

¹**Микола Клименко,**кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів,
<https://orcid.org/0000-0002-6166-8966>, e-mail: klymenko.mo@knuba.edu.ua¹**Василь Марач,**аспірант, <https://orcid.org/0009-0003-9457-6042>, e-mail: marach.vm@knuba.edu.ua¹**Михайло Губчик,**аспірант, <https://orcid.org/0009-0008-4760-3884>, e-mail: mishkarr123@gmail.com¹Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури, просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна

ПОРІВНЯННЯ КОНСТРУКЦІЙ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ

АНОТАЦІЯ. У роботі представлено техніко-аналітичне дослідження конструктивних особливостей вертикальних валкових млинів, що застосовуються для тонкого помелу портландцементу та гранульованих доменних шлаків. Розглянуто функціональне призначення та конструкційні характеристики основних вузлів млина – валків, помольного столу, приводних систем та механізмів регулювання процесу подрібнення. Проведено аналіз еволюції конструктивних рішень, а також сучасних інженерних підходів, спрямованих на підвищення питомої продуктивності агрегатів, зниження енерговитрат та покращення технологічної надійності обладнання. Особливу увагу приділено порівнянню ефективності вертикальних валкових млинів із традиційними типами помольного устаткування, з акцентом на їх переваги у виробництві цементу та шлакозв'язувачів.

Ключові слова: вертикальні валкові млини, гранульований шлак, продуктивність млинів, енергоефективність, експлуатаційні характеристики.

COMPARISON OF THE DESIGNS OF WORKING ELEMENTS OF VERTICAL ROLLER MILLS

ABSTRACT. The paper presents a technical and analytical study of the design features of vertical roller mills used for fine grinding of Portland cement and granulated blast-furnace slag. The functional roles and structural characteristics of key mill components – rollers, grinding table, drive systems, and control mechanisms are examined in detail. The evolution of design solutions is analyzed alongside modern engineering approaches aimed at increasing specific throughput, reducing energy consumption, and improving the technological reliability of the equipment. Special attention is given to comparing the performance of vertical roller mills with traditional grinding technologies, emphasizing their advantages in the production of cement and alkali-activated slag-based binders.

Keywords: vertical roller mills, granulated slag, mill productivity, energy efficiency, operational characteristics.

1. Постановка проблеми. Вертикальні валкові млини – це інструменти, що лежать в основі сучасних технологічних процесів у цементній, гірничодобувній та енергетичній промисловості. Їх широко використовують для подрібнення різноманітних матеріалів, серед яких особливе місце займають гранульовані шлаки. В цементному виробництві ці млини стали стандартом, оскільки шлакові цементи, завдяки своїм високим міцнісним характеристикам та стійкості до агресивних середовищ, є незамінними компонентами сучасних будівельних матеріалів.

Сучасний етап розвитку будівельної індустрії характеризується зростаючими вимогами до ефективності технологічних процесів, зокрема на стадії виробництва цементу та обробки гранульованих доменних шлаків. Одним із ключових напрямів наукових досліджень є вдосконалення конструкцій млинів, які забезпечують високі техніко-

економічні показники, зокрема високу питому продуктивність при зниженому енергоспоживанні. Раціональне використання енергії під час тонкого помелу є критично важливим для зменшення собівартості будівельних матеріалів та зниження загального вуглецевого сліду галузі. Зростання потужності помольних установок і ускладнення умов їх експлуатації потребують нових підходів до конструювання робочих органів, таких як ролики, стіл помелу та сепараційні пристрої. Зокрема, дослідження зосереджені на оптимізації геометричних параметрів цих елементів, удосконаленні приводних систем і впровадженні інтелектуальних засобів автоматизації процесу подрібнення.

