

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ ПРИ ХОЛОДНОМУ  
ПРОКАТУВАННІ ТОНКИХ ЛИСТІВ**

**Мета.** Дослідити витрати енергії при холодному прокатуванні тонких сталевих листів і скласти енергетичний баланс процесу. Сучасний розвиток прокатного виробництва пов'язаний з раціональним використанням енергетичних ресурсів. Технологія виготовлення тонких листів, які в подальшому використовуються в машинобудуванні та будівництві, постійно удосконалюється з метою підвищення продуктивності устаткування, поліпшення якості виробів і зменшення собівартості процесу. При розробці нових технологічних процесів велика увага приділяється енергозбереженню, тому дослідити витрати енергії при холодному прокатуванні тонких листів і скласти енергетичний баланс процесу є задачею актуальною, вирішення якої дозволить контролювати витрати енергії на прокатування.

**Методи дослідження** базуються на використанні фундаментальних положень теорії обробки металів тиском і розрахункових методів визначення енергосилових параметрів прокатування.

**Наукова новизна** полягає у тому, що при дослідженні енергетичних складових процесу холодного прокатування було виявлено прихід надлишкової енергії в осередок деформації.

**Практична значимість** роботи полягає у встановленні раціональних режимів обробки, що дозволяють зменшити витрати енергії на прокатування тонких листів.

**Результати.** Було детально досліджено осередок деформації при холодному прокатуванні. Встановлено прихідні статті енергетичного балансу й енергетичні витрати в осередку деформації на перетворення енергії в кінетичну енергію розкату, нагрівання металу при обробці, потенційну енергію утворення нової поверхні, роботу деформації. При дослідженні враховувались опір матеріалу пластичній деформації та його зміни при холодному обтисненні. Було запропоновано оновлену методику розрахунку енергетичного балансу осередку деформації при холодному прокатуванні тонких листів та перевірено збалансування розрахованого енергетичного балансу. Розрахунки показали, що при прокатуванні тонкого листа при кімнатній температурі енергія перетворюється в теплоту та витрачається на зміцнення металу. Збалансувати прихід і витрати енергії можна збільшенням температури в осередку деформації. При цьому зростає тепловміст металу без зростання його міцності у випадку холодного прокатування.

**Ключові слова:** осередок деформації, холодне прокатування, тонкий лист, кінетична енергія, потенційна енергія, енергетичний баланс.

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-56-61

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Велику частку металовиробів, що використовуються в машинобудуванні, будівництві, транспорті, авіації та інших галузях, складає листопрокатна продукція, до якої пред'являються високі вимоги за точністю розмірів і якості внутрішнього шару при мінімальній собівартості.

Подальший розвиток листопрокатного виробництва пов'язаний з використанням нових передових технологій, що забезпечують раціональне використання енергетичних ресурсів. У зв'язку з цим пропонується дослідити витрати енергії на процес холодного прокатування тонких листів з метою оцінки витрат енергії в залежності від режимів обтиснення. Це дозволить визначати раціональні режими обтиснення при роботі прокатних станів, що підтверджує актуальність даної статті.

**Аналіз досліджень і публікацій.** При підвищенні ефективності металургійного виробництва особлива увага приділяється поліпшенню якості металовиробів [1] і зменшенню енерговитрат при прокатуванні. Одним з головних напрямів розвитку листопрокатного виробництва в Україні є створення прогресивних технологій, що дозволяють зменшити витрати енергії, підвищити якість та конкурентоспроможність продукції, що випускається.

Тонкий лист виготовляється холодним прокатуванням з гарячекатаних листів. Введення в експлуатацію на металургійних підприємствах високошвидкісних прокатних станів ставить питання про необхідність розробки нових і удосконалення існуючих режимів холодного прокатування [2] тонких листів [3].

