

УДК 621.926

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0306>**Микола Клименко**

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів

Київський національний університет будівництва і архітектури,

просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6166-8966>),

e-mail: klymenko.mo@knuba.edu.ua

Василь Марач,

аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури,

просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9457-6042>

e-mail: marach.vm@knuba.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ПОМЕЛУ ЦЕМЕНТУ ТА ГРАНУЛЬОВАНИХ ШЛАКІВ

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто конструктивні особливості вертикальних валкових млинів, які використовуються для помелу цементу та гранульованих шлаків. Зроблено аналіз основних елементів конструкції, таких як валки, помольні столи та системи приводу, з акцентом на їх вплив на продуктивність та якість помелу. Досліджено як історію зміни конструкцій валкових млинів, так і впровадження новітніх інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесу подрібнення, зменшення енергоспоживання та поліпшення експлуатаційних характеристик обладнання. Визначено переваги застосування вертикальних валкових млинів у порівнянні з традиційними технологіями помелу при виробництві цементу та шлаколузних матеріалів.

Ключові слова: вертикальні валкові млини, помел гранульованих шлаків, системи приводу, продуктивність млинів, енергоефективність, новітні інженерні рішення, експлуатаційні характеристики.

1. Постановка проблеми. Вертикальні валкові млини (Vertical Roller Mills, VRM) на сьогодні є важливим обладнанням в цементній, гірничій та енергетичній галузях промисловості. Їх застосовують для помелу як сировинних матеріалів, так і для цементу, шлаку, вугілля, вапна, гіпсу тощо. На даний час вертикальні валкові млини стали провідною технологією для помелу шлаків у цементній промисловості, оскільки шлаковий цемент (або добавка до цементу з доменного шлаку) є важливим матеріалом, що забезпечує високу міцність та стійкість до агресивних середовищ.

Одним з ключових викликів, пов'язаних з даним устаткуванням, є розробка конструкцій млинів, які забезпечують максимальну продуктивність при мінімальному споживанні енергії. Енергоефективність є критичним фактором для процесів промисловості будівельних матеріалів. Тому важливо дослідити шляхи зменшення енергоспоживання під час помелу, включаючи вдосконалення систем приводу та автоматизації процесів. Це включає пошук оптимальної форми валків та помольних столів, а також дослідження з проблем підвищення зносостійкості робочих елементів, що потребує застосування новітніх матеріалів або покриттів для зменшення їх зносу, оскільки вертикальні валкові млини працюють у складних умовах високого тертя та ударних навантажень. При цьому вертикальні млини часто піддаються значним вібраціям під час експлуатації, що може впливати на їх роботу та термін служби. Отже, вагомим завданням є розробка конструкцій, що зменшують вібраційні навантаження.

Важливим аспектом також є досягнення рівномірного помелу цементу та шлаків.

Різна фракція помелу може впливати на якість кінцевого продукту, тому потрібно визначити параметри, що сприяють рівномірному помелу за мінімальних втрат матеріалу. Враховуючи, що вертикальні валкові млини використовуються для помелу різних матеріалів (цементу, гранульованих шлаків, шлаколузних цементів), важливим завданням є розробка універсальних конструкцій, які будуть ефективно працювати з різними типами сировини. Крім того, помел цементу та шлаків супроводжується викидами пилу, а отже необхідно враховувати питання зменшення впливу на довкілля шляхом впровадження технологій пиловловлювання та зниження викидів.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Помольні валкові агрегати високого тиску (HPGR) у замкнутому контурі з повітряною класифікацією знайшли певне використання в цементній промисловості з 1985 року для ефективного первинного помелу за рахунок зниження вартості електроенергії, а також збільшення потужності, при цьому створюючи високоякісний продукт розміром до 25 мкм [3]. Широковідома конструкція вертикальних валкових млинів (VRM) стала доступною з початку 1900-х років і є загальноприйнятою технологією в цементній, енергетичній промисловості та промисловості переробки корисних копалин. Вертикальні валкові млини визнані одними з найефективніших доступних на даний момент пристроїв для помелу та можуть використовуватися для одночасного помелу і сушіння матеріалів, таких як вапняк, негашене вапно, цементна сировина, тальк, боксит, магнезит, фосфат, польовий шпат, барити, графіт і вугілля. Домінуючим використанням вертикальних валкових млинів є сировина для виробництва цементу та помелу вугілля, але є також чимало прикладів використання VRM у гірничій промисловості: Schaefer в своїй роботі [2] описує використання вертикальних валкових млинів для помелу фосфату, тоді інші повідомляють про застосування VRM при помелі мідного, залізного та олов'яного шлаку.

