2$ :

$$N_2 = \pi \cdot n \cdot d_n \cdot R_\Gamma \cdot f_3. \quad (2.78)$$

При підстановці в формулу настановної потужності приводу (1.3) виразів (2.75) і (2.78) визначається установча потужність двигуна:

$$N_{\text{дв}} = \frac{2\pi n R_\Gamma \left[ \frac{R}{\cos \varphi} \cos \gamma + f_2 (R + a) + \frac{1}{2} d_n f_3 \right]}{\eta}, \quad (2.79)$$

де  $R_r$  - сила, необхідна на дроблення, яка визначається за формулою (2.66).

З аналізу отриманого виразу (2.73) і формули (2.66) випливає, що установча потужність приводу залежить від наступних параметрів:

- радіуса і довжини валка;
- частоти обертання валка;
- коефіцієнта тертя між шматком і валком, коефіцієнта тертя між шматком і

- нерухомою щогою і коефіцієнта тертя в вальниці;
- від міцності властивостей і розмірів дробленого матеріалу.

### 2.4.3 Порівняльний аналіз установчої потужності двигуна одно- і двовалкових дробарок

Для розрахунку установчої потужності електродвигуна одновалкової дробарки можна використовувати отриману формулу (3.52), але для порівняння з потужністю двигуна двовалкової дробарки необхідно провести ряд спрощень і перетворень, щоб привести формули потужності одно- і двовалкової дробарок до загального вигляду. Для спрощення порівняльного аналізу приймається, що в дробарках буде дробитися одиничний шматок кубічної форми.

Відомо, що необхідна установча потужність електродвигуна валкової дробарки складається з потужності, необхідної на дроблення матеріалу і потужності, що витрачається на подолання тертя в вальницях.

Потужність, необхідна на дроблення шматка в одно- і двовалковій дробарках визначається:

- для двовалкової дробарки [9]:

$$N_{1ДВ} = 2\pi n \sigma_{cm} l l \mu f_1 R, \quad (2.80)$$

де  $\sigma_{cm}$  - границя міцності матеріалу при стисненні;

$l$  - довжина дуги на ділянці подрібнення матеріалу.

- для одновалкової дробарки по формулі (2.75) і (2.66):



$$\begin{aligned}
N_{10B} &= 2\pi m R_{\Gamma} \left( \frac{R \cos \gamma}{\cos \varphi} + f_2 (R + a) \right) = \\
&= 2\pi m \frac{2\mu\tau_{cm}}{\sqrt{\left(\frac{1}{l \cdot L}\right)^2 + \left(\frac{4,76 \cdot (tg \varphi + f_2)}{D_{CB}^2}\right)^2}} \cdot \left( \frac{R \cos \gamma}{\cos \varphi} + f_2 \cdot (R + a) \right). \quad (2.81)
\end{aligned}$$

Приймається, що висота ділянки подрібнення матеріалу  $l$  дорівнює середньозваженому розміром вихідного шматка  $D_{CB}$ . Відомо, що границя міцності при дії нормальних напружень, приблизно, в два рази більше, ніж границя міцності при дії дотичних напружень, тому формулу (2.81) можна записати в такий спосіб

$$N_{10B} = 2\pi m \sigma_{cm} \mu \frac{\frac{R}{\cos \varphi} \cos \gamma + f_2 (R + a)}{\sqrt{\left(\frac{1}{D_{CB} \cdot L}\right)^2 + \left(\frac{4,76 \cdot (tg \varphi + f_2)}{D_{CB}^2}\right)^2}}. \quad (2.82)$$

Якщо врахувати, що зазор  $a$  між щогою і обертовим валком в порівнянні з радіусом валка  $R$  малий, то можна прийняти допущення  $R + a \approx R$ , тоді формула (2.82) на буде вигляду

$$N_{10B} = 2\pi m \sigma_{cm} \mu R \frac{\frac{\cos \gamma}{\cos \varphi} + f_2}{\sqrt{\frac{1}{D_{CB}^2 \cdot L^2} + \frac{22,67 \cdot (tg \varphi + f_2)^2}{D_{CB}^4}}}. \quad (2.83)$$

або

$$N_{10B} = 2\pi m \sigma_{cm} \mu R D_{CB} \frac{\frac{\cos \gamma}{\cos \varphi} + f_2}{\sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{22,67 \cdot (tg \varphi + f_2)^2}{D_{CB}^2}}}. \quad (2.84)$$

Відомі умови захоплення шматка матеріалу в одновалкової дробарці, тобто,  $f_1 > tg\alpha$  і  $tg\alpha > f_2$ . Коефіцієнт тертя між валком і шматком матеріалу  $f_1$  одновалкової дробарки приймається рівним 0,57, а коефіцієнт тертя між шматком матеріалу і нерухомою щогою  $f_2$  приймається - 0,18, тоді з урахуванням формули (2.3), кут захоплення  $\alpha$  дорівнює 16% а кут  $\varphi$  дорівнюватиме 14 °.

З урахуванням вище викладеного формула потужності, необхідна на дроблення матеріалу в одновалкової дробарці, запишеться

$$N_{IOB} = 2\pi\sigma_{cm}\mu RD_{CB} \frac{0,69_2}{\sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{4,18}{D_{CB}^2}}}. \quad (2.85)$$

Оскільки в дробарці дробиться одиничний шматок кубічної форми зі стороною  $d$ , тоді:

$$N_{IOB} = 2\pi\sigma_{cm}\mu Rd \frac{0,69_2}{\sqrt{\frac{1}{d^2} + \frac{4,18}{d^2}}}. \quad (2.86)$$

або

$$N_{IOB} = 0,6\pi\sigma_{cm}\mu Rd^2. \quad (2.87)$$

З огляду на, що в двовалкова дробарці руйнується один шматок зі стороною  $d$ , приймаючи довжину дуги на ділянці подрібнення матеріалу  $l$

рівню  $d$ , і коефіцієнт тертя між шматком і валком  $f_l = 0,57$ , формула (2.80)

запишеться наступним чином:

$$N_{10B} = 1,14\pi m \sigma_{cm} \mu R d^2. \quad (2.88)$$

При порівнянні формули потужності, необхідної на дроблення матеріалу в одновалкової дробарці (2.87), і формули потужності двовалкової дробарки (2.88), можна зробити висновок, що потужності для руйнування шматка в одновалкової дробарці потрібно в 1,9 рази менше.

Потужність, що витрачається на подолання тертя в вальниціях для одно- і двовалкової дробарок:

- для двовалкової дробарки [9]:

$$N_{2ДВ} = 2\pi d_n f_3 G, \quad (2.89)$$

де  $G$  - навантаження на вальниці.

Без урахування сили тяжіння валка,  $G$  дорівнює середній силі, необхідної на дроблення шматка  $P_{CP}$ , яка дорівнює [9]:

$$P_{CP} = \sigma_{cm} \cdot l \cdot L \cdot \mu. \quad (2.90)$$

Сила, необхідна на дроблення одиничного шматка кубічної форми зі стороною  $d$  в одновалковій дробарці, враховуючи вище наведені розрахунки і формулу (2.66), дорівнює:

$$R_{\Gamma} = \frac{\sigma_{cm} \mu R}{\sqrt{\frac{1}{d^2} + \frac{4,18}{d^2}}} = 0,44 \sigma_{cm} \mu d^2. \quad (2.91)$$

Порівнюючи формули (2.90) і (2.91) при дробленні одиничного шматка кубічної форми зі стороною  $d$ , виявляється, що сила потрібна на руйнування в одновалковій дробарці, приблизно, в 2,3 рази менше сили, необхідної на дроблення в двовалковій дробарці.

При підстановці формули (2.90) в вираз (2.89) для шматка кубічної форми зі стороною  $d$ :

$$N_{2ДВ} = 2\pi n d_n f_3 \sigma_{cm} \mu d^2. \quad (2.92)$$

- для одновалкової дробарки по формулі (2.78):

$$N_{2ОВ} = \pi n d_n R_{\Gamma} f_3$$

або

$$N_{2ОВ} = \pi n d_n f_3 \frac{\sigma_{cm} \mu d}{\sqrt{\frac{1}{d^2} + \frac{4,18}{d^2}}} = 0,44 \pi n d_n f_3 \sigma_{cm} \mu d^2. \quad (2.93)$$

При порівнянні формули потужності, що витрачається на подолання тертя в вальницях в одновалковій дробарці (2.93) і формули потужності двовалкової дробарки (2.92), можна зробити висновок, що потужності для подолання тертя в вальницях одновалкової дробарки потрібно в 4,5 рази менше.

З аналізу формул потужності, необхідних на дроблення матеріалу  $N_1$  і витрат потужності на тертя в вальницях  $N_2$  для одно- і двовалкової дробарок, і з огляду на що, значно більше  $N_2$ , то необхідна установча потужність приводу, яка визначається за формулою (1.3), для одновалкової дробарки буде в 2 рази менше, ніж потужність двовалкової дробарки, відповідно, витрати електроенергії на подрібнення матеріалу в одновалковій дробарці будуть менше на таку ж величину в порівнянні з двовалковою дробаркою. З усього вище сказаного випливає, що одновалкової дробарка буде в 2 рази енергоефективніше, ніж двохвалкова з гладкими валками при однаковому ступені дроблення.

Якщо не прагнути до більшої точності, то використовуючи формули (2.85) і (2.93), можна отримати порівняно просту, але цілком достатню для практичних розрахунків формулу установчої потужності електродвигуна одновалкової дробарки:

$$N_{\text{дв}} = \frac{1,38\pi\sigma_{\text{см}}\mu RD_{\text{CB}}}{\eta\sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{4,18}{D_{\text{CB}}^2}}} + \frac{\pi d_n f_3 \sigma_{\text{см}} \mu D_{\text{CB}}}{\eta\sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{4,18}{D_{\text{CB}}^2}}} = \frac{1,4\pi\sigma_{\text{см}}\mu D_{\text{CB}} R}{\eta\sqrt{\frac{1}{L^2} + \frac{4,18}{D_{\text{CB}}^2}}}. \quad (2.94)$$

#### 2.4.4 Вплив діаметра валка і величини розміру зазору між валком і нерухомою щогою на ступінь подрібнення

Вплив величини діаметра валка і розміру вихідної щілини на ступінь дроблення для двовалкової дробарки відомий, але оскільки конструкція одновалкової дробарки раніше не розглядалася, то виникає необхідність з'ясувати вплив вище перерахованих параметрів на ступінь подрібнення для одновалкової дробарки і отримати зв'язок в загальному вигляді між ступенем подрібнення і діаметром валка, а також між ступенем подрібнення і зазором між валком і нерухомою щогою.

На рис.2.18 надані дві одновалкові дробарки, в яких подрібнюється матеріал з однаковими властивостями міцності і однаковим розміром зазору між обертовим валком і нерухомою щогою, але з різними діаметрами валків [26]. Кут захоплення для обох дробарок приймається максимальним, тобто  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{\max}$ .