Водночас робочі елементи млинів функціонують у складних умовах, що супроводжуються інтенсивним абразивним і ударним зносом. Це висуває жорсткі вимоги до їхньої зносостійкості та надійності. Одним із пріоритетних завдань сучасного машинобудування є застосування високоефективних конструкційних матеріалів, включно з легованими сталлями, зносостійкими сплавами й інноваційними захисними покриттями. Окрему науково-практичну проблему становлять вібрації, які виникають під час роботи млина і можуть призводити до зниження довговічності обладнання та погіршення стабільності технологічного процесу. У зв'язку з цим актуальною є розробка конструкційних рішень, спрямованих на мінімізацію динамічних навантажень та підвищення надійності агрегатів.

Ще одним важливим аспектом є забезпечення однорідності гранулометричного складу помеленого продукту, оскільки варіації фракційного складу суттєво впливають на якісні характеристики цементу, зокрема його міцність, активність та рівномірність твердіння. Тому оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення з метою досягнення стабільного і контрольованого результату є необхідною умовою ефективного функціонування сучасних помольних систем.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Конструкція вертикальних валкових млинів в тому вигляді, яка відома нам сьогодні, 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 вертикальних млинів у гірничій промисловості: Schaefer в своїй роботі [1] описує використання вертикальних валкових млинів для помелу фосфату, тоді інші повідомляють про застосування VRM при помелі мідного, залізного та олов'яного шлаку.

Bouchard J. в роботі [5] та інші [2-4] дослідження показують значну економію енергії в порівнянні з кульовими млинами щонайменше на 25-35% залежно від виду матеріалу. Для дослідження були використані новітні технології сухого помелу у вертикальних валкових млинах, оскільки промисловість будівельних матеріалів стикається з проблемами високої вартості енергії, дефіциту води та суворішими екологічними вимогами.

У статті [6] 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 [7] 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 [8] 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.

Maruf Hasan, Sam Palaniandy [9] розглянули процес визначення параметрів руйнування в лабораторному вертикальному млині з використанням моделі балансу завантаження. Дослідження проводилося для вивчення впливу експериментальних умов на розподіл часток продукту та генерацію дрібних фракцій. Використовувалась модель для оцінки функцій вибору та руйнування часток при різних умовах роботи млина. Встановлено, що функції вибору та руйнування змінюються в залежності від розміру середовища, швидкості обертання та концентрації твердих речовин. Моделі були використані для передбачення розподілу частинок та їх подрібнення при зміні умов роботи. Виявлено, що збільшення швидкості обертання сприяє більшому подрібненню, а зменшення розміру середовища покращує ефективність руйнування. Результати демонструють, що функція вибору залежить від умов процесу, але залишається лінійною для вапняку.

Турецькі дослідники Altun Deniz, Aydogan Namik [10] представили оцінку продуктивності вертикального роликів млина (VRM) при помелі цементу, зосереджуючись на основних аспектах, таких як ефективність помелу, споживання енергії та якість отриманого продукту. Автори проводять експериментальне дослідження, в якому порівнюють роботу VRM з традиційними кульовими млинами, представляючи дані про операційні параметри та результати виробничих випробувань на цементних заводах. Результати показують, що VRM перевершує традиційні кульові млини за енергоефективністю, а також здатністю отримувати більш дрібні частинки, що є важливим для покращення якості цементу. У статті також розглядаються технологічні вдосконалення, які сприяють цим перевагам, і підкреслюється потенціал для зниження витрат у цементній промисловості завдяки використанню технології VRM. Таким чином, впровадження VRM може значно покращити процес виробництва цементу з точки зору ефективності та економії енергоресурсів.

3. Мета роботи. Вдосконалення конструкцій вертикальних валкових млинів для підвищення ефективності помелу цементу та шлаків шляхом оптимізації робочих органів і зниження енерговитрат.

4. Матеріали та методи. Сьогодні вертикальні валкові млини поступово займають провідні позиції у виробництві цементу та металургії завдяки їхній високій ефективності у процесі помелу. Вони забезпечують подрібнення цементу, шлаків та інших матеріалів із мінімальними витратами енергії. Використання шлаків у цементній промисловості сприяє підвищенню міцності будівельних матеріалів, а також значно знижує викиди CO₂, що сприяє збереженню природних ресурсів та покращенню екологічної стійкості галузі.