Jankovic A., Ozer Ç. в роботі [1] дослідили новітні технології сухого помелу мінеральних матеріалів і руд у помольних валкових апаратах високого тиску (HPGR) та вертикальних роликів млинах (VRM). Оскільки видобувна промисловість стикається з проблемами високої вартості енергії, дефіциту води та суворішими екологічними вимогами, ці технології розглядаються як енергоефективна альтернатива традиційним методам помелу. У статті проводиться пілотне тестування обох технологій на базальті. Результати цього та інших [4] досліджень показують значну економію енергії в порівнянні з кульовими млинами: HPGR споживає на 20-30% менше енергії, а VRM – на 10-30% залежно від типу.

У статті [5] Lucas R.D. Jensen, Erling Fundal та Per Møller досліджували механізм зношування зносостійких частин вертикальних валкових млинів під час помелу сировинних матеріалів. Дослідження охоплювало макроскопічний і мікроскопічний аналіз зношених частин, а також лабораторні експерименти, що імітують процеси зносу. Використовуючи прозорі вали і столи, дослідники спостерігали рух частинок у шарі матеріалу під час подрібнення, що дозволило виявити зони з високими навантаженнями та деформаціями. Основний механізм зношування – це двокорпусне абразивне стирання, яка спричиняє інтенсивне зношування в зонах високого тиску. Аналіз мікроструктури показав, що тріщини під поверхнею зносостійкого шару валків викликають відшарування цих шарів від основного масиву матеріалу.

Jung O. у своєму дослідженні [6] вертикальних роликів млинів, що використовуються в цементній промисловості для помелу цементної сировини, пуцолану і доменного шлаку, а також для остаточного помелу цементу, наводить дані щодо зношування і зазначає, що втрати зносостійких поверхонь тертя можна мінімізувати шляхом вибору матеріалів для захисту від зносу, таких як легований чавун, підбір правильної форми та розмірів деталей, що зношуються, зменшення частки високоабразивних компонентів тощо. Ці заходи подовжують термін служби деталей, що зношуються, і забезпечують ефективне змелювання дуже абразивних вихідних матеріалів.

У роботі [7] Kalyagina N. було проведено оцінку працездатності млина з гладкими тарілчастими валками. У процесі дослідження було виявлено причину руйнування секторів млина виробництва компанії FLSmidth. Проведене дослідження виявило причини руйнування деталей валкового млина: при одночасному впливі робочого навантаження та зміщення секторів, що виникає через інтенсивне зношування, сумарні еквівалентні напруження перевищують значення межі витривалості при циклічному навантаженні. Отже, відбувається накопичення втомлюваного руйнування матеріалу, формування та зростання тріщин, що негативно позначається на працездатності млина.

3. Мета роботи. Встановити вплив конструктивного виконання вертикальних валкових млинів на ефективність процесу помелу цементу і шлаків.

4. Матеріали та методи. Для розуміння сучасних тенденцій розвитку вертикальних валкових млинів розглянемо основні етапи створення, розвитку та зміни конструкції таких машин для помелу цементу, шлаків та вугілля, які можна умовно можна поділити на кілька ключових періодів.

Перше покоління млинів (кінець XIX – початок XX століття). Винахід валкових млинів відбувся на межі століть як відповідь на необхідність підвищення ефективності помелу матеріалів. Перші конструкції вертикальних млинів ґрунтувалися на принципі роздавлювання матеріалу між роликками та робочою поверхнею (столом). Ці млини були базової конструкції і призначалися для помелу великих обсягів матеріалу без суттєвого контролю над кінцевим продуктом. Млини цього періоду мали відносно простий механізм із двома валками і столом для подрібнення. Основним завданням було механічне змелювання матеріалу шляхом стиснення, а самі конструкції характеризувалися невеликим тиском між валком та помольним столом, статичним необертним сепаратором та відсутністю системи рециркуляції матеріалу. Як результат, використання таких млинів обмежувалося помелом вугілля на електростанціях та попереднім цементної сировини перед помелом кульовими млинами.