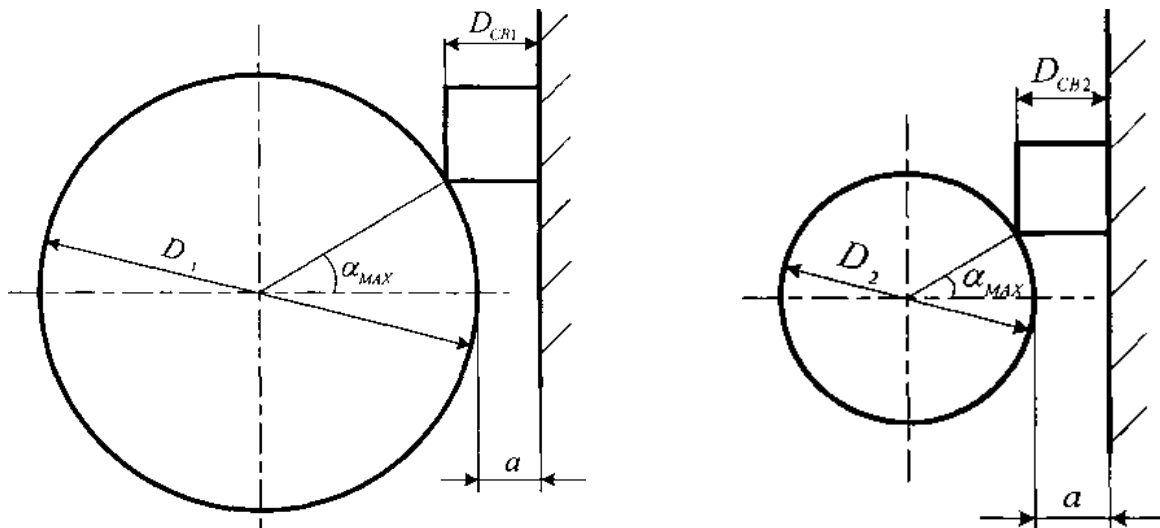


Рисунок 2.18 – Дробарки з різним діаметром валка

При максимальному куті захоплення дробарка з великим діаметром валка може захопити шматок більшого розміру,  $D_{CB1} > D_{CB2}$  (рис.2.18).

Ступінь дроблення визначається як

$$i = \frac{D_{CB}}{d_{CB}}, \quad (2.95)$$

де  $D_{CB}$  - середньозважений розмір вихідного шматка;

$d_{CB}$  - середньозважений розмір кінцевого шматка.

$$i = \frac{D_{CB}}{a}. \quad (2.96)$$

Так як  $D_{CB1} > D_{CB2}$  і зазор для одновалкової дробарки обраний однаковим, то ступінь подрібнення у дробарки з великим діаметром буде більше

$$i_1 = \frac{D_{CB1}}{a} > i_2 = \frac{D_{CB2}}{a}. \quad (2.97)$$

З рисунка 2.11 випливає

$$\frac{D}{2} \cos \alpha + D_{CB} = \frac{D}{2} + a, \quad (2.98)$$

тоді

$$D_{CB} - a = \frac{D}{2} \cdot (1 - \cos \alpha), \quad (2.99)$$

звідси  $D$  дорівнює

$$D = 2 \cdot \frac{D_{CB} - a}{1 - \cos \alpha}. \quad (2.100)$$

Висловивши середньозважений розмір вихідного шматка  $D_{CB}$  з формули (2.96), і підставивши у вираз (2.100), визначається зв'язок між діаметром валка  $D$  і ступенем подрібнення  $i$

$$i = 1 + \frac{D(1 - \cos \alpha)}{2a}. \quad (2.101)$$

Таким чином, діаметр валка  $D$  впливає на ступінь подрібнення  $i$ , при цьому для збільшення ступеня подрібнення необхідно збільшувати діаметр валка. Дане положення, визначене для одновалкової дробарки, не суперечить і для двовалкової дробарки.

На рис. 2.19 надано випадок дроблення шматка в одновалковій дробарці з встановленим зазором  $a_1$  і з зазором  $a_2$ , причому зазор  $a_2$  більше, ніж зазор  $a_1$ , [26]. Кут захоплення для обох дробарок приймається максимальним, тобто  $a_1 = a_2 = a_{max}$ .

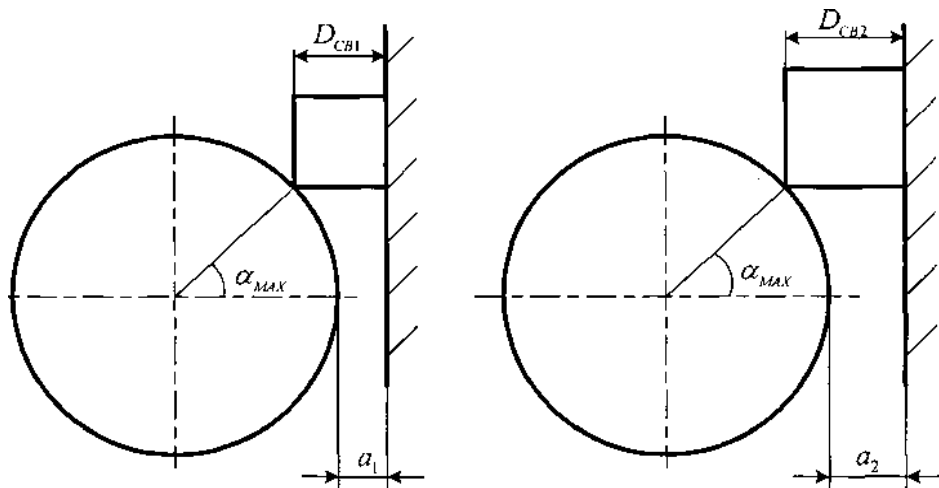


Рисунок 2.19 – Дробарка з різним розміром зазору між валком і нерухомою щогою

При максимальному куті захоплення дробарка з великим розміром зазору між валком і нерухомою щогою може захопити шматок більшого розміру,  $a_1 < a_2$  (рис. 2.19).

Зв'язок між зазором  $a$  і ступенем дроблення визначається за формулою (2.101)

З формули (2.101) можна зробити висновок, що для збільшення ступеня дроблення і необхідно зменшити розмір зазору між валком і нерухомою щогою  $a$ . Дане положення, визначене для одновалкової дробарки, який суперечить і для двовалкової дробарки.

На рисунках 2.20-2.21 надані графіки залежності ступеня подрібнення від діаметра валка і величини розміру зазору між валком і нерухомою щогою, отримані виходячи їх формули (2.101).



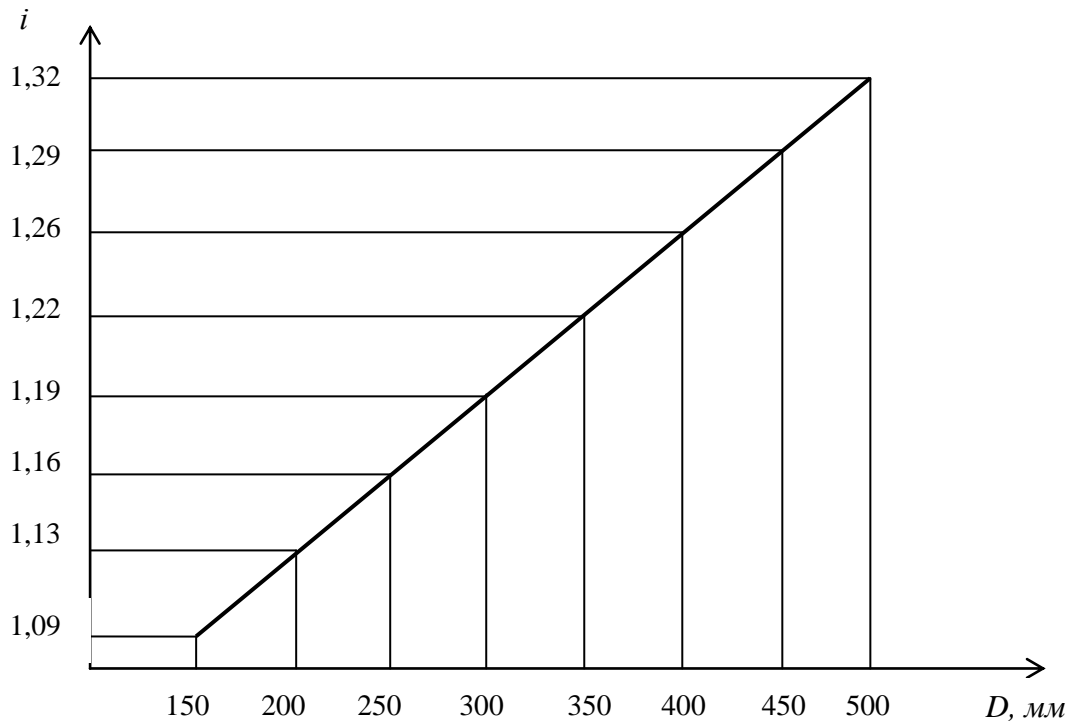


Рисунок 2.20 - Залежність ступеня дроблення від діаметра валка при постійному куті  $\alpha = 16^\circ$  і величиною зазору  $a = 30$  мм

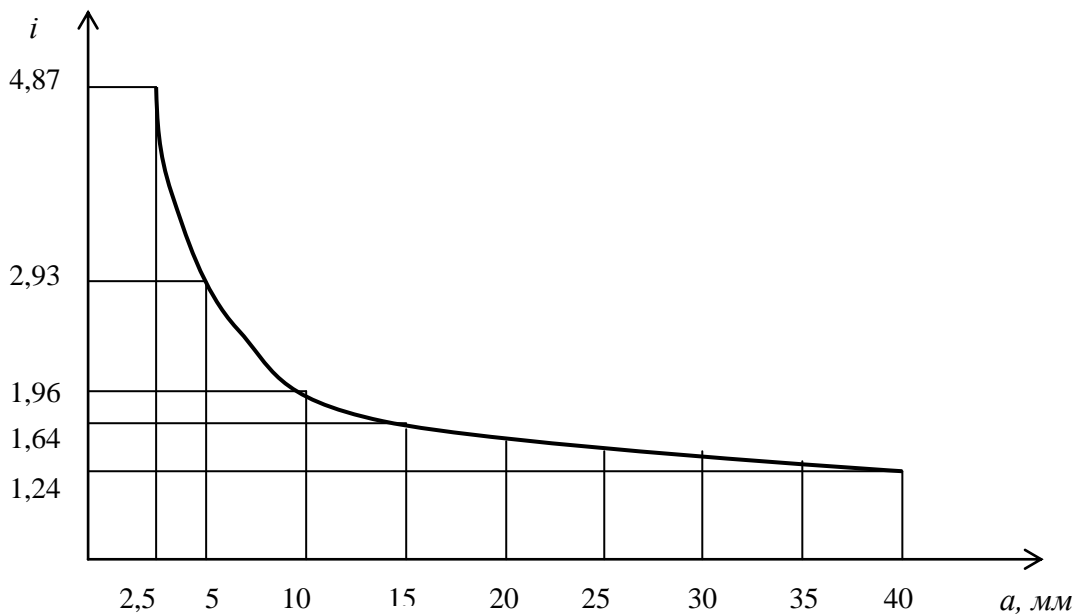


Рисунок 2.21 - Залежність ступеня дроблення від величини розміру зазору при постійному куті  $\alpha = 16^\circ$  і діаметрі валка  $D = 500$  мм

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ

### 3 Методика проведення експериментів

#### 3.1 Виготовлення зразків

Для проведення експериментів були виготовлені різні зразки правильної форми. Для виготовлення зразків кубічної форми (зі стороною 40 мм з суміші цементу і піску в пропорціях 1: 1 і 1:3, кубічної форми зі стороною 20 мм з суміші цементу і піску в пропорції 1: 2, сферичної форми діаметром 40 мм з суміші цементу і піску в пропорції 1: 2) була спеціально виготовлена решітка з органічного скла (рис.3.1), в яку заливалася цементно-піщана суміш. Для виготовлення зразків сферичної форми були взяті спеціальні форми.



