

---

---

## Наука і сучасні технології

---

---

УДК 681.518.54:621.926.3

### АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМНОГО РУХУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВАЛКОВОГО МЛИНА ЗА НАЯВНОСТІ ПРУЖНОГО ТА ГЕОМЕТРИЧНОГО ПРОКОВЗУВАННЯ ПОМОЛЬНИХ ВАЛКІВ

Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрипюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48000,  
e-mail: ktsu@nuing.edu.ua

*При експлуатації вертикального валкового млина для помолу вугілля процес зношування його робочих органів – помольних валків та бігової доріжки помольної чаші, обумовлюється як характером руху робочих органів і взаємодією їх з вугіллям під час руйнування останнього, так і силою притискання помольних валків до бігової доріжки, що призводить до виникнення різних видів їх проковзування. В статті наводяться аналітичні дослідження взаємного руху помольних валків і бігової доріжки за наявності пружного та геометричного видів проковзування. За результатами проведених досліджень встановлені умови працездатності робочих органів млина для розглянутих видів проковзування, при яких має місце рівномірне їх зношування, що підвищує якість вихідного продукту – тонини помолу вугілля.*

Ключові слова: помольний валок, бігова доріжка, млин, проковзування геометричне, пружне, працездатність.

*При эксплуатации вертикальной валковой мельницы для помола угля процесс износа ее рабочих органов – помольных валков и беговой дорожки помольной чашки, обуславливается как характером движения рабочих органов и взаимодействием их с углем при разрушении последнего, так и силой прижатия помольных валков к беговой дорожке, что приводит к возникновению различных видов их проскальзывание. В статье приводятся аналитические исследования взаимного движения помольных валков и беговой дорожки при наличии упругого и геометрического видов проскальзывания. По результатам проведенных исследований определены условия работоспособности рабочих органов мельницы для рассматриваемых видов проскальзывания, при которых имеет место равномерное их изнашивание, что повышает качество исходного продукта – тонины помола угля.*

Ключевые слова: помольный валок, беговая дорожка, мельница, проскальзывание геометрическое, упругое, работоспособность.

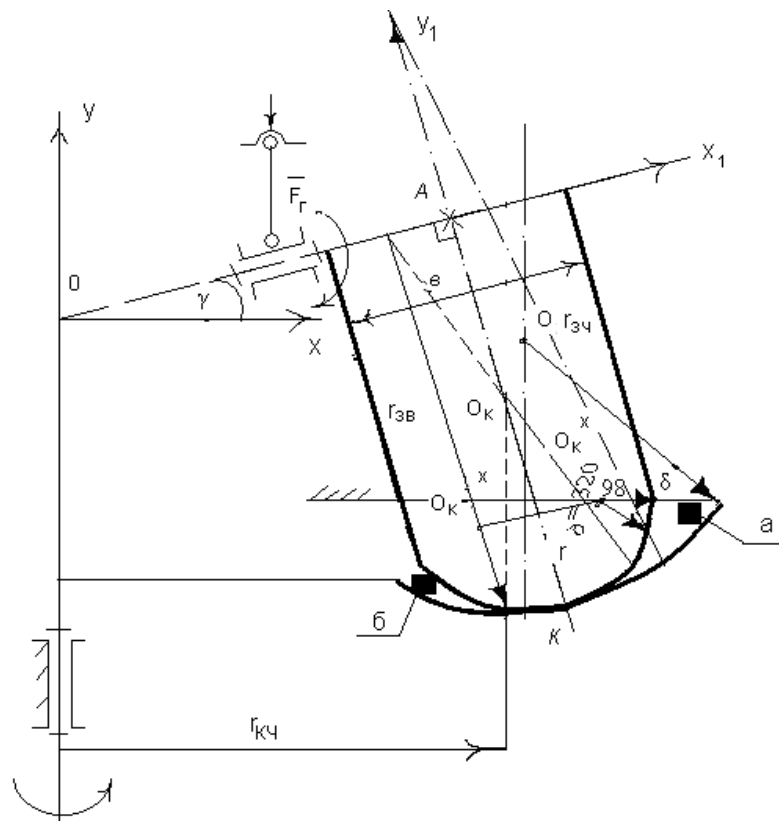
*During the coal grinding vertical roll mill operating the deterioration process of one's working bodies such as grinding rolls and blends bowl running track is characterized both the working bodies movement and one's interaction with coal during the coal fragment's destruction, and the grinding rolls pressing force to the running track, which leads to different types of slippage. The running race and grinding rolls mutual motion analytical investigations have been presented in this article taking to account the elastic and geometric types of slippage. According to the results of the investigations the mill working bodies efficiency conditions have been established for the considered types of slippage, when the one's uniform wear takes place, it increases the quality of the final product – the coal grinding fineness.*