Друге покоління валкових млинів (середина XX століття). У 1930-х роках у відповідь на зростання промислових масштабів виробництва вертикальні валкові млини отримали удосконалення, такі як інтеграція функцій сушки та подрібнення матеріалів. Це стало можливим завдяки впровадженню систем подачі гарячого повітря для сушіння матеріалів під час помелу. Продуктивність збільшувалася, але конструкція залишалася досить простою. У 1960-ті було вдосконалено конструкцію роликів і столів для забезпечення більш рівномірного помелу та зниження витрат енергії. Обладнання стало здатне досягати тиску у 140-150 бар, оснащувалося динамічним сепаратором, а також двома або трьома вентиляторами, які забезпечували рециркуляцію до 30% завантаження. У цей період почали звертати увагу на підвищення енергоефективності млинів. Були розроблені конструкції з більшою кількістю валків, що дало змогу зменшити енерговитрати на одиницю продукції. VRM почали витісняти кульові млини завдяки значно вищій енергоефективності. Через значно збільшений тиск до конструкції було введено окрему систему примусового змащування, а самі млини почали широко використовуватися для помелу цементу.

Третє покоління млинів (кінець XX століття). З 1970-х млини оснащувалися змінними соплами подачі гарячого повітря навколо помольного стола, завдяки чому вдалося уникнути утворення турбулентних потоків повітря всередині млина. Була суттєво перероблена конструкція ґратчастого ротора обертового сепаратора, який спільно зі статичним жалюзі забезпечували більш ефективно виділення фракції готового продукту, а отже зменшували витрати на надмірне змелювання. На цей період припадає початок впровадження автоматизованих систем контролю, з'явилися можливості точного регулювання тиску валків, швидкості обертання та інших параметрів, що дозволило оптимізувати помел різних матеріалів – від цементу до вугілля. Це дозволило підвищити продуктивність і контроль над якістю продукту та знизити енергоспоживання. У 1980-1990-х роках вертикальні валкові млини стали широко застосовуватися не лише в цементній, але й

у гірничій промисловості для помелу твердих порід, вугілля та інших матеріалів. В конструкції почали використовувати більше валків і покращувати їх дизайн для зменшення зношуваності. Млини стали більш потужними і універсальними, здатними обробляти більші об'єми матеріалів з різними властивостями. Паралельно з тим зростає увага до технологій зниження зношуваності та покращення охолодження валків.

Четверте покоління (початок ХХІ століття) характеризується використанням нових матеріалів для виготовлення валків і столів, які значно зменшили їх зношуваність. Використання сплавів і композитних матеріалів дозволило збільшити термін служби робочих елементів млинів, зменшивши витрати на технічне обслуговування. Значний розвиток отримали системи автоматизації та моніторингу процесів у реальному часі, що дозволило точно контролювати параметри подрібнення, тиск валків, швидкість обертання столу та повітряний потік. Це забезпечило стабільнішу якість продукту та зниження енерговитрат. З огляду на підвищення вимог до екологічних стандартів, у конструкції валкових млинів були запроваджені нові технології, що знижують рівень викидів пилу та споживання енергії.

Сучасний етап. Нинішні вертикальні валкові млини оснащені інтелектуальними системами управління, що використовують технології штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації процесу помелу. Такі системи аналізують дані в режимі реального часу та автоматично коригують робочі параметри для досягнення максимальних показників продуктивності. Сучасні млини орієнтовані на сталий розвиток, зокрема на мінімізацію споживання енергії та зниження викидів CO₂. Впровадження технологій рекуперації тепла дозволяє досягати ще більшої ефективності в промислових процесах. Для зниження рівня шуму та вібрацій застосовуються вдосконалені конструкції, що робить валкові млини більш придатними для використання в екологічно чутливих зонах. Нові конструкції передбачають модульність, що дозволяє швидко замінити частини та адаптацію млина під різні типи матеріалів.

5. Результати. Принципова схема вертикального валкового млина показана на рисунку 1. Матеріал, що подрібнюється, подається в центр розмельного поворотного столу 8 через живильний жолоб, звідки він відцентровими силами подається під валки 5 і, утворюючи шар матеріалу, змелюється. Для зменшення зношування розмельний стіл захищається футерувальними плитами, а валки – бандажами. Надалі змелений матеріал перетікає через край розмельного столу. Потік гарячого повітря, що піднімається через отвори 13 по периметру поворотного столу 8, підхоплює і транспортує цей матеріал вгору до сепаратора 2, де готовий продукт продовжує підніматися вгору і, проходячи через гратчастий обертовий ротор 1, виходить із млина. При цьому, грубі частинки осаджуються вниз і повертаються до млина для подальшого помелу через завантажувальний конус 3, оснащений випускною заслінкою 4. Надто грубі частинки, які заважкі, для їх піднімання повітряним потоком, виходять з нижньої частини млина через лоток грубого продукту 12 і потребують механічного транспортування назад для подачі до млина. Після виходу з млина дрібний продукт проходить через рукавний фільтр або циклон та рукавний фільтр, щоб відокремити тверді частинки від потоку повітря.