Рисунок 3.1 - Зразки кубічної форми

#### 3.1.1 Випробування зразків на УИМ – 20

На універсальній випробувальній машині (прес Амслера), з максимальною силою навантаження 20 тонн (200 кН), були випробувані

отримані зразки. Було зруйновано по десять зразків кожного виду для визначення міцності при стисненні. Отримані результати представлені в таблиці 3.1. і рис.3.2.

Таблиця 3.1 - Результати випробувань на стиск на УИМ - 20

Зразок	Розмір, мм	Суміш	$F_{max}$ , кН	$\sigma_{ст}$ , Мпа
Кубічної форми	40	1:1	20,2-21,8	13
Кубічної форми	40	1:3	2,3-2,7	1,6
Кубічної форми	20	1:2	1,8-2,1	5
Сферичної форми	∅40	1:2	7,7-8,1	5

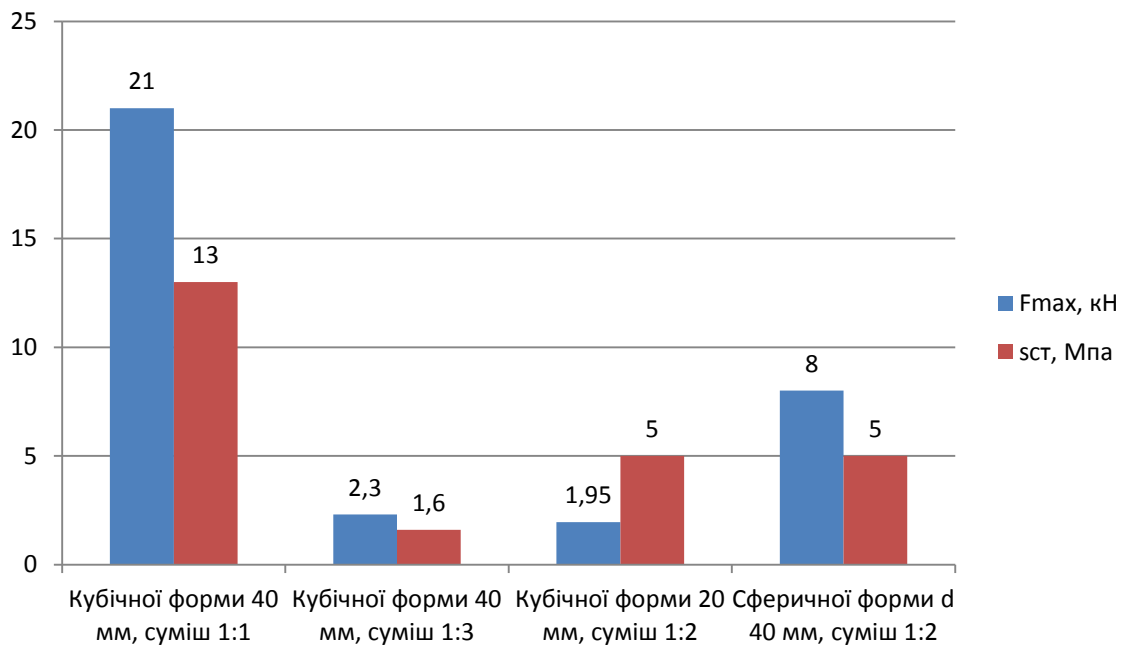


Рисунок 3.2 - Результати випробувань на стиск на УИМ - 20

### 3.1.2 Силувимірювальна апаратура

Для вимірювання сили, що виникає при дробленні шматка матеріалу в одновалкової дробарці, в конструкцію дробарки був включений динамометр стиснення. Для роботи з приладом була поведена його тарування за допомогою ДІМ - 20, при цьому на динамометр подавалася навантаження і знімалися

показання з індикатора, що відповідають цьому навантаженню. За отриманими даними був побудований тарувальний графік, представлений на рисунку 3.3.

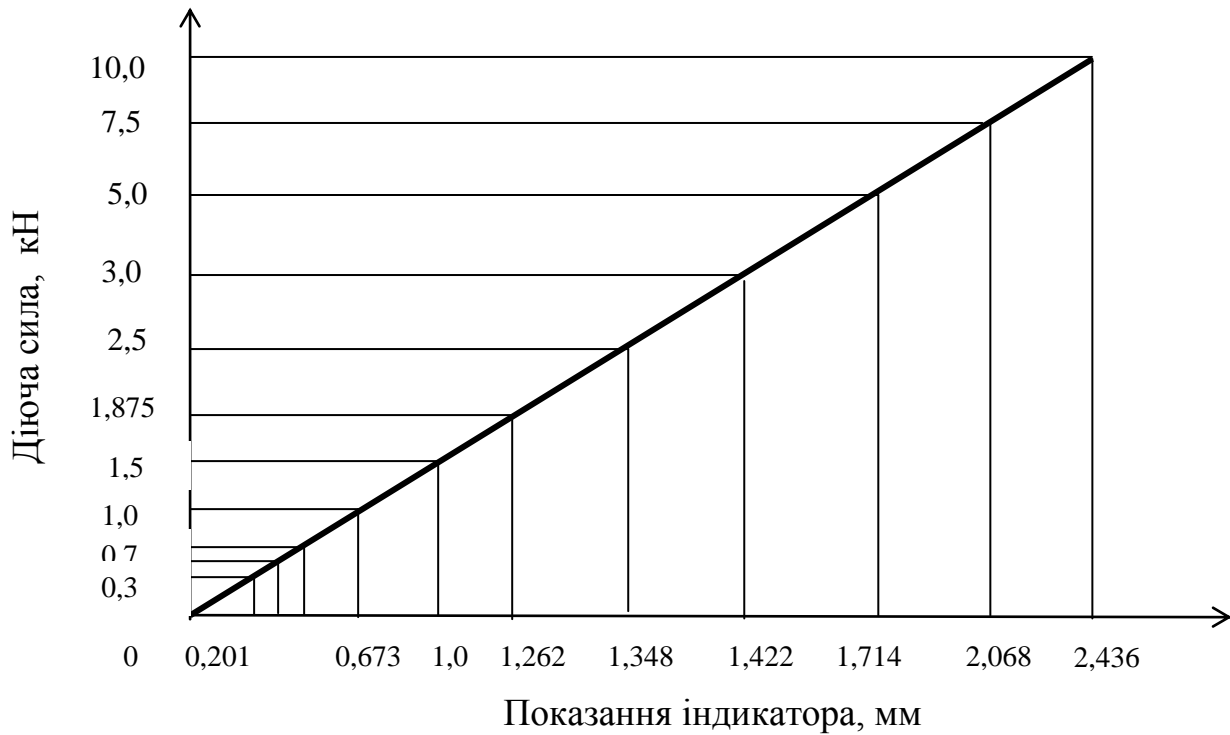


Рисунок 3.3 - Тарувальний графік динамометра

## 3.2 Результати проведення експерименту

### 3.2.1 Опис експериментальної установки

Дослідницька установка, що представляє собою одновалкової дробарку, представлена на рис.3.4.