Key words: grinding rolls, running track, mill, geometrical and elastic slippage, efficiency.

#### Вступ

Для приготування пиловугільної суміші, що є заміником природного газу, використовуються вертикальні валкові млини, зокрема млин MPS 180BK фірми PFEIFFRAG, в якому відбувається розмелювання низьких сортів вугілля [1]. Від технічного стану робочих органів

основного вузла млина – помольної чаші (помольних валків та бігової доріжки помольної чаші) залежить як надійність його роботи, так і ефективність процесу помолу вугілля та якість вихідного продукту, у зв'язку з чим актуальною є задача дослідження закономірностей зношування робочих органів помольної чаші.



*a* – розташування шматка вугілля біля периферійної частини БД;  
*б* – розташування шматка вугілля у заокругленій частині ПВ та БД

**Рисунок 1 – Розрахункова схема взаємодії шматка вугілля з ПВ та БД ПЧ**

Процес зношування робочих органів млина характеризується не тільки їх взаємодією з вугіллям під час його руйнування, дослідження яких наводяться в [2, 3], але обумовлюється також характером руху помольних валків (ПВ) та бігової доріжки (БД) і силою притискання ПВ до помольної чаші (ПЧ). Так, в [4] наводяться аналітичні дослідження взаємного руху ПВ і БД та формування сили їх притискання, за результатами яких встановлено, що можуть мати місце три види проковзування: пружне; буксування; геометричне, та розглянуто один із них – буксування.

Розглянемо природу виникнення пружного та геометричного проковзувань.

### Пружне проковзування

Від сили притискання ПВ  $R_{сч}^n$  виникає деформація як БД, так і ПВ. Враховуючи, що ПВ торкається БД по площині, яка буде утворена внаслідок контактних деформацій обох тіл та матиме еліптичну форму. Великою віссю еліпса буде «а», а меншою «в» (рис. 1).

Значення максимального питомого тиску  $p_0^{mx}$  визначимо за формулою:

$$p_0^{mx} = K_p \sqrt[3]{F_r \cos \gamma \left(\frac{E}{r}\right)^2}, \quad (1)$$

де:  $K_p = \frac{3}{\pi K_a K_e}$  – коефіцієнт питомого контактного тиску;

$$a = K_a \sqrt[3]{F_r \cos \gamma \frac{r}{E}} - \quad (2)$$

велика піввісь еліпса деформації;

$e = K_e \sqrt[3]{F_r \cos \gamma \frac{r}{E}}$  – мала піввісь еліпса деформації;

$K_a = 3 \sqrt{\frac{6D}{\pi} \left(1 + \frac{r_x}{r_y}\right)}$  – коефіцієнт великої півосі еліпса деформації;

$K_e = 3 \sqrt{\frac{6D}{\pi} \left(1 + \frac{r_x}{r_y}\right)}$  – коефіцієнт малої півосі еліпса деформації;

$$D = \frac{K - \alpha}{1 - \left(\frac{e}{a}\right)^2};$$

$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{e^2}{a^2}\right) \sin^2 \varphi^{0.5}} d\varphi$  – повний еліптичний інтеграл першого роду.

