

## Оцінка конструктивних параметрів вертикальних валкових млинів при помелі цементів та гранульованих шлаків

Василь Марач, аспірант<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0003-9457-6042), Михайло Губчик, аспірант<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0008-4760-3884), Микола Клименко, к.т.н., доцент, завідувач каф.МОТП<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-6166-8966)

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Україна

### АНотація

Наведено результати дослідження конструктивних параметрів вертикальних валкових млинів, що використовуються при помелі цементу та шлаку. Розглянуті показники оцінки ефективності процесу помелу для різних конструкцій валкових млинів. Поданий аналіз особливостей конструкції млинів, які випускаються провідними виробниками світу.

*Ключові слова:* вертикальний валковий млин, VRM, енерговитрати, потужність процесу помелу, помольний стіл, валок.

### 1. ВСТУП

Вертикальні валкові млини (Vertical Roller Mills, VRM) є важливими пристроями в сучасній промисловості, особливо в цементній, гірничій та енергетичній галузях. Їх застосовують для помелу сировинних матеріалів, цементу, вугілля, вапна, гіпсу та інших матеріалів. На сьогодні вертикальні валкові млини стали провідною технологією для помелу шлаків у цементній та металургійній промисловості, оскільки шлаковий цемент (або добавка до цементу з доменного шлаку) є важливим матеріалом, що забезпечує високу міцність та стійкість до агресивних середовищ.

З огляду на екологічні вимоги використання шлаку у виробництві цементу сприяє зменшенню викидів CO<sub>2</sub>, оскільки знижується потреба у видобутку сировинних матеріалів, таких як вапняк. Це робить цей напрямок особливо перспективним у контексті глобальних екологічних ініціатив та зусиль з декарбонізації.

Крім того, шлаковий цемент, завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, стає все більш популярним у будівництві, особливо в країнах з активним розвитком інфраструктури, а зростання попиту на шлаковий цемент стимулює розвиток технологій для їх обробки. Додатково треба зазначити, що нестача цементу в повосенний час оцінюється у, щонайменше, 4-5 разів.

### 2. МЕТА

Дослідити особливості конструктивного виконання та конструктивні параметри вертикальних валкових млинів. Встановити енерговитрати процесу помелу та основні напрямки зі зниження енергоємності помелу шлаків.

### 3. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Стаття [1] детально описує переваги вертикальних валкових млинів над кульовими млинами з точки зору енергетичної ефективності. Автори проводять порівняння між різними методами подрібнення та показують, що вертикальні валкові млини можуть скоротити споживання електроенергії до 30-50% на тону продукту. Основна увага приділена енергозбереженню за рахунок оптимізації тиску валків і повітряного потоку в системі.

В роботі [2] автор досліджує механізми стиснення матеріалів у валкових млинах. Основна увага приділена вивченню сил, що діють на частинки матеріалу під час їхнього подрібнення між валками та столом. Автори використовують математичні моделі для прогнозування впливу різних параметрів (тиск, швидкість обертання) на кінцеву дисперсність продукту.

Стаття [3] зосереджена на застосуванні методів обчислювальної механіки (CFD) для симуляції повітряних потоків у валкових млинах. Дослідження показують, як змінюється відокремлення дрібних частинок залежно від швидкості та напрямку повітряних потоків. Метою дослідження є підвищення ефективності поділу матеріалу для оптимізації процесу подрібнення.

У статті [4] розглядається використання нових композитних матеріалів для валків і столів вертикальних валкових млинів. Автори пропонують використання полімер-металевих композитів, які мають вищу зносостійкість порівняно зі стандартними сплавами. Дослідження також демонструє, як нові матеріали можуть знизити витрати на обслуговування та покращити тривалість служби млинів.

У дослідженні [6] проаналізовано зношування робочих елементів валкових млинів, таких як валки та помельний стіл. Автори порівнюють матеріали, що використовуються для виробництва валків, і пропонують нові композитні матеріали для підвищення їх зносостійкості. Також досліджується вплив робочих умов на зношування, як-от температура і швидкість обертання.

### 4. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Вертикальні валкові млини (Рис. 1) застосовують стискальну силу за допомогою валків, що натискають вниз на обертовий шліфувальний стіл. Матеріал, що подрібнюється, подається в центр розмельного поворотного столу через живильний жолоб. Звідти він відцентровими силами подається під валки і, утворюючи шар матеріалу, зазнає руйнування, а потім перетікає через край розмельного столу. Потік повітря, що піднімається через отвори по периметру поворотного столу, підхоплює і транспортує цей матеріал вгору до класифікатора, де готовий продукт продовжує підніматися вгору та виходить із млина, тоді як грубі частинки осаджуються вниз і повертаються до млина для подальшого помелу. Дуже грубі частинки, які занадто важкі, для їх піднімання повітряним потоком, виходять з

нижньої частини млина і потребують механічного транспортування назад для подачі до млина (Рис. 2). Після виходу з млина дрібний продукт проходить через рукавний фільтр або циклон та рукавний фільтр, щоб відокремити тверді частинки від потоку повітря. Певного поширення набули конструкції, де класифікатор грубого помелу вилучає надмірний продукт, який вже не повертається на млин. Це дає змогу використовувати систему з двома продуктами, де дрібні фракції вилучаються через перелив класифікатора, а основна частина продукту через нижній потік за допомогою так званого екстрактора крупи.