Листопрокатне виробництво є доволі матеріалоємним і не може часто виконувати масштабне технічне переозброєння, тому нові технологічні процеси повинні базуватися на глибоких знаннях про досліджуваній об'єкт. Поглиблені уявлення про процеси листопрокатного виробництва дозволяють надати достовірну кількісну й якісну оцінку тим явищам, що мають

місце в осередку деформації при обробці тиском, і на їх основі створювати ресурсо- та енергозберігаючі технології.

Важливою умовою розвитку теорії та технології листопрокатного виробництва є виявлення фізичних закономірностей в поведінці деформуємого металу, враховуючи його контактну взаємодію з прокатними валками, та розробка нових методів розрахунку технологічних параметрів, які мають істотний вплив на витрати енергії при прокатуванні [4, 5].

Теорія і технологія листопрокатного виробництва на сьогоднішній день досягли суттєвих результатів у підвищенні продуктивності устаткування й якості готової продукції. Але методи, що використовуються в розрахунках енергосилових параметрів, мають безліч умовностей і припущень, існує декілька спрощень в кінематичних розрахунках, які зменшують точність важливих обчислень. Тому потрібно застосувати новий підхід до розрахунків енергосилових параметрів, виявити закономірності зміни деформаційних і кінематичних чинників в осередку деформації при холодному прокатуванні тонких листів.

При прокатуванні листів відбувається обтиснення металу за висотою. При цьому здійснюється подовження і розширення металу. Під час прокатування утворюється осередок деформації, параметри якого наведено на рис. 1.

Вважається [2], що між лініями  $M$  і  $N$  знаходиться дійсний осередок деформації, а між лініями  $AA'$  і  $BB'$  – геометричний осередок деформації. На утворення осередка деформації витрачається велика кількість енергії [6, 7]. Аналіз літературних джерел [5-7] показав, що для забезпечення раціональних витрат енергії потрібно детально розглянути ці витрати за окремими статтями і скласти енергетичний баланс.

**Мега статті** – дослідити витрати енергії при холодному прокатуванні тонких листів і розрахувати енергетичний баланс.

**Викладення матеріалу та результати.** Використовуючи інформацію про те, що на вході в осередок деформації відбувається інтенсивне зменшення граничної текучості матеріалу внаслідок роботи деформації і виділення тепла в осередку деформації, під впливом швидкості та ступеня деформації метал зміцнюється [8, 9]. Щоб здійснити його розширення і подовження, необхідно збільшити зусилля валків. Для визначення рівноважної температури металу в осередку деформації, при якій сталь витікатиме з осередку деформації без збільшення зусиль валків, складемо енергетичний баланс осередку деформації [9].

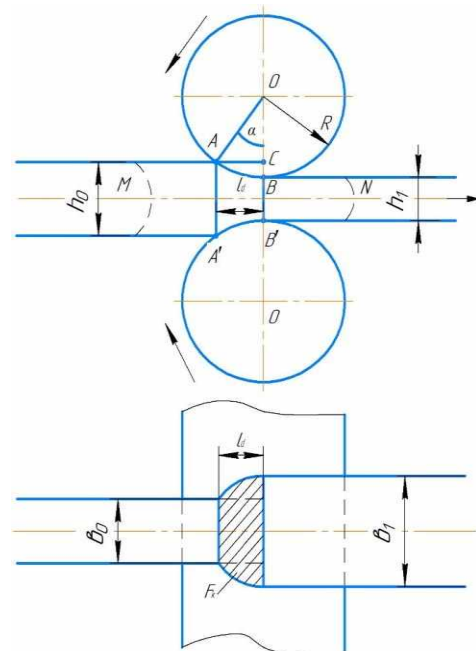
Теплота розкату [10], кДж/с

$$Q_{od}^{pb} = \xi \rho_b^{tb}, \quad (1)$$

де  $i_b^{tb}$  – тепловміст матеріалу розкату при температурі виходу з валків;  $\rho$  – густина сталі,  $\rho=7750$  кг/м<sup>3</sup>;  $\xi$  – об'ємна продуктивність, м<sup>3</sup>/с.