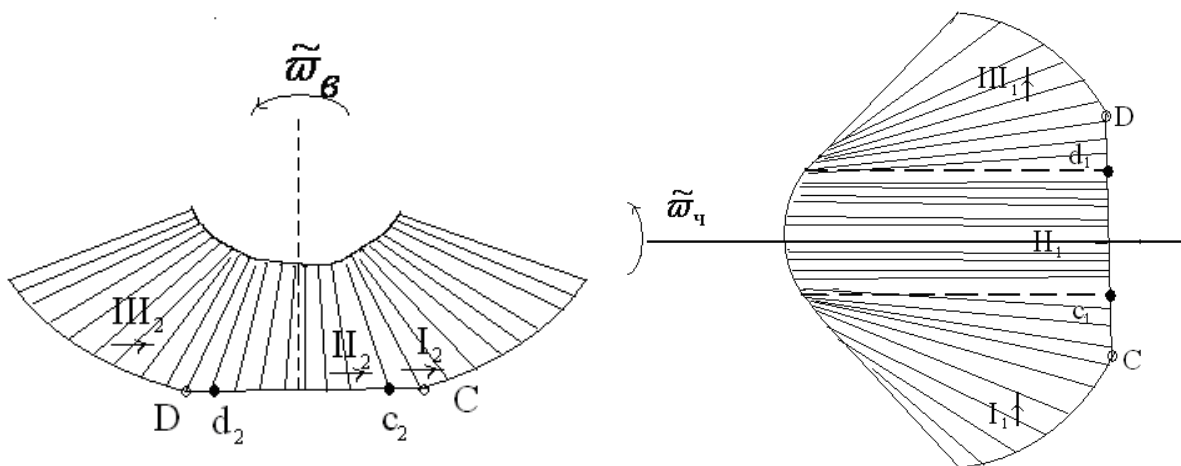


Рисунок 2 – Епюри деформації зсуву та викривлення радіальних волокон матеріалів БД та ПВ

Для параметрів ПВ та БД характерним є таке співвідношення між головними радіусами кривизни поверхонь, які вимірюються в площинах OXZ та OYZ головних нормальних перерізів:

$$1 \leq \frac{r_x}{r_y} \leq 34.$$

Тоді коефіцієнти  $k_p$ ,  $k_a$ ,  $k_r$  можна визначити наближено з похибкою не більше, ніж 3%. Так:

$$K_a = \frac{1,4664}{y^{0,0945}} \left( \frac{r_x}{r_y} \right)^{0,318} - \text{коефіцієнт великої осі еліпса плями контакту};$$

Тоді коефіцієнти  $k_p$ ,  $k_a$ ,  $k_r$  можна визначити наближено з похибкою не більше, ніж 3%. Так:

$$K_\theta = \frac{1,41184}{y^{0,0945}} \left( \frac{r_y}{r_x} \right)^{0,318} - \text{коефіцієнт малої осі еліпса плями контакту};$$

Тоді коефіцієнти  $k_p$ ,  $k_a$ ,  $k_r$  можна визначити наближено з похибкою не більше, ніж 3%. Так:

$$K_\rho = 0,2295y^{0,189} - \text{допоміжний коефіцієнт};$$

$$y = 1 - \left( 1 - \frac{r_y}{r_x} \right)^3;$$

$$r_x = 2 \cdot \left\{ \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} - \left[ \left( \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right)^2 + \left( \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right)^2 - 2 \left( \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right) \left( \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right) \sin 2\gamma \right] \right\}^{\frac{1}{2}} -$$

головний радіус кривизни в площині OXZ;

$$r_y = 2 \cdot \left\{ \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} + \left[ \left( \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right)^2 + \left( \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right)^2 + 2 \left( \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right) \left( \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right) \sin 2\gamma \right] \right\}^{\frac{1}{2}} -$$

$$+ \left( \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right)^2 + \left( \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right) \left( \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}} \right) \sin 2\gamma \right\}^{\frac{1}{2}} -$$