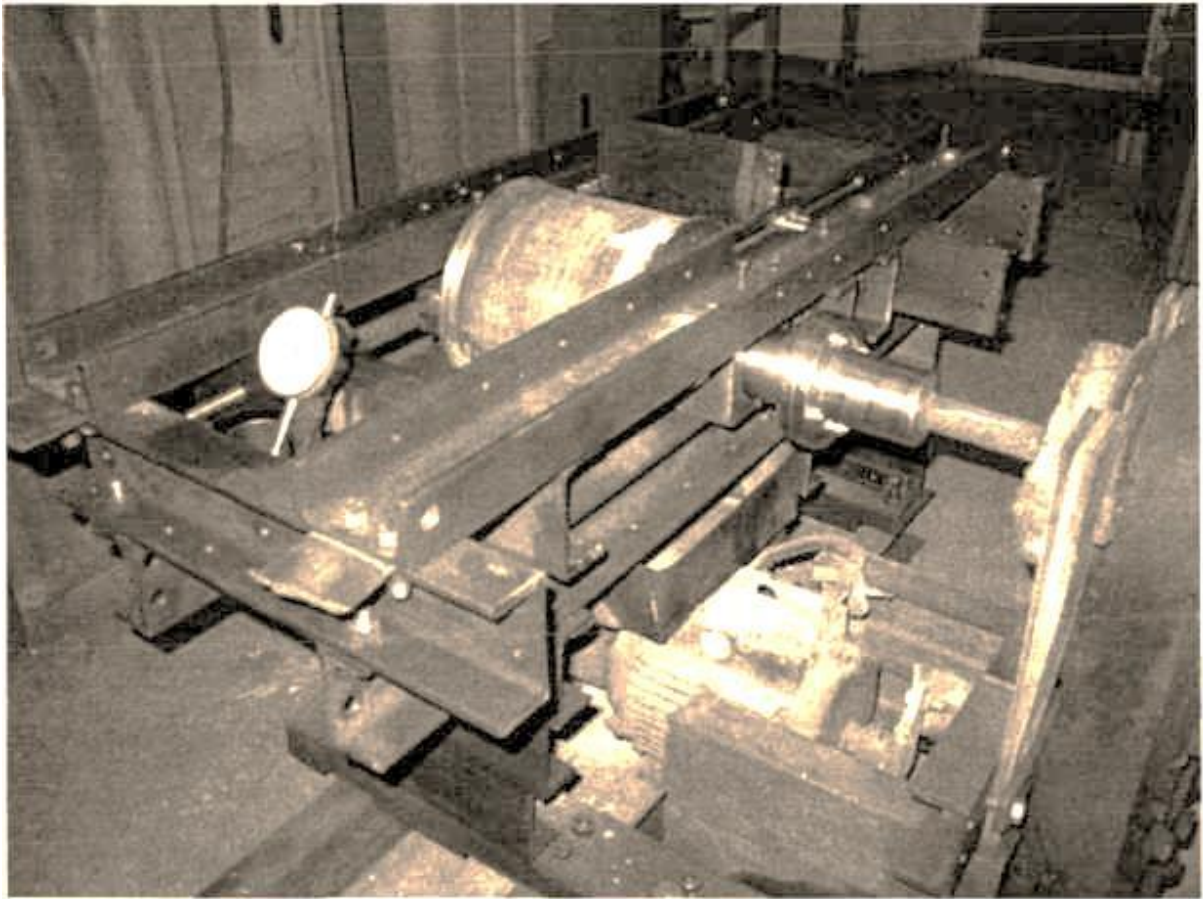


Рисунок 3.4 – Дослідна установка

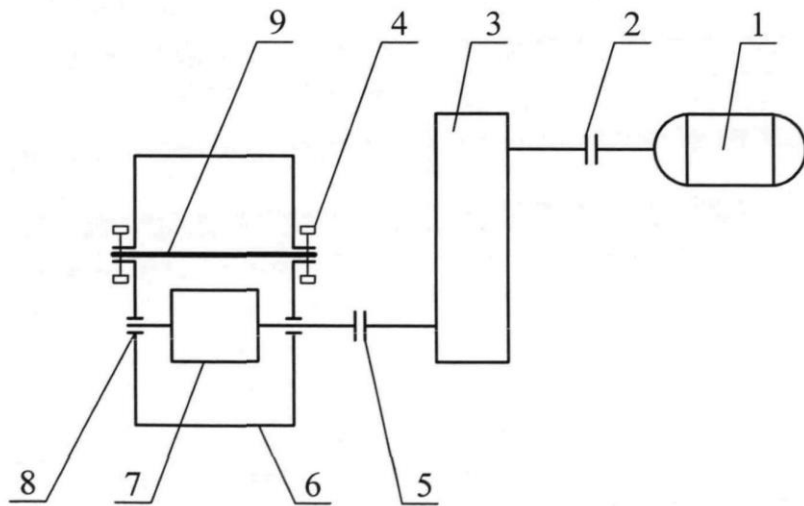


Рисунок 3.5 – Кінематична схема одновалкової дробарки

Одновалкова дробарка (рис.3.5) складається з двигуна 1 постійного струму, поєднаного з редуктором 3 (передавальне відношення  $i = 15,3$ ) за допомогою муфти 2. Редуктор 3 передає обертальний рух валку 7 за допомогою пальцевої муфти 5. Валок 7 (діаметр валка 180 мм, число обертів на хвилину 100) спирається на вальниці ковзання 8, закріплені в станині 6. Так само в станині 6 кріпиться нерухома щока 9. Зазор між обертовим валком і нерухомою щокою можна змінювати за допомогою регулювальних болтів 4.

Дробарка працює в такий спосіб. Залежно від крупності фракції вихідного і кінцевого продукту дроблення встановлюється зазор між валком і нерухомою щокою за допомогою регулювальних болтів. Дроблений матеріал подається в зазор, а готовий продукт надходить в приймальний контейнер, що знаходиться під вихідний щілиною (зазор між валком і нерухомою щокою).

Кріплення та регулювання положення нерухомої щоки здійснюється наступним чином (рис.3.6). Для додання щоці 1 додаткової жорсткості до неї прикріплений куточок 2 за допомогою болтів (на рисунку не показано). Фіксування щоки 1 здійснюється як у верхній її частині, так і в нижній. Нерухому щоку фіксують в нижній частині за допомогою регулювальних болтів 5 і 6, за допомогою яких вибирається зазор між обертовим валком і щокою 1. Болти 5 і 6 жорстко фіксують куточок 2, до якого прикріплена щока 1. Верхня частина щоки 1 з одного боку фіксується болтами 3, які розташовані в пазах швелерів, а з іншого боку жорстко фіксується за допомогою шпильки 4, яка також розташована в пазах швелерів. Перед початком дроблення перевіряється вертикальність нерухомої щоки і рівномірність зазору по довжині валка.

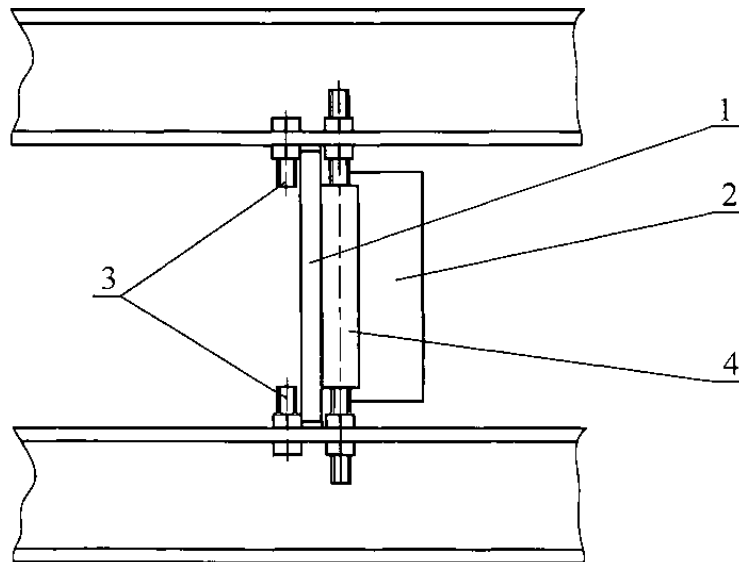


Рисунок 3.6 – Схема кріплення і регулювання нерухомої щоки

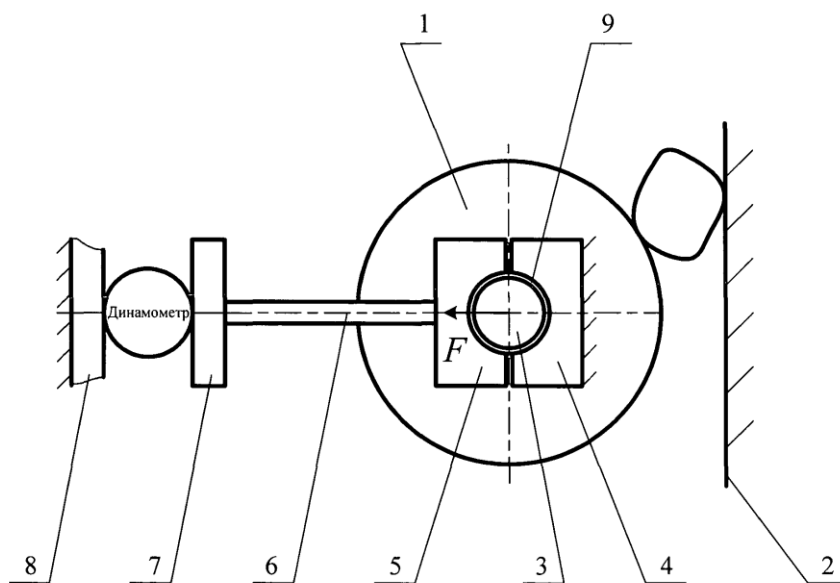


Рисунок 3.8 - Схема установки динамометра

Для вимірювання величини сили, необхідної для дроблення матеріалу, в силову схему одновалкової дробарки був вбудований динамометр (рис.3.8). При дробленні шматка в зазор між валком 1 і нерухомою щокою 2 на цапфу 3

валка буде діяти реактивна сила  $F$ , яка дорівнює за величиною силі необхідної для дроблення шматка матеріалу. Цапфа 3 валка 1 обертається у вкладиші 9, який кріпиться в корпусі вальниці ковзання, при цьому корпус складається з двох частин. Права частина 4 корпусу вальниці жорстко закріплена, а ліва частина 5 має можливість руху вздовж станини дробарки. Динамометр закріплений між траверсою 7 і станиною 8. Траверса 7 є рухомою і за допомогою штанги 6 з'єднана з рухомою частиною 5 корпусу вальниці ковзання. Таким чином, сила  $F$ , що діє на цапфу, за допомогою штанги 6 і траверси 7 передається на динамометр, з індикатора якого знімаються показання.

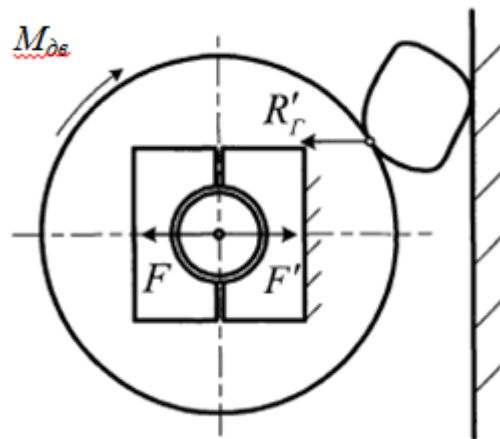


Рисунок 3.9 - Сила, діюча на цапфу

При дробленні матеріалу в одновалкової дробарці на валок з боку роздрібнюванню шматка діє сила  $R'_Г$ , яка за величиною дорівнює горизонтальній складовій  $R_f$  (рис.3.9). У центрі ваги перерізу цапфи прикладаємо дві рівні між собою і сили  $R_l$  сили  $F$  і  $F'$ , спрямовані в протилежні сторони, при цьому рівновагу тіла не зміниться. Тоді пара сил  $R'_Г$  і  $F'$  утворюють момент, на подолання якого витрачається потужність приводу, а на цапфу діє сила  $F$ , яка дорівнює за величиною горизонтальній складовій  $R'_Г$ .



### 3.2.2 Силові характеристики процесу дроблення

Були проведені виміри величини сили, що діє на корпус вальниці валка в напрямі сили технологічного опору за допомогою динамометра. Величина сили, що діє на корпус вальниці, показує, яке зусилля необхідно, щоб зруйнувати дроблений матеріал.

В процесі випробувань було зруйновано двадцять зразків кожного типу і були зняті показання з індикатора динамометра. За отриманими показниками індикатора відповідно до тарувального графіком (рис.3.3) була визначена сила необхідна для дроблення матеріалу в одновалкової дробарці. При порівнянні результатів отриманих на УІМ - 20 (таблиця 3.1), де руйнування відбувалося за рахунок стиснення, і результатів дроблення на одновалкової дробарці слід, що потрібна для руйнування в одновалкової дробарці сила  $F$ , приблизно, в 2,3 - 2,8 разів менше сили дроблення стисненням (таблиця 3.2, рис.3.9). Це обумовлено тим, що при дробленні в одновалкової дробарці в шматку матеріалу виникає складний напружений стан, про що свідчить і характер руйнування зразків, що відбувається по площині дії максимальних дотичних напружень.