Прирівнявши за законом збереження енергії суму приходних статей до суми витратних статей енергетичного балансу і прийнявши, що метал входить в осередок деформації при кімнатній температурі та з відповідною границею текучості, а виходить з осередку деформації при більшій температурі та з меншою границею текучості внаслідок виділення тепла за рахунок роботи деформації, можна визначити методом наближення температуру металу, яку він набуває при прокатуванні.

Використавши рівняння (1), визначили температуру сталі на виході з осередку деформації. Результати розрахунків зведено в табл. 1; параметри режимів взято з джерела [9].



**Рис. 1.** Схема осередку деформації:  $ABB'A'$  – осередок деформації;  $h_0$  – початкова товщина листа;  $h_1$  – товщина листа після деформації;  $R$  – радіус прокатних валків;  $F_k$  – площа контакту листа з прокатними валками;  $\alpha$  – кут захоплення;  $b_0$  – ширина смуги до прокатування;  $b_1$  – ширина смуги після прокатування;  $l_0$  – довжина осередку деформації;  $M$  – течія металу до входу в осередок деформації,  $N$  – течія металу на виході з осередка деформації [2]

Як бачимо з табл. 1, результати визначення температури листа на виході з валків, виконані за рівнянням енергетичного балансу осередку деформації, підтверджують зміну границі текучості, визначену методом наближення до рівності приходу і витрати суми енергій.

Однією з приходних статей енергетичного балансу осередку деформації є енергія заготовки перед входом у валки, що складається з тепловмісту, кінетичної та потенційної енергії заготовки [6, 11, 12]. Кінетична енергія як заготовки, так і розкату характеризується їхньою масою та швидкістю. Потенційна енергія і заготовки, і розкату представлена поверхневою енергією та міцністю.

Таблиця 1

Результати визначення зміни границі текучості сталі

Температура заготовки, $t_{пр}$ , °C	Колова швидкість поверхні валків, $v_b$ , м/с	Границя текучості сталі, кДж/кг	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, $c^{-1}$	Температура розкату, $t_b$ , °C	Зміна температури в осередку деформації, $\Delta t_b$ , °C	Границя текучості сталі при виході з валків, кДж/кг	Зміна границі текучості в осередку деформації, кДж/кг
50	20	2,57	8	$0,77 \cdot 10^6$	376	329	1,98	-0,59
100	15	2,48	12	$1,4 \cdot 10^6$	786	686	1,26	-1,22

Зауважимо, що сталій процес прокатування розпочинається після утворення осередку деформації, тобто виділена питома довжина заготовки  $l_0 = 1$  м уже має передісторію довжиною  $R \sin \alpha$ , де  $2\alpha$  – кут між дотичними в симетричних точках контакту нижнього і верхнього валків у мить утворення осередку деформації, а  $\alpha$  – кут захвату, як його розуміють в теорії повздожньої прокатки [2, 11, 12]. Після захвату лінійна швидкість руху заготовки в напрямку прокатування дорівнює коловій швидкості валків  $v_b$ . З такою ж швидкістю рухається і осередок деформації в напрямку, протилежному напрямку прокатування [13].

Одночасно з входом заготовки (її переднього краю) в міжвалковий робочий простір, тобто в осередок деформації здійснюється симетричне двобічне стиснення металу. Це стиснення при сталому режимі прокатування можна вважати адіабатичним, враховуючи малу тривалість перебування металу в осередку деформації, що сприяє збільшенню пластичності, тобто текучості та зменшенню в'язкості металу внаслідок виділення тепла при виконанні роботи його деформації. Згідно з нашою концепцією розгляду вмісту осередку деформації як високов'язкої рідини вважаємо, що в об'ємі цього осередку деформації діє закон Паскаля, тобто тиск, створюваний валками на поверхню заготовки при вході в осередок деформації миттєво (зі швидкістю звуку) розповсюджується по всьому деформованому об'єму. Такі умови створюють можливість витікання металу в розширення і в подовження, а в калібрах – тільки в подовження. Саме нормальні напруження, віднесені до площі контактної поверхні між валками і розкатом, утворюють силу, яка виконує роботу деформації розкату. Дотичні ж напруження в контактній міжвалковій поверхні, віднесені до площі цієї поверхні та направлені проти руху валків і напрямку прокатки, формують силу, яка забезпечує швидкість розкату – продуктивність кліті.