Принцип дії вертикального валкового млина представлений на рисунку 1. Матеріал подається через живильний жолоб у центр поворотного розмельного столу 8, що

обертається редуктором 10, і під дією відцентрових сил розподіляється під валки 5. Валки формують шар матеріалу та змелюють його. Для захисту від зношування розмельний стіл оснащений футерувальними плитами 7, а валки – бандажами. Змелений матеріал перетікає через край столу, після чого гарячий повітряний потік крізь сопла 13 піднімає його до сепаратора 2. Тут готовий продукт проходить через ротор 1, а грубі частинки повертаються крізь воронку 3 до млина для повторного помелу. Занадто великі частки виводяться через лоток 12 і транспортуються для повторної переробки. Валки змонтовані на осях, що встановлені на важелях 6. Для забезпечення необхідного зусилля стискання матеріалу між валками та столом при помелі використовують гідроциліндри 9.

Процес помелу у вертикальних валкових млинах базується на стисненні та зсуві в шарі матеріалу. Розподіл напруження у шарі сприяє утворенню мікротріщин, що забезпечує енергоефективне зменшення розміру частинок порівняно з барабанными млинами.

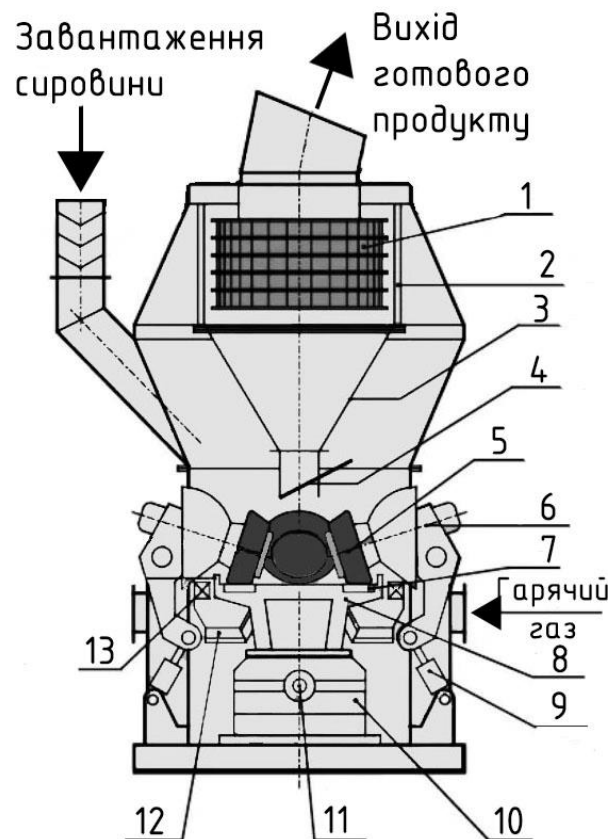


Рис. 1. Конструкція вертикального валкового млина

Fig. 1. Construction of a vertical roller mill

На рисунку 2 показано основні принципові схеми взаємного розташування розмельювальних елементів середньохідних млинів. В залежності від виробника суттєво різняться конструкція поротного столу, конструкція і кількість роликів та пристроїв забезпечення необхідного натискання розмельювальних елементів.

Розмельювальні пристрої (рис. 2) складаються з обертового столу 2, поверхня якого захищена бронею 3, і роликів 1 або куль 7, що котяться по столу. Розташування поверхні столу та роликів може бути різним: горизонтальним (рис. 2, а, г, д, е), слабопохилим (б), або крутопохилим (в). Форма поверхні помольних тіл так само, як і стіл, виконується різною: гладкою (рис. 2, а, б, в, д) або тороїдальною (е). Подача повітря до розмельювальних елементів здійснюється через напрямні сопла 4, які роблять закріпленими на корпусі 5 млина (рис. 2, а, б, в, г, е) або безпосередньо на обертовому помольному столі 2.