Таблиця 3.2 - Результати руйнувань в одновалкової дробарці

Зразок	Розмір, мм	Суміш	Покази індикатора	$F$ , Н	$F_{max}$ , кН
Кубічної форми	40	1:1	1,8-2,2	7500	20,2-21,8
Кубічної форми	40	1:3	0,6-0,8	1100	2,3-2,7
Кубічної форми	20	1:2	0,4-0,6	740	1,8-2,1
Сферичної форми	Ø40	1:2	1,3-1,7	3160	7,7-8,1

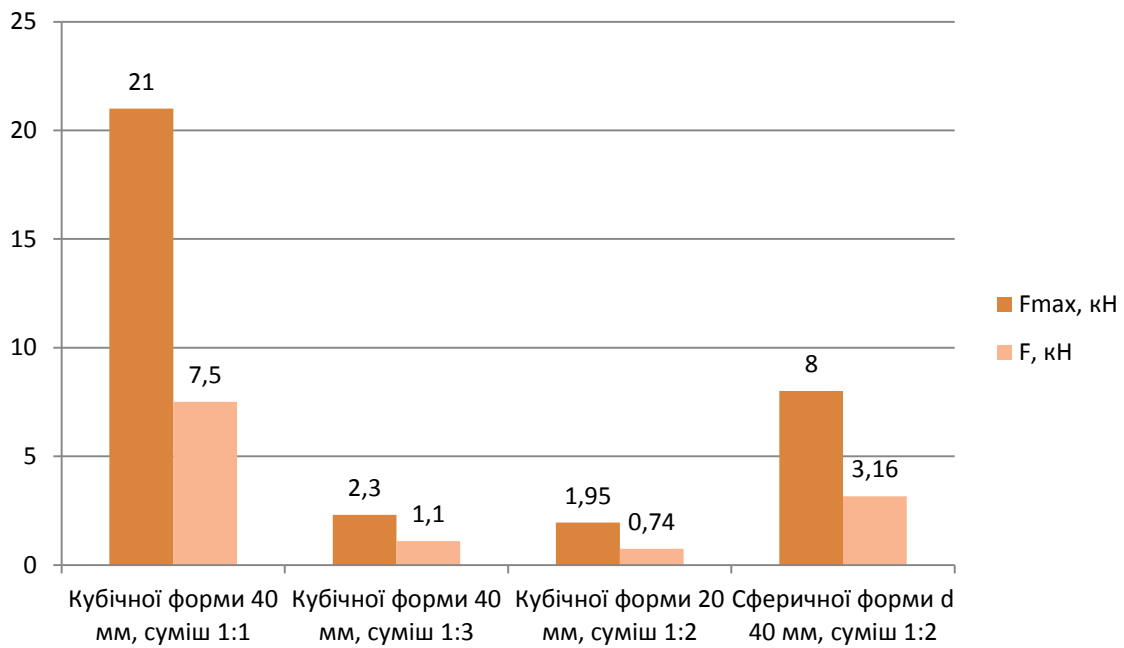


Рисунок 3.9 - Результати руйнувань в одновалкової дробарці

Підставляючи значення напружень при одноосьовому стиску (таблиця 3.1) в формулу (3.64), можна отримати розрахункове значення сили, необхідної на дроблення в одновалковій дробарці (таблиця 3.3, рис.3.10).

Таблиця 3.3 - Розрахункова і експериментальне значення сили необхідної на дроблення матеріалу в одновалкової дробарці

Зразок	Розмір, мм	Суміш	$\sigma_{ст}$ , Мпа	$F$ , Н	$R_r$ , Н
Кубічної форми	40	1:1	13	7500	9152
Кубічної форми	40	1:3	1,6	1100	1126
Кубічної форми	20	1:2	5	740	880
Сферичної форми	$\varnothing 40$	1:2	5	3160	3520

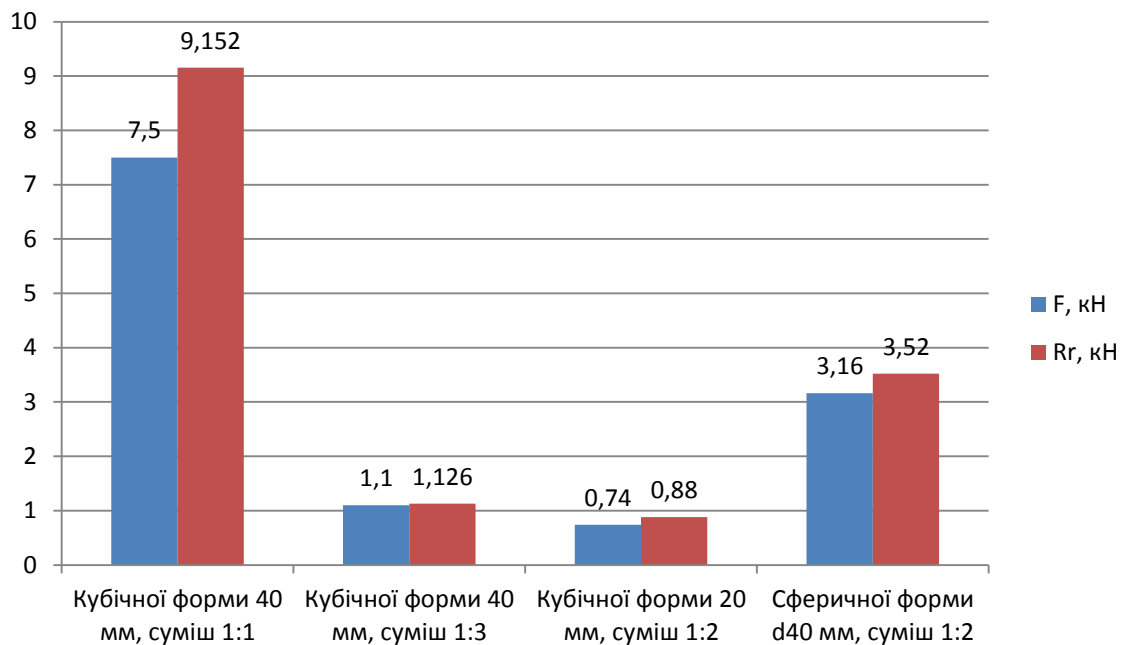


Рисунок 3.10 - Розрахункова і експериментальне значення сили необхідної на дроблення матеріалу в одновалкової дробарці

Порівняння величини потрібної на дроблення сили в одновалкової дробарці, отриманої при розрахунку, з величиною сили, отриманої в результаті експерименту, показало, що максимальне розбіжність становить 22%.

### 3.2.3 Характер руйнування шматка в одновалкової дробарці

При дробленні зразків кубічної форми зі стороною 40 мм в одновалкової дробарці з встановленим зазором між обертовим валком і нерухомою щокою 37 мм руйнування відбувається наступним чином:

- 1) руйнування зразка відбувається по площині дії максимальних дотичних напружень, в даному випадку зразок руйнувався на 2 шматки;
- 2) спочатку провалюється нижня частина зразка;
- 3) потім відбувається переорієнтація верхній частині зразка, і він проходить в зазор між валком і щокою.



Рисунок 3.11 – Зразки після руйнування

При отриманні дрібної фракції, коли дробилися зразки кубічної форми зі стороною 20 мм з встановленим зазором між обертовим валком і нерухомою щогою 12 мм, то руйнування зразка відбувалося в кілька стадій.

Багатостадійний процес руйнування роздрібнюванню шматка описаний у другому розділі.

На рис. 3.12 наведені результати впливу величини розміру зазору на фракційний склад готового продукту, при руйнуванні однакових зразків з крейди кубічної форми зі стороною 30 мм на одновалкової дробарці.



зазор 16 мм



зазор 20 мм



зазор 25 мм

Рисунок 3.12 - Результати руйнування зразків в одновалковій дробарці

Проведено аналіз розмірів шматків готового продукту, отриманого на одновалковій дробарці, і результати представлені в таблиці 3.4 і рис.3.13.

Таблиця 3.4 - Результати аналізу процентного вмісту шматків по масі

Величина зазору між валком і нерухомою щогою, мм	Процентний вміст за масою шматків готового продукту в залежності від середнього розміру, %			
	розміри шматка до 3 мм	розміри шматка від 3 до 10 мм	розміри шматка від 10 до 16 мм	розміри шматка більш за 16 мм
16	15	25	50	20
20	10	15	30	50
25	5	10	10	75

З експериментів з дроблення зразків можна зробити висновок, що, чим більше розмір зазору між валком і нерухомою щогою, тим крупніше розмір фракції готового продукту. Якщо порівнювати результати дроблення в одновалковій дробарці, то при дробленні шматка зі стороною 30 мм в зазор між валком і нерухомою щогою - 25 мм, виходить менше переподрібнення, ніж при дробленні такого ж шматка в меншому зазорі. Пов'язано це з тим, що чим більше розмір зазору, тим менше будуть ступінь дроблення і кількість стадій руйнування зразка, тобто буде менше площин, за якими відбувається руйнування. Також при більшому зазорі шматок «простіше» захоплюється в зазор між валком і нерухомою щогою, що призводить до виключення зайвого стирання зразка о валок і до меншого переподрібнення.

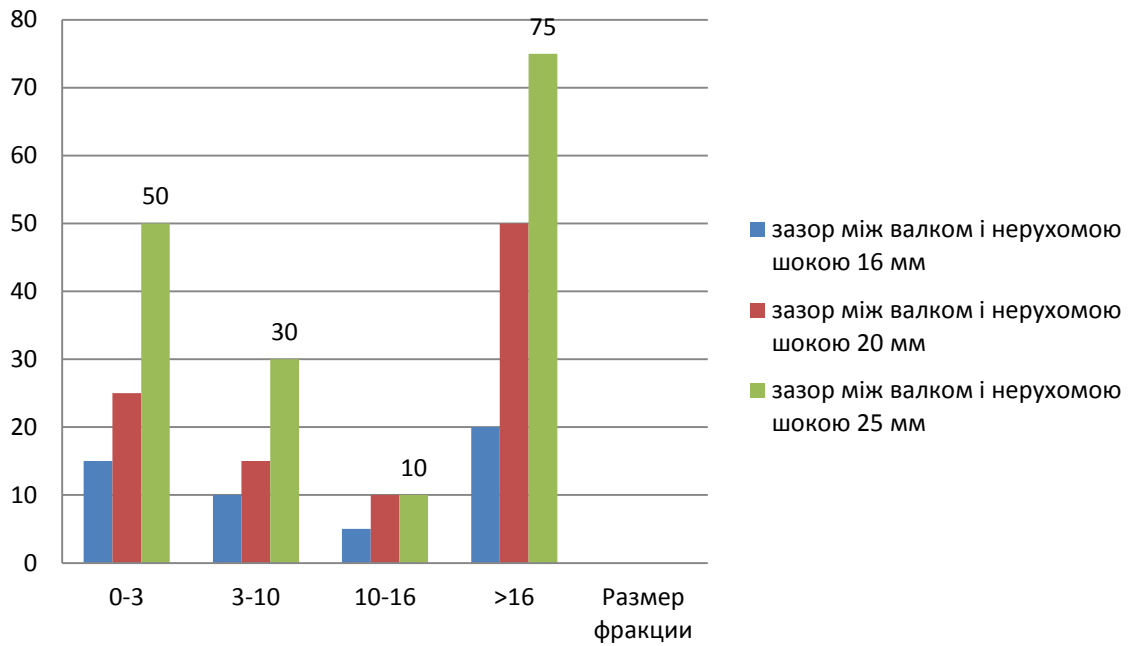


Рисунок 3.13 - Результати аналізу процентного вмісту шматків по масі

### 3.3 Вплив коефіцієнта тертя між подрібнювальним шматком і нерухомою шокою на мінімальний розмір зазору, при якому відбувається захоплення зразка

Для визначення впливу коефіцієнта тертя між шматком матеріалу і нерухомою шокою скористаємося формулою (2.7):

$$\frac{\pi}{2} - \alpha - \operatorname{arctg} \frac{1}{f_1} > \beta_2,$$

Звідки кут захвату  $\alpha$  дорівнює:

$$\alpha < \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{f_1} - \operatorname{arctg} f_2. \quad (3.1)$$

При підстановці формули (3.1) в вираз (2.99) визначається зазор між валком і нерухомою шокою:

$$a = D_{CB} - \frac{D}{2} [1 - \cos(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{1}{f_1} - \arctg f_2)]. \quad (3.2)$$

Випробування проведені для зразків кубічної форми зі стороною 40 мм з суміші цементу і піску в пропорції 1:1.

Кут тертя можна визначити дослідним шляхом [57]. Спосіб визначення кута тертя дуже простий і являє собою похилу поверхню, кут нахилу якої можна змінювати. Зафіксувавши кут нахилу поверхні, при якому поміщений на ній шматок матеріалу знаходиться в граничному стані спокою, і сила зчеплення досягає максимального значення, визначаємо кут тертя, дорівнює куту нахилу обраної поверхні.