Можна по-різному розуміти головну роль сил в осередку деформації: без тягнучої сили тертя не може бути прокатування, але без сили тиску немає сили тертя і також не може бути прокатування. Проте все ж очевидно, що радіальна сила тиску валків на штабу за своєю природою є тільки силою, яка потрібна і достатня для здійснення пластичної деформації розкату, тобто є деформуючою силою. Ця сила визначається, насамперед, здатністю тіла чинити опір пластичній деформації в цих умовах, тобто тиском металу на валки, і, звичайно, площею контактної поверхні розкату з валками.

Ця сила є деформуючою, а будь-яка деформація супроводжується витратою енергії. Отже, на певному шляху і при певній швидкості вона здатна здійснити і здійснює той мінімум роботи, який потрібний і достатній для забезпечення заданої деформації розкату за один прохід. Те, що ця сила тиску валків на штабу відносно до валків спрямована радіально, не має ніякого значення відносно до розкату. Важливо лише, що ця сила перпендикулярна до напрямку руху розкату, оскільки лише в цьому разі теоретична сила не здійснює роботу.

Отже робота сили деформації полягає в створенні в осередку деформації тиску – напруження, дещо більшого напруження текучості  $\sigma_{0,2 T}$ , внаслідок чого метал витікає з осередку деформації в розширення і подовження. Загалом сила деформації складається як рівнодіюча

напруження текучості та 20% відносної деформації при обтисненні. Рівнодіюча свою роботу виконує на відстані, яка дорівнює величині обтиснення  $\Delta h = h_0 - h_1$ . При контактній взаємодії металу та валків утворюється площа контактної поверхні, що обмежує осередок деформації [14, 15]. В процесі прокатування вона змінюється. Рівнодіюча сили напруження і сили нормального тиску на валки завжди цікавила прокатників-вчених. Тому загальновідомі класичні залежності А.А. Дінника [16], С.І. Губкіна [17], М.А. Зайкова [18] і багатьох інших, які дозволяють розраховувати опір деформації, враховуючи температуру, ступінь і швидкість деформації за формулою множинної кореляційної залежності між названими параметрами.

Маючи теоретичну основу енергетичного балансу осередку деформації, розрахуємо прихідні статті балансу для досліджуваних режимів прокатування тонких листів. До прихідних статей балансу відносяться: фізичне тепло заготовки, механічна енергія валків і потенційна енергія зовнішньої поверхні та її міцності.

Щосекундний прихід теплової енергії в осередок деформації

$$Q_{od}^{nt} = \frac{i_t \rho_m V_{od}}{\tau_{od}}, \quad (2)$$

де  $i_t$  – тепловміст сталі, кДж/кг;  $\rho_m$  – густина сталі, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{od}$  – об'єм осередку деформації, м<sup>3</sup>;  $\tau_{od}$  – час перебування металу в осередку деформації.

Кінетична енергія валків надходить в осередок деформації через контактну поверхню протягом перебування металу в осередку

$$W_{od}^{nt} = \sigma_T^t R \frac{b_0 + b_1}{2} v_b \sin \alpha, \quad (3)$$

де  $b_0$ ,  $b_1$  – початкова ширина заготовки (осередку деформації) і розкату (кінцева ширина осередку деформації), м;  $R$  – радіус валків, м;  $\alpha$  – кут захвату;  $\sigma_T^t$  – границя текучості при відповідній температурі.