головний радіус кривизни в площині OYZ;

$$E = \frac{2E_\phi E_\theta}{E_\phi + E_\theta} - \text{зведений модуль пружності};$$

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}}} - \text{середній приведений радіус кривизни.}$$

Для ПВ та БД маємо:

Для ПВ та БД маємо:

$$r_{11} = -493 \text{ мм}; r_{22} = 226 \text{ мм};$$

$$r_{12} = -627 \text{ мм}; r_{21} = 596 \text{ мм}.$$

Сила притискання  $F_2 \sin \gamma$  повинна бути такою, щоб сила тертя  $F_2 f \sin \gamma$  перевищувала силу опору.

Під дією сили опору  $F_0 = \frac{M_\theta}{r_{k\theta}}$  на еліптичній площині  $a_1=0,5$  СД та її околі праворуч і ліворуч виникнуть деформації зсуву та викривлення радіальних волокон матеріалів БД та ПВ (рис.2.). Напрямок (кут) зсуву для БД збігається з напрямком її обертання:  $\varphi = \arctg f$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя. У зоні  $I_1$  чаші виникає та до точки  $c_1$  поступово густішає ущільнення волокон. За точкою  $c_1$  через зростання тиску та сил тертя викривлення та ущільнення волокон припиняється.

По валку в зоні  $I_2$  до точки  $c_2$  навпаки відбудеться розтяг волокон матеріалу та їх розрідження в радіальному напрямку.

З цих міркувань на ділянці  $Cc_1$  має місце відносно випередження ковзання радіальних волокон чаші по відстаючих волокнах матеріалу ПВ.

Відстань  $c_1c_2$  для різних випадків різна, оскільки залежить від співвідношення модулів пружності  $E_\phi$  і  $E_\theta$ , радіусів  $r_{k\phi}$  та  $r_{k\theta}$ , від навантаження  $F_0$  та сили притискання  $F_\Gamma \sin \gamma$ . В ідеалі може мати місце  $c_1c_2=0$ . Тоді центральні зони  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  збігатимуться.

Геометричне ковзання

Точки БД та ПВ за конструктивних і кінематичних причин не можуть мати однакою швидкість у межах еліптичної плями контакту з проекцією  $LN = \epsilon \cos(\gamma + \varphi)$ , де  $\epsilon$  – мала вісь еліпса (рис. 4).

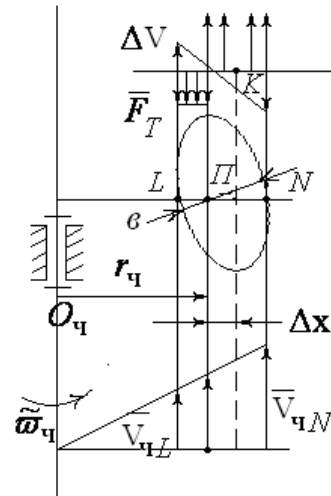


Рисунок 4 – Розрахункова схема для визначення геометричного ковзання

Напрямок сили тертя у кожній точці плями контакту ПВ до БД буде протилежним швидкості ковзання. Швидкість точок ПВ на ділянці  $PN$  будуть більшими, ніж у точці  $P$ , а на ділянці  $PL$  меншими, оскільки лише в точці  $P$  його швидкість дорівнює швидкості БД. Саме в цій точці буксування буде відсутнє. Тому на ділянці  $PN$  розподілена (вважаємо рівномірно) сила тертя буде створювати момент  $M'_F$ , який діє в напрямку, протилежному напрямку обертання ПВ. А на ділянці  $PL$  – момент  $M''_F$ , який буде спрямований у бік обертання ПВ. Величина моментів залежить від координат  $\Delta x$  (від середини плями контакту  $K$  до полюса  $P$ ) положення точки  $P$ . Сама ж координата  $X$  є функцією навантаження, яка діє на ПВ.