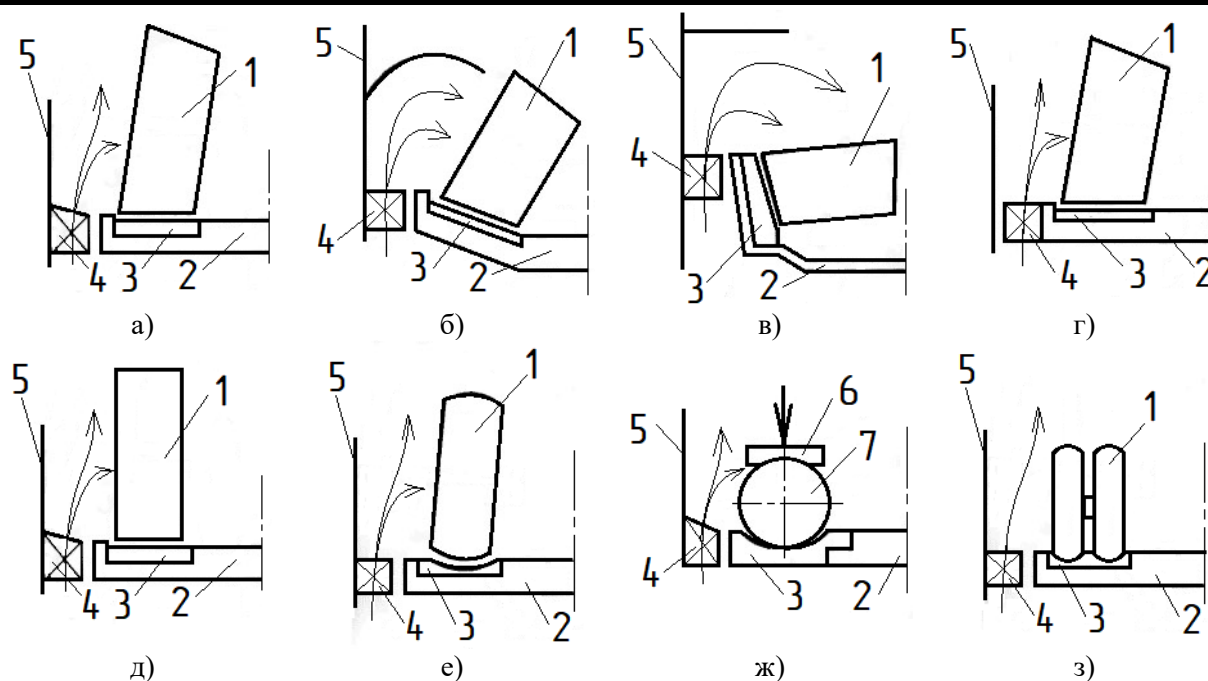


Рис. 2. Основні схеми розташування робочих елементів у вертикальних валкових млинах: 1 – валок; 2 – помольний стіл; 3 – бронеплита; 4 – пристрій подачі повітря; 5 – корпус млина; 6 – напірне кільце; 7 – кулі.

Fig. 2. Main schemes of grinding elements in vertical roller mills: 1 - Roller; 2 - Table; 3 - Armor plate; 4 - Air supply devices; 5 - Mill housing; 6 - Pressure ring; 7 - Balls

Сучасні вертикальні валкові млини оснащуються високотехнологічними системами автоматизованого управління, які інтегрують алгоритми штучного інтелекту та методи машинного навчання для адаптивної оптимізації параметрів помелу. Такі інтелектуальні системи забезпечують обробку технологічних даних у режимі реального часу, що дозволяє оперативно коригувати робочі режими з метою досягнення максимального рівня продуктивності, енергоефективності та стабільної якості продукту.

Актуальні конструктивні рішення орієнтовані на принципи сталого розвитку, зокрема на мінімізацію питомого енергоспоживання та зменшення викидів вуглекислого газу у виробничому циклі. Запровадження теплотехнічних рішень, зокрема систем рекуперації тепла, дозволяє підвищити загальну енергоефективність помельного процесу. Вдосконалені інженерні підходи до конструкції корпусу млина та віброізоляційних систем спрямовані на зниження рівня шуму й вібрацій, що розширює можливості експлуатації обладнання у зонах з підвищеними екологічними вимогами. Отже сучасні конструкції млинів передбачають модульний підхід до формування вузлів, що забезпечує оперативну заміну зношених елементів та гнучку адаптацію агрегату під різні види матеріалів з урахуванням їх фізико-механічних властивостей.