Прихід потенційної енергії в осередок деформації у вигляді енергії зовнішньої поверхні, кДж/с

$$E_{nn}^{nt} = 2(b_0 + h_0) v_0 \sigma_{nn}^t, \quad (4)$$

де  $\sigma_{nn}^t$  – поверхнева енергія металу, що представляє суму поверхневого натягу та теплової енергії, витраченої на створення нової поверхні при незмінній сумі загальної поверхневої енергії твердого тіла;  $v_0$  – швидкість прокатування на вході в осередок деформації.

Прихід потенційної енергії в осередок деформації у вигляді міцності металу:

$$E_{лмм}^t = \frac{V_{od}}{\tau_{od}} \cdot \frac{\sigma_T^t}{102}, \quad (5)$$

де 102 – коефіцієнт переводу кг·м в кДж.

Сумарний прихід енергії в осередок деформації, кДж/с

$$\sum E_{od}^{nt} = Q_{od}^{nt} + W_{od}^{nt} + E_{nn}^{nt} + E_{лмм}^t \quad (6)$$

До витратних статей енергетичного балансу осередку деформації відносяться: кінетична енергія розкату, потенційна енергія новоутвореної поверхні металу та міцності, робота деформації металу і фізичне тепло розкату.

Кінетична енергія розкату, кДж/с

$$E_{odn}^{bt} = \frac{m v_1^2}{2q102} = \frac{\rho b_1 h_1 v_1^3}{2 \cdot 9,81 \cdot 102}, \quad (7)$$

де  $m$  – масова продуктивність осередку деформації, кг/с;  $v_1$  – швидкість розкату, м/с.

Втрати потенційної енергії з осередку деформації у вигляді новоутвореної поверхні

$$E_{nn}^{bt} = 2(b_1 + h_1) v_1 \cdot \sigma_{nn}^t. \quad (8)$$

Витрати енергії на зміцнення металу

$$E_{лмм}^{bt} = \frac{V_{od}}{\tau_{od}} \sigma_T^t. \quad (9)$$

Робота деформації металу обчислюється з урахуванням, що в осередку деформації метал обтискується, розширюється та подовжується

$$A_{od}^{bt} = \sigma_T \left( \frac{\Delta h}{h_0} + \frac{\Delta b}{b_0} + \frac{\Delta l}{l_0} \right) \frac{b_{cp} h_{cp} R \sin \alpha}{102 \tau_{od}}, \quad (10)$$

де  $\Delta l$  – подовження смуги,  $\Delta l = l_1 - l_0$ ,  $l_1$  – кінцева довжина смуги;  $b_{cp}$  – середня ширина смуги,  $b_{cp} = (b_1 + b_0)/2$ ;  $h_{cp}$  – середня товщина смуги,  $h_{cp} = (h_1 + h_0)/2$ .

Сумарні витрати енергії в осередку деформації, кДж/с

$$\sum E_{od}^{bt} = Q_{od}^{pb} + E_{odn}^{bt} + E_{nn}^{bt} + E_{nmm}^{bt} + A_{od}^{bt}. \quad (11)$$

У табл. 2 зведено основні параметри прокатування в характерних випадках, що використувались у дослідженнях.

Таблиця 2

Параметри прокатування в характерних випадках

$\alpha$ , град	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$b_0$ , мм	$b_1$ , мм	$t_{np}$ , °C	$l_1$ , м	$V_{od} \cdot 10^{-6}$	$\tau \cdot 10^{-6}$ , с	$V_{od}/\tau$ , м <sup>3</sup> /с
2,4	2	1,92	1000	1010	50	1030	0,0052	0,13	0,04
6,0	5	4,7	1000	1020	100	1040	0,0546	0,728	0,075

При врахуванні впливу ступеня деформації, температури і швидкості деформації на границю текучості сталі розрахунок енергетичного балансу (табл. 3) показав, що під час холодного прокатування прихід енергії перевищує його витрати. Це ще раз підтверджує, що збалансування відбувається за рахунок підвищення температури в осередку деформації.