Проведені заміри кута тертя між валком і шматком дробленого матеріалу  $\beta_1$  і виміри кута тертя між шматком дробленого матеріалу і нерухомою щогою  $\beta_2$ .

$$\beta_1 = 30^0, \quad \beta_2 = 15^0 \quad (3.3)$$

звідси відповідні коефіцієнти тертя рівні:

$$f_1 = \operatorname{tg} \beta_1 = \operatorname{tg} 30^0 = 0,57, \quad f_2 = \operatorname{tg} \beta_2 = \operatorname{tg} 15^0 = 0,27. \quad (3.4)$$

Після підстановки знайдених значень коефіцієнтів тертя в формулу (3.2), враховуючи, що діаметр валка  $D = 180$  мм, розміри шматка  $D_{CB} = 40$  мм, визначається мінімальний розмір зазору, необхідний для дроблення даного шматка:

$$a = 40 - \frac{180}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{1}{0,57} - \arctg 0,27 \right) \right] = 37 \text{ мм} \quad (3.5)$$

Щоб збільшити ступінь дроблення, необхідно зменшити коефіцієнт тертя між шматком і нерухомою щогою [48], для цього поверхню щого змочується водою, при цьому кут тертя:

$$\beta'_2 = 10^0, \quad (3.6)$$

тоді коефіцієнт тертя між подрібнювальним шматком і змащеною поверхнею нерухомої щого:

$$f'_2 = \operatorname{tg} \beta'_2 = \operatorname{tg} 10^0 = 0,18. \quad (3.7)$$

Після підстановки отриманого значення коефіцієнта тертя в формулу (3.2) визначається мінімальний розмір зазору між валком і змащеній нерухомою щогою, необхідний щоб роздрібнити шматок:

$$a = 40 - \frac{180}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{0,57} - \operatorname{arctg} 0,18 \right) \right] = 35 \text{ мм} \quad (3.8)$$

Отримані результати можна звести в таблицю 4.5.

Таблиця 3.5 - Вплив коефіцієнта тертя на мінімальний зазор

	$\beta_2$	$f_2$	$a$	$a, \text{ мм}$
Суха поверхня щого	$15^0$	0,27	$<15^0$	37
Змащена поверхня щого	$10^0$	0,18	$<20^0$	35

Після проведення випробувань для зразків кубічної форми зі стороною 40 мм з суміші цементу і піску в пропорції 1: 1 був проведений аналіз отриманих результатів, який показав наступне:



- При сухій поверхні щоки коефіцієнт тертя дорівнює 0,27 і мінімальний зазор, при якому відбувається захоплення зразка кубічної форми зі стороною 40 мм склав 37 мм, а при змазуванні поверхні водою коефіцієнт тертя дорівнює 0,18 і мінімальний зазор, при якому відбувається захоплення зразка, склав 35 мм, отже, чим менше коефіцієнт тертя між подрібнюваністю шматком і нерухомою щокою, тим більше кут захоплення і більше ступінь дроблення.

- Так як зі зменшенням коефіцієнта тертя між шматком дробленого матеріалу і щокою одновалкова дробарка здатна захопити шматок більшого розміру при незмінній величині розміру зазору, то, очевидно, що зміна коефіцієнта тертя впливає на ступінь дроблення.

- При зміні коефіцієнта тертя між шматком дробленого матеріалу і нерухомою щокою зміниться сила тертя. Оскільки крутний момент залежить від сили тертя між шматком і нерухомою щокою, то, відповідно, зміниться і величина дотичних напружень, що виникають в подрібнювальному шматку, що, в свою чергу, призводить до зміни значення еквівалентного напруження. Звідси випливає, що сила, необхідна на дроблення матеріалу, також зміниться за величиною. Таким чином, зміна коефіцієнта тертя між нерухомою щокою і шматком призведе до зміни величини крутного моменту і величини зусиль, необхідних на дроблення.

### 3.4 Визначення положення площини максимальних дотичних напружень

За формулою (2.16) кут, на який потрібно повернути вісь  $z$ , щоб вона збіглася з напрямом нормалі до першої головного майданчику:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sigma_1 + \sigma}{\tau},$$

де головне напруження на першій головному майданчику за формулою (2.14):

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} - \frac{\sigma}{2}.$$

Нормальне напруження, що виникає при дробленні шматка кубічної форми зі стороною 40 мм, виготовленого з цементно-піщаної суміші в пропорції 1:1, з урахуванням сили необхідної на дроблення певної емпіричним шляхом  $R_f = 7500$  Н (таблиця 4.2) за формулою

$$\sigma_1 = \frac{R_f}{D_{CB} \cdot L} = \frac{7500}{40 \cdot 40} = 4,68 \text{ МПа} . \quad (3.9)$$

За формулою (2.64) визначається дотичне напруження:

$$\tau = \frac{R_f \cdot (\operatorname{tg} \varphi + f_2)}{0,42 \cdot D_{CB}^2},$$

або

$$\tau = \sigma \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi + f_2}{0,42}. \quad (3.10)$$

При змащеній поверхні щоки коефіцієнт тертя між шматком і щокою дорівнює  $f_2' = \operatorname{tg} \beta_2' = \operatorname{tg} 10^\circ = 0,18$  (таблиця 4.5) і, приймаючи  $\varphi = 14^\circ$ , тоді дотичне напруження  $\tau$  дорівнює:

$$\tau = 4,68 \cdot \frac{0,18 + 0,25}{0,42} = 4,8 \text{ МПа} . \quad (3.11)$$

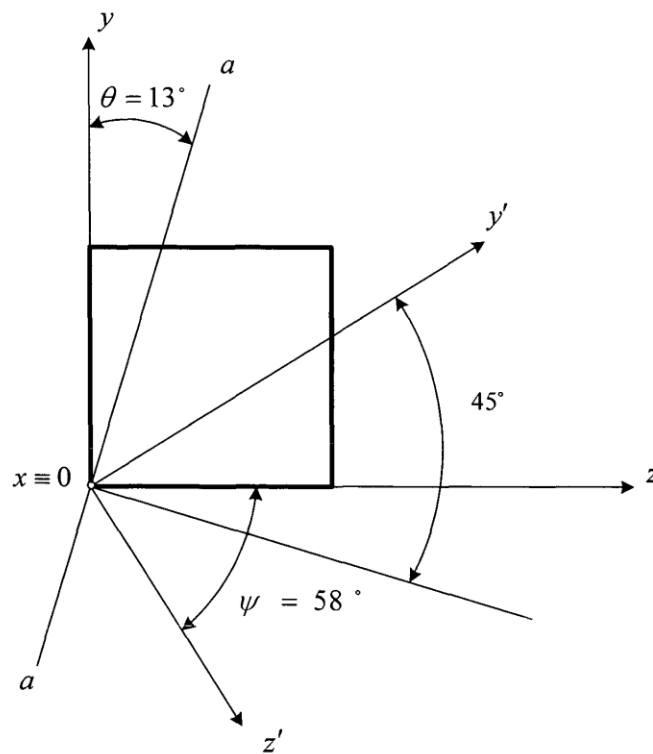
При підстановці отриманих значень нормального і дотичного напружень в формулу (2.14), визначається головне напруження на першу площадку:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sqrt{4,68^2 + 4 \cdot 4,8^2} - \frac{4,68}{2} = 3 \text{ МПа} . \quad (3.12)$$

Кут, на який потрібно повернути вісь  $z$ , щоб вона збіглася з напрямом нормалі до першої головного майданчику:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sigma_1 + \sigma}{\tau} = \frac{3 + 4,68}{4,8} = 1,6 \quad \text{або} \quad \psi = 58^\circ \quad (3.13)$$

Розрахункова площина максимальних дотичних напружень для виготовлених зразків кубічної форми (з цементно-пісчаної суміші і пропорції 1:1 буде проходити по лінії  $a-a$ , як показано на рис.3.13).



$z'$ ,  $y'$  - нормалі до головних майданчиків

Рисунок 3.13 - Положення нормалей до головних майданчиків

З рис.3.13 видно, що кут  $\psi$ , тобто кут відхилення лінії  $a-a$  від осі  $y$  дорівнює:

$$\Theta = \psi - 45^\circ = 13^\circ. \quad (3.14)$$

Значення кута  $\Theta$ , отримане в результаті проведених випробувань по руйнуванню зразків, коливається в межах  $10^\circ - 25^\circ$ .

Після підстановки формули (3.10) в вираз (2.14) головне напруження на першу площадку визначається наступним чином:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} \left( \sqrt{1 + 22,67(f_2 + \operatorname{tg} \varphi)^2} - 1 \right). \quad (3.15)$$

а вираз (2.16) набуває вигляду:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\frac{\sigma}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + 22,67(f_2 + \operatorname{tg} \varphi)^2} + 1 \right)}{\sigma \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi + f_2}{0,42}} = 0,21 \cdot \frac{\sqrt{1 + 22,67(f_2 + \operatorname{tg} \varphi)^2} + 1}{\operatorname{tg} \varphi + f_2}. \quad (3.16)$$

З аналізу формули (3.16) для розрахунку кута  $\psi$  можна зробити висновок, що кут  $\psi$  залежить від кута  $\varphi$ , який є функцією коефіцієнта тертя шматка про валок  $f_1$ , і коефіцієнта тертя між шматком дробленого матеріалу і щогою  $f_2$ . Для збільшення кута  $\psi$ , на який потрібно повернути вісь  $z$ , щоб вона збіглася з напрямом нормалі до першої головному майданчику необхідно зменшувати коефіцієнт тертя  $f_2$  і кут  $\varphi$ .

З формули (2.7) відомо, що

$$\varphi = \operatorname{arctg} f_1 - \alpha > \operatorname{arctg} f_2,$$

звідки випливає, чим менше  $\operatorname{arctg} f_1 - \alpha$ , тим більше кут  $\psi$ .

Як впливає з вище наведених міркувань, кут  $\Theta$ , що визначає положення площини максимальних дотичних напружень, буде збільшуватися при

зниженні коефіцієнта тертя між шматком дробленого матеріалу і щобою  $f_2$  і зменшенні різниці між  $\arctg f_1 - \alpha$ .

## ВИСНОВІКИ

1. На підставі проведеного силового аналізу показано, що в одновалковій дробарці на шматок дробленого матеріалу діють як стискаючі сили, що викликають в шматку дію нормальних напружень і крутний момент, що викликає дію дотичних напружень, тобто, в шматку створюється складний напружений стан. Захоплення роздрібнюваного шматка в зазор між валком і щогою здійснюється, якщо:

- кут тертя між шматком дробленого матеріалу і валком більше, ніж кут захоплення;

- кут, на який відхилена від горизонталі рівнодіюча сили тертя між шматком і валком і сили нормального тиску більше, ніж кут тертя між подрібнювальним матеріалом і нерухомою щогою.

2. Розроблено математичну модель процесу руйнування крихкого матеріалу під дією складного напруженого стану. Визначено, що при дробленні матеріалу, що проходить в кілька стадій, руйнування відбувається послідовно по площинах максимальних дотичних напружень і відбувається до тих пір, поки розмір новостворених шматків не стане менше, ніж зазор між валком і щогою.