Зростання вимог до сили притискання валків до робочої поверхні зумовило відмову від традиційних пружинних вузлів, які забезпечували одночасне зусилля на опозитні валки, на користь індивідуальних гідравлічних циліндрів. Це дозволило здійснювати точне регулювання тиску кожного валка окремо відповідно до властивостей матеріалу, що подрібнюється. Перехід від м'яких матеріалів, таких як вугілля, до високоміцних і абразивних компонентів - зокрема гранульованих шлаків - призвів до суттєвого збільшення зношування елементів помельної зони, передусім поверхонь валків і помельного столу. Якщо для вугілля було достатньо поверхневої твердості валка на рівні HRC 52 при хвилястості до 3 мм і товщині футерувального шару не менше 6,5 мм, то для шлакових матеріалів стали необхідними нові типи зносостійких наплавок та облицювань з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

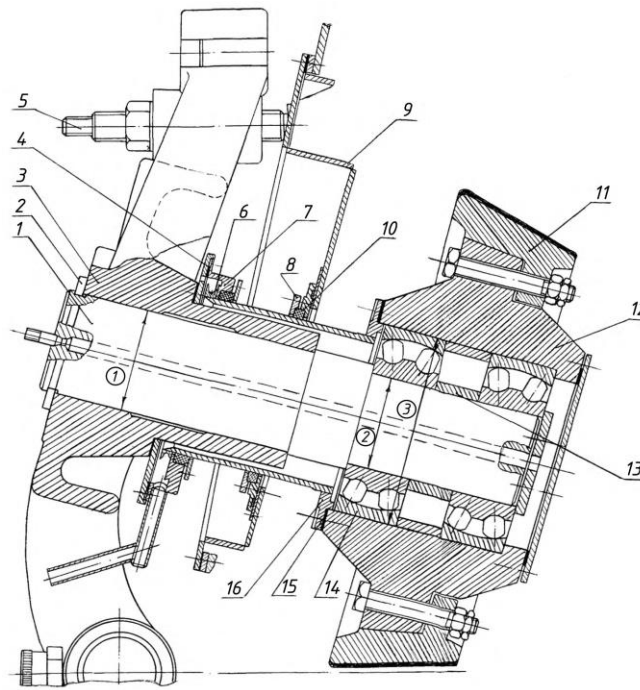


Рис.3. Конструкція вузла валка:

1 – вісь валка; 2 – півкільце; 3 – важіль; 4 – диск передній; 5 – болт спеціальний; 6 – кільце; 7 – корпус ущільнення; 8 – кришка; 9 – кожух; 10 – диск задній; 11 – бандаж валка; 12 – корпус валка; 13 – розпірна втулка; 14 – підшипник; 15 – ущільнення; 16 – втулка

Fig. 3. Roller assembly design: 1 – Roller shaft; 2 – Half-ring; 3 – Lever; 4 – Front disc; 5 – Special bolt; 6 – Ring; 7 – Seal housing; 8 – Cover; 9 – Casing; 10 – Rear disc; 11 – Roller tire; 12 – Roller body; 13 – Spacer sleeve; 14 – Bearing; 15 – Seal; 16 – Sleeve

Для помелу матеріалів середньої міцності допускається використання бандажів із маловуглецевої сталі, армованих зносостійким наплавленим шаром. Як матеріали для наплавлення доцільно застосовувати порошкову стрічку типу ПЛ-АН 101, порошкові дроти ПП АН-125 або ПП-Нп350Х10Б8Т2 згідно з вимогами ГОСТ 26101 (еквівалент EN 14700 TZFe6), а також електроди типу Е-320Х23С2 ГТР. Таке виконання забезпечує задовільну зносостійкість при експлуатації у стандартних умовах помелу.