Будемо вважати у першому наближенні, що тиск по ширині контакту ПВ розподілений рівномірно. Тоді можемо визначити сили тертя для ділянок  $PL$  і  $PN$  так:

$$F'_{mb} = \frac{F_2 \cos \gamma}{b} * f(0,5b - \Delta x);$$

$$F''_{mb} = \frac{F_2 \cos \gamma}{b} * f(0,5b + \Delta x).$$

З умови рівноваги валка маємо:

$$M''_{\epsilon} - M'_{\epsilon} = M_{\epsilon}, \tag{4}$$

де:

$$M'_{\epsilon} = \frac{F_2 \cos \gamma}{b} f(0,5b - \Delta x) r_{\epsilon k} + \Delta x \sin \gamma + r_{\epsilon k} - 0,5b \sin \gamma;$$

$$M''_{\epsilon} = \frac{F_2 \cos \gamma}{b} f(0,5b + \Delta x) r_{\epsilon k} + \left( \frac{\Delta x + 0,5b}{2} \right) \sin \gamma.$$

Після переходу через граничні точки  $c_1, c_2$  деформовані волокна БД та ПВ потрапляють до зони  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$ , де збережуть незмінним досягнуті розрідження чи ущільнення. Так відбувається тому, що в цих зонах діють значні питомі контактні тиски та сили зчеплення від тертя, яке цим тискам відповідає. При цьому відносно ковзання волокон зони  $\Pi_1$  відносно волокон зони  $\Pi_2$  буде відсутнє. Вони рухатимуться одночасно з однакою лінійною швидкістю.

Після точки  $d_1$  тиск і зчеплення між ПВ та БД послабляються. Ущільнені волокна отримують можливість відновитися в зоні  $\Pi_1$ , від чого на ділянці  $d_1D$  вони з випередженням почнуть ковзати вздовж волокон зони  $\Pi_2$ , що втрачають розрідження, внаслідок чого випрямляться, і вже за точкою  $D$  поступово набудуть вільний стан.

Для ділянки  $d_1d_2$  зони  $\Pi_2$  через наявність тертя з боку БД розрідження волокон ПВ збережеться, а після точки  $d_2$ , де тертя зменшується, почнеться втрата розрідження, яке відновиться за точкою  $D$  з деяким коливанням недеформованої структури матеріалу ПВ. Внаслідок цього волокна валка в зоні  $\Pi_2$  змістяться в бік зворотного від напрямку обертання ПВ.

На підставі викладеного розподіл лінійних коливань швидкостей  $V_c$  і  $V_{\epsilon}$  можна представити схемою (рис. 3), де  $L$  – відстань від початку контактування.

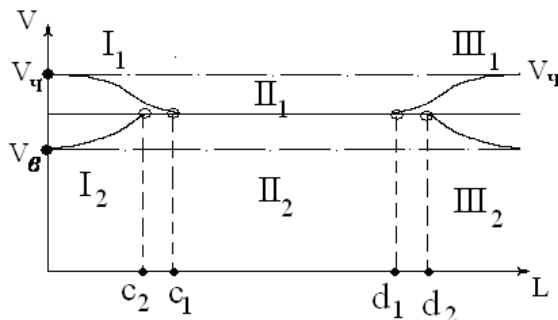


Рисунок 3 – Графік розподілу лінійних швидкостей ПВ та БД ПЧ

У зонах  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  швидкості є однаковими, в зонах  $I_1, I_2$  та  $\Pi_1, \Pi_2$  вони є різними, тому для останніх можна записати

$$V_{\epsilon} = V_c - (\Delta V_c + \Delta V_{\epsilon}).$$

Передавальне відношення в цьому випадку буде мати вигляд

$$i_{21} = \frac{\omega_{\epsilon}}{\omega_c} = \frac{r_{kc} V_{\epsilon}}{r_{k\epsilon} V_c} = \frac{r_{kc}}{r_{k\epsilon}} \left( 1 - \frac{\Delta V_c + \Delta V_{\epsilon}}{V_c} \right) = \frac{r_{kc}}{r_{k\epsilon}} (1 - \zeta), \tag{3}$$

де  $\zeta = \frac{\Delta V_c + \Delta V_{\epsilon}}{V_c}$  – коефіцієнт пружного ковзання.