3. Проведено порівняльний аналіз роботи дробарок стиснення, в результаті якого визначено, що продуктивність двовалкової дробарки більше, ніж продуктивність щогової і конусної дробарок при інших рівних умовах (однаковою мірою дроблення, зокрема ходів робочого органу і потужності приводу), відповідно, у двовалкових дробарок витрата енергії буде менше, ніж у щогових і конусних дробарок. Проведено порівняльний аналіз потужності приводу одно- і двовалкової дробарок. Установча потужність приводу одновалкової дробарки буде в 2 рази менше, ніж потужність двовалкової дробарки, відповідно, витрата енергії у одновалкової дробарки буде менше на ту ж величину.

4. Експериментально підтверджено, що руйнування подрібнювального шматка відбувається по площині дії максимальних дотичних напружень. Визначено, що для дроблення шматка матеріалу, в якому створюється складний напружений стан, сила, необхідна для його руйнування, в 2,3 - 2,8 разів менше, ніж сила, що прикладається при стисненні.

5. Встановлено, що для збільшення ступеня дроблення в одновалковій дробарці необхідно збільшувати коефіцієнт тертя між шматком дробленого матеріалу і валком і зменшувати його між шматком дробленого матеріалу і нерухомою щогою. Також для збільшення ступеня дроблення необхідно збільшувати діаметр валка і зменшувати зазор між валком і нерухомою щогою. Дане положення, визначене для одновалкової дробарки, не суперечить умові для двовалкової дробарки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Полторацкий Л. М., Барнаев И. А. Конкурентность черной металлургии в условиях кризисных явлений. Новокузнецк : Полиграфист, 2009. 129с.
2. Федоровский Н.В., Шанидзе Д.И. Агломерация железных руд: Справочник. Киев : Техника, 1991. 141 с.
3. Буглак И. А., Иванов Д. Е. Анализ исследований в области механизма разрушения твёрдых частиц. *STUDENT RESEARCH*: сборник статей VМеждународного научно-практического конкурса. Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение». 2019. С. 33-39.
4. Масленников В. А. Дробилки разрушающие материал сжатием. *Известия вузов. Горный журнал*. 1996. №10-11. С. 124-138.
5. ГОСТ 14916-82 Дробилки. Термины и определения.
6. Решения для горно-обогатительной промышленности. *Компания McLanahan* : веб-сайт. URL : [https://www.mclanahan.ru/?media\\_dl=2674](https://www.mclanahan.ru/?media_dl=2674) (дата звернення 01.12.2019).
7. Левченко О.А., Левченко Э.А., Зинченко А.М. Состояние и основные направления развития технического уровня конструкций одновалковых зубчатых дробилок. *Металлургические процессы и оборудование*. 2011. №1. С. 24 – 29.
8. Протасов Ю. И. Разрушение горных пород. Москва : Изд-во МГГУ, 2001. 453 с.
9. Протасов Ю. И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. Москва : Недра, 1985. 242 с.
10. Ксендзенко Л.С., Опанасюк А.А., Гнитпенко В.В. Периодическое распределение напряжений в сильно сжатых образцах. *Наука та технологія: крок в майбутнє* : матеріали II міжнар. наук.-практ. конф., (Дніпропетровськ, 1-15 берез. 2007 р.). Дніпропетровськ : Наука та освіта. 2007. Т. 5. С. 66-71.
11. Финкель В.М. Портрет трещины. Москва : Металлургия, 1989. 192 с.



12. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. Москва : Теплотехник, 2007. 672 с.
13. Борискин И.К., Арыков Г.А., Пыриков А.Н. Интенсивная механическая обработка агломерата. Теория, оборудование, технология . Москва : МИСИС, 1998. 248 с.
14. Журков С. Н. К вопросу о физической природе прочности. ФТТ, т. 22, вып. 11, 1980, с. 13-15.
15. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 328 с.
16. Пожидаев Ю.А., Салов И.А. Способ определения механических характеристик хрупких материалов при дроблении. *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2014. № 3. С. 102-105.
17. Клушанцев Б. В., Косарев А. И., Муйземнек Ю. А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. Москва : Машиностроение, 1990. 320 с.
18. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. Санкт-Петербург : Профессия, 2002. 320с.
19. Лагунова Ю.А. Дробимость хрупких материалов при разрушении их сжатием. *Известия вузов. Горный журнал*. 1996. №10-11. С. 121-124.
20. Грубачич В.П. Двухвалковые дробилки: Особенности и преимущества. *Цемент и его применение*. 2006. №2. С. 56-59.
21. Родин Р. А. О работе, расходуемой на дробление горных пород. *Известия вузов. Горный журнал*. 1987. № 6. С. 84-89.
22. Родин Р. А. Об определении работы дробления. *Известия вузов. Горный журнал*. 1992. № 3. С. 103-110.
23. Родин Р. А. О гипотезах дробления. *Известия вузов. Горный журнал*. 1989. №4. С. 71-78.
24. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей на прочность и долговечность. Москва : Машиностроение, 1985. 223 с.
25. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. Москва : Недра, 1981.

26. Бауман В. А., Клушанцев Б. В., Мартынов В. Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. Москва : Машиностроение, 1975. 351 с.
27. Бонд Ф. С. Законы дробления. *Труды Европейск. совещ. по измельчению*. Москва : Стройиздат, 1966. С. 195-208.
28. Ходаков Г. С. Физика измельчения. Москва: Наука, 1972.
29. Клушанцев Б. В. Расход энергии на дробление материала. *Строительные и дорожные машины*. 1994. №8. С. 20-21.
30. Мирко В.А., Кабанов Ю.А., Хлевный И.А. и Татаркин Н.И. Промышленное применение рекомендаций по измельчению топлива, используемого при агломерации. *Сталь*. 1998. №7. С. 7-12.
31. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. Москва : Наука, 1974. 640 с.
32. Шутов А.В. Анализ, двухнелинейных моделей хрупкого разрушения твердых тел. *Прикладная механика и техническая физика*. 2004. Т. 45, № 6. С. 95-102.
33. Ракишев Б.Р., Кушпанов М.С. Математическая модель энергоемкости разрушения горных пород. *Известия вузов. Горный журнал*. 1990. № 12. - С. 50-53.
34. Степанов А. Л., Фролов А. В., Кочетков П. А. Влияние модуля упругости материала и мелющих тел на процесс избирательного измельчения руд в шаровых мельницах. *Известия вузов. Горный журнал*. 1990. № 12. С. 84-87.
35. Родин Р. А. О причинах и условиях образования зерен лещадной формы. *Сб. трудов «ВНИИстройдормаш»*. 1980. №87. С. 62-72.
36. Муйземнек Ю. А., Муйземнек А. Ю. По поводу статей д-ра техн наук Р.А. Родина о разрушении горных пород. *Известия вузов. Горный журнал*. 1995. № 7. С. 122-125.
37. Рундквист В. А. Общая форма законов дробления. *НТБ Механобра*. 1956. №2. С. 23-27.

38. Загудаев А. И., Косарев А. И., Овчаренко Н. С. Исследование нагрузок в щековых дробилках. *Тр. ВНИИСтройдормаша*. 1987. № 109. С. 75- 78.
39. Белов Н.Н. Исследование процессов деформирования и разрушения хрупких материалов. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2001. Т. 7, № 2. С. 131-142.
40. Зимин А. И., Говоров А. В., Канусик Ю. П. Расчет частоты вращения рабочих органов валковых дробилок. *Известия вузов. Горный журнал*. 1998. №11-12. С. 136-138.
41. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва : Недра, 1980.
42. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учебник для вузов. Москва : Недра, 1985. 285 с.
43. Епифанцев Ю. А., Сединин С. П. Исследование влияния геометрических параметров рифлений поверхностей валков на процесс дробления в валковой дробилке. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1983. №4. С. 136-138.
44. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учебное пособие, Тамбов: издательство Тамбовского Государственного Технического Университета, 2004. 75с.
45. Булычев В.В. Дробильные машины. Конструкция, эксплуатация, ремонт. Свердловск : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии. 1957. 209 с.
46. Назаров В.И. Переработка и утилизация дисперсных материалов и твердых отходов : учебное пособие. Москва : Альфа-М, Инфра-М. 2014. 464 с.
47. Петрушов С.Н., Босый В.Л., Капуста А.И., Полосухин А.П. Совершенствование технологии подготовки агломерационного топлива. *Металлург*. 1982. №5. С.9-10.
48. Патент РФ 2353429, Тарасов Ю.Д.. Устройство для измельчения окомкованных частиц цемента, Бюл. №12, 2009.
49. Патент РФ 2167717, Тарасов Ю. Д., Прялухин А. Ф., Машина для

- исправления формы зерен щебня, Бюл. №15, 2001.
50. Патент РФ 2173579, Прялухин А. Ф., Тарасов Ю. Д., Машина для исправления формы зерен щебня, Бюл. №26, 2001.
51. Патент РФ 2430783, Никитин А. Г., Сахаров Д. Ф., Прилукова Н. З., Способ дробления в валковой дробилке, Бюл. №28, 2011.
52. Патент РФ 2403087, Никитин А. Г., Люленков В. И., Бойко Д. Ю., Сахаров Д. Ф., Валковая дробилка, Бюл. №31, 2010.
53. Никитин Е.М. Теоретическая механика. Москва : Наука, 1977. 416 с.
54. Никитин А. Г., Сахаров Д. Ф. Энергосберегающая технология дробления хрупких материалов. *Тезисы докладов XXX Российской школы, посвященной 65-летию Победы*, Миасс, 2010, С. 45.
55. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов. Москва : Машиностроение, 1986. 328 с.
56. Клушанцев Б. В. Валковые дробилки. Их параметры и метод расчета мощности. *Строительные и дорожные машины*. 1982. №8. С. 23-24.
57. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т.1. Москва : Машиностроение, 1987. 440 с.
58. Клюканов А.В. Исследование механических характеристик хрупких тел при испытании на сжатие. *Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия*. 2006. № 4. С. 58-65.
59. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Сравнительный анализ энергозатрат дробилок, работающих на сжатие. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2011. №4. С. 56-57.
60. Левченко О.О., Галич В.А. Моделирование процессу роботи одновалкової зубчастої дробарки. *Вісник Криворізького технічного університету*. Кривий Ріг: КТУ, 2006. № 13. С. 100 – 103.
61. Яблонский А.А. Курс теоретической механики : Учебник для вузов. Изд. 13-е, исправленное. Москва : Интеграл-Пресс, 2006. 608 с.
62. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 276 с.

63. Зажигаев Л.С., Китьян А.А., Романников Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. Москва : Атомиздат, 1978. 232 с.
64. Протасов К.С. Статистический анализ экспериментальных данных. Москва : Мир, 2005. 142 с.

# ДОДАТОК А

Науково-дослідна частина  
Наукове товариство студентів,  
аспірантів, докторантів і молодих вчених

ЗБІРНИК  
наукових праць студентів,  
аспірантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2019»

Том V

«Секції Криворізького факультету ЗНУ»  
«Секції Інженерного інституту ЗНУ»

Запоріжжя  
2019

Звичайно на штабу в першій клітці діє тільки передній натяг, а в останній та проміжній клітках діє передній і задній натяг. Між клітками натяг створюється за рахунок неузгодженості швидкостей, а передній натяг в останній клітці – моталкою.