В умовах інтенсивного абразивного зношування, зокрема під час помелу матеріалів з високим вмістом кремнезему, доменних шлаків та інших твердих включень, функціональні елементи валкового млина піддаються підвищеним навантаженням. Надмірне зношування поверхні валків призводить до зниження ефективності подрібнення, збільшення питомих енерговитрат та зростання експлуатаційних витрат. Особливу увагу необхідно приділяти стану футерувальних плит помельного столу (рис. 4), оскільки їх деградація може призводити до зростання вібраційних навантажень, що, у свою чергу, підвищує ризик виходу з ладу ключових вузлів обладнання та зменшує загальний ресурс млина.

Знос робочих органів вертикальних валкових млинів, зокрема валків та помольного столу, є одним із визначальних чинників, що впливають на експлуатаційну ефективність, надійність і технічну готовність обладнання. Умови роботи цих елементів характеризуються дією інтенсивного абразивного зносу, високими контактними навантаженнями та періодичними ударними впливами, що ускладнює забезпечення їх довговічності та стабільної роботи протягом тривалого часу.



Рис.4. Характер зношування поверхні помольного стола.
Fig. 4. Wear pattern of the grinding table surface.

Одним із перспективних підходів до підвищення зносостійкості елементів помольного тракту є застосування полімер-металевих композиційних матеріалів (рис. 5), які демонструють кращі експлуатаційні характеристики порівняно з традиційними матеріалами, такими як леговані сталі або високоміцний чавун. Завдяки поєднанню високої механічної міцності, ударної в'язкості та низького коефіцієнта тертя, полімер-металеві композити дозволяють істотно знизити інтенсивність зношування функціональних поверхонь. Використання таких матеріалів сприяє зменшенню частоти технічного обслуговування та скороченню витрат на ремонтні роботи, що безпосередньо впливає на економічну доцільність експлуатації млина. Крім того, результати експериментальних і промислових досліджень засвідчують, що впровадження полімер-металевих композитів забезпечує стабільну продуктивність млинів навіть у режимі тривалого циклічного навантаження. Подовження ресурсу основних вузлів без погіршення їх технічного стану позитивно впливає на загальну надійність системи подрібнення та мінімізує ризики незапланованих простоїв, які можуть спричинити значні втрати у виробничому процесі.

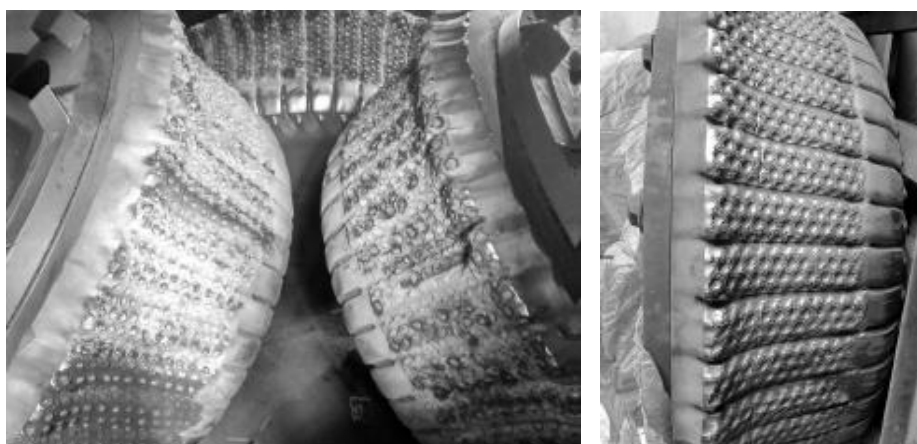


Рис.5. Характер зношування поверхонь молотильних елементівстола.
Fig. 5. Wear pattern of the grinding table surface elements

6. Висновки. Вертикальні валкові млини демонструють високий потенціал подальшого розвитку завдяки їхній підвищеній енергоефективності, екологічній прийнятності та здатності адаптуватися до широкого спектра помельної сировини. Інтеграція сучасних засобів автоматизації та інтелектуальних систем керування технологічним процесом створює передумови для гнучкого регулювання режимів подрібнення, що сприяє зниженню питомих енерговитрат і обмеженню техногенного впливу на довкілля.