Отже, 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 досягненні достатньої величини напруження утворюються мікротріщини, а компресійне подрібнення з регульованою часткою зсувних зусиль призводить до енергоефективного зменшення розміру порівняно з барабанними млинами.

Схематичне зображення потоку матеріалу при помелі у вертикальних валкових млинах зображено на рисунку 2.

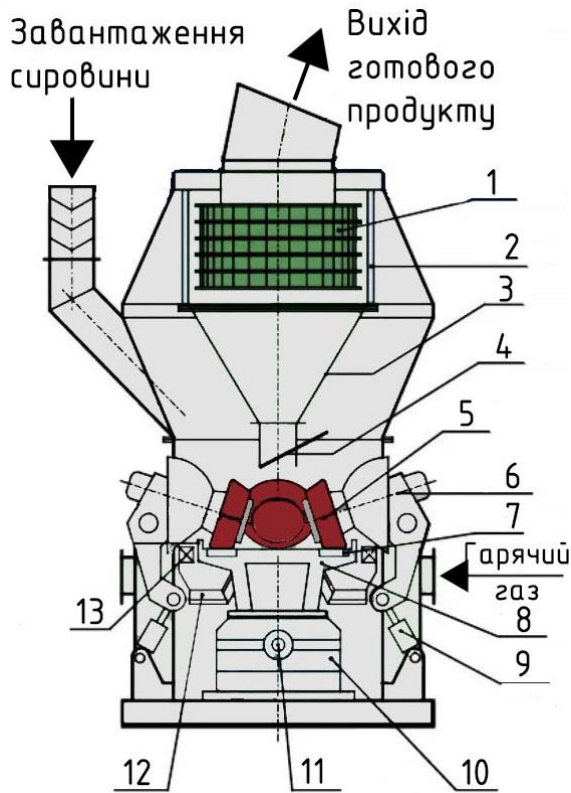


Рисунок 1. Конструкція вертикального валкового млина

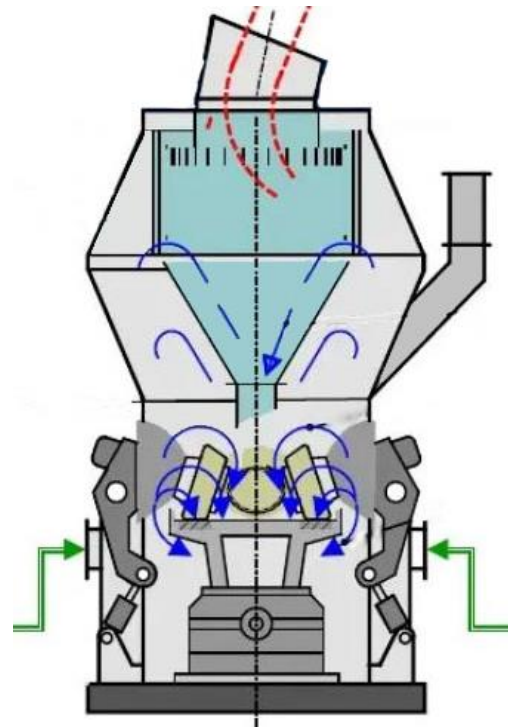


Рисунок 2. Схематичне зображення потоку матеріалу при помелі у вертикальних валкових млинах