При малій ступені деформації, зерна гарячекатаного металу майже не дробляться, і далі зростання зерна не спостерігається, тому що відсутня рекристалізація. При збільшенні ступеня деформації зерна фериту дробляться і витягаються в напрямку прокатки, відбувається розрив міжзеренної речовини, границі зерен майже зникають, цементит також витягається уздовж прокатки.

Межа міцності і границя текучості холоднокатаної відпаленої сталі зростає зі збільшенням ступеня деформації. При холодному прокатуванні на практиці сумарне обтиснення становить 50...80 %, а одержання необхідних механічних властивостей забезпечують підбором оптимального хімічного складу сталі і режиму відпалу.

Сумін Микита  
магістрант 1-го курсу фак-ту металургії  
Наук. кер.: к.т.н., доц. Шевченко І.А.

## ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Процес зменшення розмірів твердого тіла від початкової (вихідної) крупності до необхідної шляхом впливу зовнішніх сил називається дробленням або помелом, а машини, які застосовуються для цих цілей - дробарками або млинами.

Залежно від кінцевої крупності шматків матеріалу розрізняють наступні основні види цього процесу:

- дроблення (велике, середнє, дрібне);
- помел (грубий, тонкий, надтонкий).

У деяких випадках процес дроблення є підготовчим, і одержуваний продукт направляється на подальшу переробку. В інших випадках в результаті дроблення виходить товарний продукт, тобто, процес дроблення має самостійне значення. Залежно від характеру руйнівного навантаження дроблення шматків породи може відбуватися за рахунок механізму розколювання або роздавлювання [1, 2]. У першому випадку, площа прикладання навантаження істотно менше розмірів шматка. У місцях прикладання навантаження формуються два ядра ущільнення. Поперечне розширення ядер викликає напруження розтягу, під дією яких виникає і розвивається поздовжня тріщина. В результаті, відбувається розколювання шматка. При прикладенні лінійного зосередженого навантаження (розколювання клинами) зразок розпадається на дві частини.

При роздавлюванні руйнівне навантаження рівномірно розподіляється по площі шматка. Руйнування при цьому визначається дотичними напруженнями,

максимальна величина яких досягається на ділянках, орієнтованих під кутом  $45^\circ$  до напрямку дії стискаючих зусиль. Внаслідок цього, при руйнуванні шматка, як правило, утворюються два конуса. Подрібнювальний матеріал між ними дрібно кропиться.

Така картина спостерігається при повільному прикладенні навантаження до ізольованого шматка матеріалу. В реальних умовах дроблення визначається різним поєднанням механізмів розколювання і роздавлювання.

У промисловості використовуються дробарки для руйнування матеріалів стисненням (валкові, шоківі, конусні) і ударом (роторні, молоткові)..

У валкових дробарках матеріал раздавлюється між двома валками, що обертаються один назустріч іншому, часто валки обертаються з різною частотою, і тоді роздавлювання матеріалу поєднується з його стиранням.

Процес руйнування твердих матеріалів ударом і процес руйнування стисненням відрізняються один від одного і вимагають різних енерговитрат, необхідних для руйнування матеріалу (руйнування стисненням вимагає півторакратно витрат енергії, в порівнянні з руйнуванням ударом [3]).

Дроблення окремого шматка твердого матеріалу в дробарках стискаючого двостороннього впливу відбувається незалежно від знаходження в камері дробарки інших шматків. Такі процеси прийнято називати адитивними, стосовно до дробарки це положення доведено І. Б. Шлаїном [4].

Кількість енергії, необхідна на подрібнення будь-якого матеріалу до певного розміру, залежить від багатьох чинників: розміру, форми, взаємного розташування шматків, міцності, крихкості, однорідності вихідного матеріалу, його вологості, виду і стану робочих поверхонь машини та інше. Тому встановити аналітичну залежність між витратою енергії на подрібнення, фізико-механічeskими властивостями матеріалу, що подрібнюється і особливостями процесу можна лише в найзагальнішому вигляді [5].

У двовалковій дробарці на дроблений матеріал діють стискаючі сили і, відповідно, виникають нормальні напруження, межа міцності яких майже в два рази більше, ніж межа міцності при дії дотичних напружень. Для того, щоб зменшити витрату енергії на дроблення матеріалу в порівнянні з двовалковою дробаркою необхідно, щоб на дроблений матеріал діяли не тільки нормальні напрути, а й дотичні.

Такий процес дроблення може забезпечити одновалкова дробарка. Якщо провести силовий аналіз дроблення матеріалу в одновалковій дробарці, то буде видно, що в процесі роботи одновалкової дробарки виникають не тільки сили стиснення на дроблений шматок, але і крутний момент, в результаті якого виникають дотичні напруження.

#### Література

1. Протасов Ю. И. Разрушение горных пород. - М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 453
2. Протасов Ю. И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. - М.: Недра, 1985. - 242 с.
3. Лагунова Ю. А. Дробимость хрупких материалов при разрушении их сжатием//Изв. вузов. Горный журнал. 1996. №10-11. С. 121-124.



ДОДАТОК Б

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний інститут

## МАТЕРІАЛИ

**XXIV науково-технічної конференції  
студентів, магістрантів, аспірантів,  
молодих вчених та викладачів**

*Металургія як основа сучасної  
промисловості*

*Том I*

26-29 листопада 2019 р.

Запоріжжя  
2019

Смородін В. Р., ст. гр. 8.1339  
Шевченко І.А., доцент, канд. техн. наук – науковий керівник

### ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБ'ЄКТУ ОБРОБКИ В УМОВАХ ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Інженерний інститут Запорізького національного університету, кафедра МО

Одним з найбільш поширених та ефективних засобів інтенсифікації механічних процесів є використання «вібраційного поля». Внаслідок впливу такого технологічного фактора має місце інтенсивний як циркуляційний, так і відносний рух частинок продукції в робочій камері по найрізноманітніших та складних траєкторіях руху. Крім того, можливість регулювання параметрів вібрації в широких межах дозволяє впливати як на значні об'єми продукції, так і на досить локалізовані її області. При дії вібрації на сипке середовище в ньому відбуваються перетворення, особливості яких обумовлюються інтенсивністю коливань. У міру збільшення інтенсивності вібрації, в межах амплітудних значень прискорень, що не перевищують прискорення вільного падіння, сипуче тіло набуває рухливості, псевдотекучості. Такий стан сипкого середовища прийнято називати станом псевдозрідження. У цьому стані зчеплення між частинками слабшає, вони підходять один до одного, зменшується число пор (досягається більш щільне укладання частинок), сипке середовище ущільнюється. Такий стан оброблюваного середовища характеризується створенням сприятливих умов для зниження витрат на подрібнення матеріалу внаслідок зменшення величини внутрішнього тертя [1].

Отже, універсальність вібраційної обробки полягає в тому, що вона є найбільш ефективним серед механічних методів загальним засобом регулювання динамічного стану продукції при здійсненні різноманітних технологічних задач [2]. Так, унаслідок коливного руху робочих органів вібромашини відбуваються достатньо складні траєкторії руху частинок робочого середовища та запасається значна потенціальна енергія, отримана внаслідок якісної зміни характеру положень рівноваги структурних елементів системи, розділення за їх фізико-механічними властивостями частинок продукції, інтенсивного перемішування маси та сепарації матеріалу, руйнування структури матеріалу та інші віброефекти, що використовуються в широкому спектрі переробних технологій.

#### Література:

1. Моргулис М. Л. Вибрационное измельчение материалов : Москва : Госстойиздат, 1957. 107 с.
2. Партон В.З., Борисковский В.Г.. Динамическая механика разрушения : Москва : Машиностроение, 1985. 263 с.

Стрельцов Д.О., ст. гр. МБ-18мз,  
Шевченко І.А., доцент, канд. техн. наук – науковий керівник

### ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ГРАНУЛОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ І ТЕОРІЇ ДРОБЛЕННЯ

Інженерний інститут Запорізького національного університету, кафедра МО

Гірські породи мають явно виражену властивість крихкості, тобто мінімальний розмір площадки текучості на діаграмі випробувань на стиснення зразків гірської породи.

Сумін М.А., ст. гр. МБ-18мз,  
Шевченко І.А., доцент, канд. техн. наук – науковий керівник

**ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ В ОДНОВАЛКОВІЙ ДРОБАРЦІ НА МІНІМАЛЬНИЙ  
РОЗМІР ЗАЗОРУ ДЛЯ ЗАХОПЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ**  
Інженерний інститут Запорізького національного університету, кафедра МО

Для визначення впливу коефіцієнта тертя між шматком матеріалу і нерухомою шокою користаємося формулою:

$$\frac{\pi}{2} - \alpha - \operatorname{arctg} \frac{1}{f_1} > \beta_2,$$

Звідки кут захвату  $\alpha$  дорівнює:

$$\alpha < \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{f_1} - \operatorname{arctg} f_2. \quad (1)$$

Зазор між валком і нерухомою шокою визначається по формулі:

$$a = D_{CB} - \frac{D}{2} [1 - \cos(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{f_1} - \operatorname{arctg} f_2)]. \quad (2)$$

Кут тертя можна визначити дослідним шляхом. Спосіб визначення кута тертя дуже простий і являє собою похилу поверхню, кут нахилу якої можна змінювати. Зафіксувавши кут нахилу поверхні, при якому поміщений на ній шматок матеріалу знаходиться в граничному стані спокою, і сила зчеплення досягає максимального значення, визначаємо кут тертя, дорівнює куту нахилу обраної поверхні.

Проведені заміри кута тертя між валком і шматком дробленого матеріалу  $\beta_1$  і виміри кута тертя між шматком дробленого матеріалу і нерухомою шокою  $\beta_2$ .

$$\beta_1 = 30^\circ, \quad \beta_2 = 15^\circ, \quad (3)$$

звідси відповідні коефіцієнти тертя рівні:

$$f_1 = \operatorname{tg} \beta_1 = \operatorname{tg} 30^\circ = 0,57, \quad f_2 = \operatorname{tg} \beta_2 = \operatorname{tg} 15^\circ = 0,27. \quad (4)$$

Після підстановки знайдених значень коефіцієнтів тертя в формулу (2), враховуючи, що діаметр валка  $D = 180$  мм, розміри шматка  $D_{CB} = 40$  мм, визначається мінімальний розмір зазору, необхідний для дроблення даного шматка:

$$a = 40 - \frac{180}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{0,57} - \operatorname{arctg} 0,27 \right) \right] = 37 \text{ мм} \quad (5)$$

Щоб збільшити ступінь дроблення, необхідно зменшити коефіцієнт тертя між шматком і нерухомою шокою, для цього поверхню шоки змочується водою, при цьому кут тертя:

$$\beta_2' = 10^\circ, \quad (6)$$

тоді коефіцієнт тертя між подрібнюваністю шматком і змашеній поверхнею нерухокої шоки:

$$f_2' = \operatorname{tg} \beta_2' = \operatorname{tg} 10^\circ = 0,18. \quad (7)$$

Після підстановки отриманого значення коефіцієнта тертя в формулу (2) визначається мінімальний розмір зазору між валком і змашеній нерухомою шокою, необхідний щоб розділити шматок.