Він залежить від навантаження  $M_b$ , матеріалів ПВ та БД і їх розмірів. Дослідами встановлено, що чисельні значення для сталевих ПВ та БД складають  $0,002 \div 0,004$ .

З рівняння (4) знайдемо

$$\Delta x = -\frac{r_{6k}}{\sin \gamma} + \sqrt{\frac{r_{6k}^2}{\sin^2 \gamma} + 0,5b^2} + \frac{M_6 b}{0,5 f F_2 \sin^2 \gamma}. \quad (5)$$

Перед радикалом взято знак плюс, тому що точка *П* ділить меншу піввісь еліпса внутрішнім чином.

Як бачимо з (5), зміщення залежить від моменту сил опору  $M_6$ , сили притискання до БД  $F_2$ , кута нахилу осі обертання ПВ  $\gamma$ , зміни коефіцієнта неповної сили тертя спокою  $f$ . При зменшенні  $M_{ko}$  і збільшенні  $F_2 \cos \gamma$  зміщення  $\Delta x$  буде меншим, а тому і зношування від ковзання ПВ та БД буде меншим. Найбільшу величину зношення будуть мати ділянки ПВ, які розташовані на зовнішній частині плями контакту (біля точки *N*). Якщо  $M_6$  і  $F_2 \cos \gamma$  будуть такими, що точка *П* співпадає з точкою *L*, тоді сила зчеплення буде використана повністю.

Враховуючи зміщення  $\Delta x$ , передавальне відношення можна визначити за формулою

$$i_{rb} = \frac{r_{kb} - \Delta x \cos \gamma}{r_{kr} - \Delta x}. \quad (6)$$

### Висновок

Проведені аналітичні дослідження взаємного руху помольного валка та бігової доріжки помольної чаші дозволили встановити умови працездатності помольної чаші вертикального валкового млина за наявності пружного та геометричного проковзування помольних валків.

Це дозволить вибирати такі режими роботи помольної чаші, при яких буде мати місце рівномірне зношування помольних валків і бігової доріжки, що підвищить якість вихідного продукту – тонини помолу вугілля.

### Література

1 Компетентность в цементной промышленности [Електронний ресурс] // Каталог продукции фирмы SEBR, PFEIFFER AG. – Режим доступа : <http://www.gpag.com>.

2 Заміховський Л.М. Дослідження взаємодії кусків вугілля різної форми з помольною чашею в процесі їх руйнування у вертикальному валковому млині [Текст] / Л.М.Заміховський, Р.Б. Скрипюк // Наукові вісті Галицької академії. – 2009. – № 2 (16). – С. 8–15.

3 Заміховський Л.М. Аналітичні дослідження процесу початкового завантаження вугілля у помольну чашу млина AG MPS 180 ВК та його руйнування / Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрип'юк // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2010. – №76. – С. 9–14.

4 Заміховський Л.М. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазпромислового обладнання [Текст] / Л.М.Заміховський, Р.Б.Скрипюк // Дослідження взаємного руху помольного валка і бігової доріжки помольної чаші вертикального валкового млина // 6-та Міжнародна науково-технічна конференція і виставка, Івано-Франківськ, 29 листопада – 2 грудня 2011 р.: тези доп. і повідомл. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 197–205.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*  
08.12.11

*Рекомендована до друку професором*  
**Г. Н. Семенцовим**