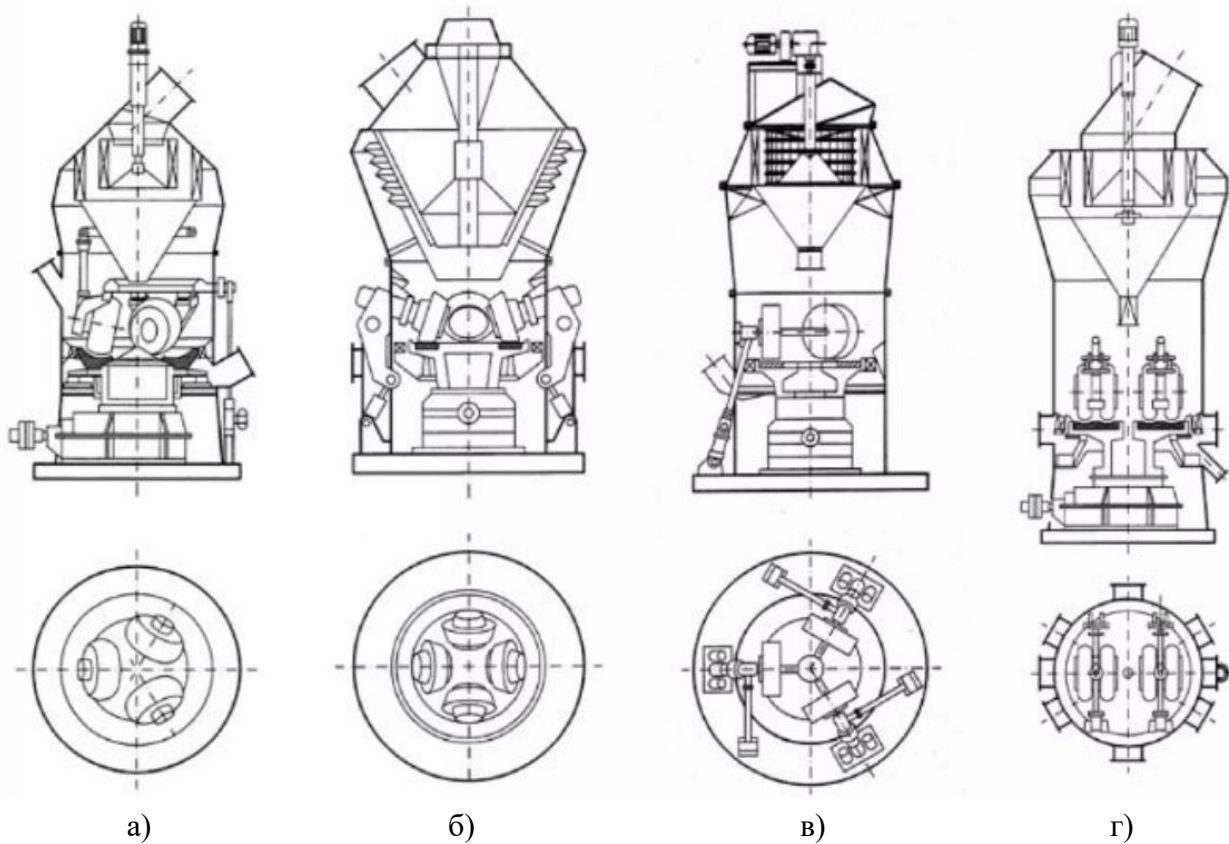


Рисунок 3. Особливості конструктивного виконання робочих органів провідних світових виробників вертикальних валкових млинів:
 а) – Gerb Pfeiffer; б) – Loesche; в) – FLS Atox; г) – Krupp Polysius

На сьогодні основними виробниками в світі, які здійснюють наукові дослідження і проектування вертикальних валкових млинів є: «Loesche», «FLS Atox», «Gerb Pfeiffer» та «Krupp Polysius». Конструкції робочих органів даних виробників відрізняються кардинальним чином, що змушує розглядати кожен з таких механізмів окремо (рисунок 3).

6. Висновки.

Вертикальні валкові млини мають значні перспективи розвитку завдяки своїй енергоефективності, екологічності та адаптивності до різних матеріалів. Подальший розвиток технологій автоматизації і інтелектуальних систем управління дозволить оптимізувати процес помелу, знизивши споживання енергії та мінімізуючи викиди. Використання сучасних матеріалів і модульних конструкцій сприяє підвищенню надійності та зменшенню витрат на обслуговування. Вертикальні валкові млини також мають переваги у зниженні експлуатаційних витрат і скороченні витрат на ремонт завдяки тривалішому терміну служби компонентів. Вони стають ключовою технологією в цементній, металургійній і вугільній промисловостях, забезпечуючи стабільний та ефективний помел.

Список використаних джерел

1. Jankovic, A., Ozer, Ç., Valery, W., & Duffy, K. (2016). Evaluation of HPGR and VRM for dry comminution of mineral ores. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*. 52. 11-25.
2. Schaefer H.V. (2001) Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals, *Minerals Engineering*, 14, 10, 1155-1160.
3. Aydogan, Namik & Ergun, Levent & Benzer, Hakan. (2006). High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. *Minerals Engineering - MINER ENG*. 19. 130-139.
4. Breaking Down Energy Consumption in Industry Grinding Mills. Bouchard, J, et al. 4, s.l.: CIM Journal, 2019, Vol. 10, pp. 157-164.
5. Lucas R.D. Jensen a,* , Erling Fundal b , Per Møller (2011) Wear mechanism of abrasion resistant wear parts in raw material vertical roller mills/ *Wear* 271 (2011) 2707– 2719
6. Jung O. (2000). Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*. 2000;31(9):252–261.
7. Kalyagina N.V. et al. (2020) *Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):181–188.