Застосування інноваційних конструкційних матеріалів, зокрема зносостійких сплавів і композитів, у поєднанні з модульним принципом побудови агрегатів, забезпечує підвищення експлуатаційної надійності обладнання, спрощення технічного обслуговування та зменшення витрат на ремонтно-відновлювальні роботи.

Унаслідок високої технологічної гнучкості, низького рівня експлуатаційних витрат і тривалого ресурсу основних функціональних елементів вертикальні валкові млини набувають стратегічного значення як базова технологія в цементній, металургійній та вугільній промисловостях, забезпечуючи стабільне та енергоощадне здійснення процесу тонкого помелу.

Список використаних джерел

1. Schaefer H.V. (2001) Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals, *Minerals Engineering*, 14, 10, 1155-1160.
2. Barry A. Wills, James Finch Wills' (2015). *Mineral Processing Technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8th Edition.
3. Altun, D., H. Benzer, N. Aydogan, and C. Gerold. (2017). Operational parameters affecting the vertical roller mill performance. *Minerals Engineering* 103-104:67-71.
4. Simmons M, Gorby L, Terembula J. (2005). Operational experience from the United States' first vertical roller mill for cement grinding. 2005 IEEE. Cement Industry Technical Conference. Conference Record. p. 241-249.
5. Bouchard, J, et al. (2019). Breaking Down Energy Consumption in Industry Grinding Mills.. 4, s.l.: CIM Journal, Vol. 10, pp. 157-164.
6. Lucas R.D. Jensen, Erling Fundal, Per Møller. (2011). Wear mechanism of abrasion resistant wear parts in raw material vertical roller mills/ *Wear* 271. 2707-2719
7. Jung O. (2000). Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*;31(9):252–261.
8. Kalyagina N.V., et al. (2020). *Journal of Engineering Researches*;21(3):181–188.
9. Maruf Hasan, Sam Palaniandy, Marko Hilden, Malcolm Powell (2017) Calculating breakage parameters of a batch vertical stirred mill. *Minerals Engineering* 111 229–237.
10. Altun Deniz, Aydogan Namik, et al. (2017). Performance Evaluation of Vertical Roller Mill in Cement Grinding: Case Study ESCH Cement Plant. Conference Paper, September 2017.

References:

1. Schaefer, H. V. (2001). Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals. *Minerals Engineering*, 14(10), 1155–1160. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00172-7](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00172-7)
2. Wills, B. A., & Finch, J. (2015). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
3. Altun, D., Benzer, H., Aydogan, N., & Gerold, C. (2017). Operational parameters affecting the vertical roller mill performance. *Minerals Engineering*, 103–104, 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.002>.
4. Simmons, M., Gorby, L., & Terembula, J. (2005). Operational experience from the United States' first vertical roller mill for cement grinding. In 2005 IEEE Cement Industry Technical Conference. Conference Record (pp. 241–249). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CITCON.2005.1547326>.
5. Bouchard, J., Radziszewski, P., & Levesque, M. (2019). Breaking down energy consumption in industry grinding mills. *CIM Journal*, 10(4), 157–164.
6. Jensen, L. R. D., Fundal, E., & Møller, P. (2011). Wear mechanism of abrasion resistant wear parts in raw material vertical roller mills. *Wear*, 271(9–10), 2707–2719. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.082>
7. Jung, O. (2000). Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*, 31(9), 252–261.
8. Kalyagina, N. V., et al. (2020). *Journal of Engineering Researches*, 21(3), 181–188.
9. Hasan, M., Palaniandy, S., Hilden, M., & Powell, M. (2017). Calculating breakage parameters of a batch vertical stirred mill. *Minerals Engineering*, 111, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.014>.
10. Altun, D., Aydogan, N. A., Altun, O., & Benzer, A. H. (2017, September). Performance evaluation of vertical roller mill in cement grinding: Case study ESCH Cement Plant. Paper presented at the European Symposium on Comminution and Classification (ESCC 2017), Luxembourg.