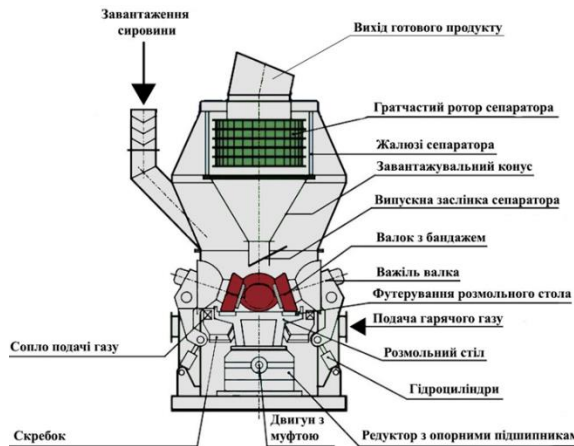


Рисунок 1. Конструкція вертикального валкового млина

Помел матеріалу у вертикальних валкових млинах досягається шляхом стиснення та зсуву у шарі частинок; поверхневий контакт між частинками розподіляє напруження в шарі матеріалу, що змелюється. При застосуванні достатньої величини напруження утворюються мікротріщини. У шарі змелювання є кілька точок контакту, де на частинки чиниться тиск. Компресійне подрібнення з регульованою часткою зсувних зусиль призводить до енергоефективного зменшення розміру порівняно з барабанными млинами.

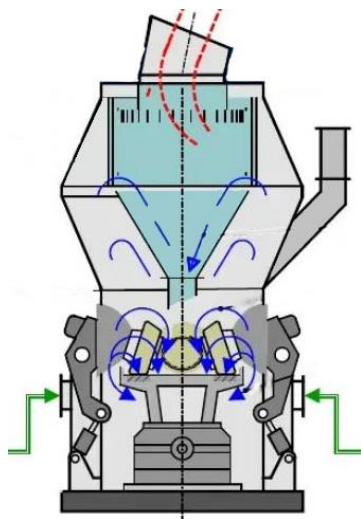


Рисунок 2. Схематичне зображення потоку матеріалу при помелі у вертикальних валкових млинах

Дослідженнями [2], виконаними на різних видах змелюваного матеріалу, залежність, яка визначає споживання енергії у вертикальних валкових млинах, може бути записана у вигляді:

$$N = Kt \cdot A \cdot z \cdot V \cdot p, \quad (1)$$

де  $Kt$  – тиск на матеріал при помелу (500-700 кН/м<sup>2</sup>);

$A = D_{валк} \cdot W_{валк}$  – площа проєкції одного валка;

$D_{валк}$  – діаметр валка;

$W_{валк}$  – ширина валка;

$z$  – кількість валків;

$V$  – лінійна швидкість розмольного стола під валком;

На основі аналізу технічної документації існуючих конструкцій млинів були визначені величини питомої потужності валкових млинів та їх питомої металоемності. Відповідно до значень встановленої потужності двигунів питома потужність складає від 8,2 до 15 кВт·год/т, де більші значення відповідають млинам з меншою кількістю валків з меншим діаметром поворотного стола, менші – млинам з 4 або 6 валками при діаметрі стола 5,6 м.

## 5. ВИСНОВКИ

Виконаний аналіз вертикальних валкових млинів відображає значний прогрес у вдосконаленні цих установок. Основні напрями поточних досліджень включають підвищення енергоефективності, зниження зношуваності робочих елементів, моделювання процесу подрібнення, а також впровадження інноваційних матеріалів і технологій. Особлива увага приділяється впливу різних параметрів процесу на енерговитрати та можливості їх оптимізації.

Порівняння валкових млинів з іншими типами млинів, дозволяє побачити їх явні переваги в енергоспоживанні.

## Список літератури

- [1] John Smith, Mark Davis. Energy-efficient grinding with vertical roller mills. *Cement and Concrete Research*, 2019. 123.
- [2] Breaking Down Energy Consumption in Industry Grinding Mills. Bouchard, J, et al. 4, s.l.: *CIM Journal*, 2019, Vol. 10, P. 157-164.
- [3] Emily Thompson, George Brown. Numerical simulation of airflow in vertical roller mills: Optimization for material separation. *Powder Technology*. 2020. Vol. 376. P. 104-112.
- [4] Hans Müller, Friedrich Schiller. Material bed compression in vertical roller mills: Insights into comminution mechanisms. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 126. P. 86-94.
- [5] Schaefer, H. V. Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals. *Minerals Engineering*. 2001. No. 14, Vol. 10. P. 1155-1160.
- [6] Jung O. Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*. 2000. Vol. 31(9). P. 252-261.