Вважаючи температуру величиною статичною, можна допустити наявність прошарків чи об'ємів розміром рідинних кластерів, товщиною в декілька атомів, маючих температуру, яка суттєво перевищує середню температуру осередку деформації та забезпечує плин металу при збільшеному опорі внаслідок наклепу.

Таблиця 3

Енергетичний баланс осередку деформації

Статті балансу										
Прихід енергії, кДж/с					Витрати енергії, кДж/с					
теплота заготовки	механічна енергія валків	потенційна енергія зовнішньої поверхні	потенційна енергія міцності металу	всього	теплота розкату	кінетична енергія розкату	потенційна енергія новоутвореної поверхні	потенційна енергія міцності металу	робота деформації металу	всього
3104	15038	156	11882	30180	7692	67	162	11884	8862	28667
29062	46717	115	21448	97342	33940	92	122	21544	24024	79722

Як видно з порівняння сумарних значень приходу та витрат енергії в осередку деформації при температурі заготовки (табл. 3), прихід перевищує витрати енергії в процесах прокатування. Збалансувати прихід та витрати енергії можна збільшенням температури в осередку деформації; при цьому зростає тепловміст металу без зростання його міцності у випадку холодного прокатування. Повний енергетичний баланс осередку деформації можна отримати, врахувавши залежність границі текучості від ступеню, температури та швидкості деформації.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У статті запропоновано оновлену методику для визначення витрат енергії на прокатування; встановлено раціональні режими, які дозволяють зменшити витрати енергії при прокатуванні; визначено кількість енергії, що надійшла до осередку деформації та складається з теплоти заготовки, механічної енергії валків, потенційної енергії поверхневого натягу металу, а також витрати енергії, що складаються з теплоти розкату, кінетичної енергії розкату, потенційної енергії зовнішньої поверхні та міцності металу і роботи деформації; розраховано енергетичний баланс осередку деформації, який показав, що під час холодного прокатування прихід енергії перевищує його витрати. Це ще раз підтвердило, що збалансування відбувається за рахунок підвищення температури в осередку деформації.

У подальшому аналогічні розрахунки планується виконати для прокатування сортових профілів.

## Список літератури

1. **Zhbanova O. M., Saithareyev L. N., Skidin I. E., Sharovalova N. N., Gubin G. G** Investigation of the influence of electro-impulse current on manganese liquid-alloy. Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, Sumy, Ukraine. P. 207-213 [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_22).
2. **Василев Я. Д.** Теорія позовжньої прокатки / **Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв.** – Підручник. – Донецьк: УНІ-ТЕХ, 2009. – 488 с.
3. **Чубенко В. А.** Визначення впливу режиму обтиснення при прокатуванні на внутрішню будову металу / **В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька**//Качество минерального сырья. Сб. научн. тр., Т2, Кривий Ріг: Изд. центр ГВУЗ «КНУ», 2018 – С.151-159.
4. Дослідження об'ємноструктурних і енергетичних перетворень в сталях при прокатуванні. Монографія / **В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька,** – Кривий Ріг: Видавництво (ФОП Чернявський Д.О.), 2018. – 178 с.
5. Оптимізація процесу налаштування безперервної листової прокатки / **В. С. Єгоров, О. П. Єгоров, О. Ю. Потап** та інші.//Металлургическая и горнорудная промышленность, 2016, № 1. – С. 106-109.
6. **Максименко О. П.** Теоретический анализ влияния натяжений на энергозатраты и устойчивость процесса прокатки / **О. П. Максименко, Д. И. Лобойко** // Вісник «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 42 (1015). – С. 119-125.
7. **Скляр В. О.** Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Учебное пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
8. **Бережний М. М.** Енергетичний баланс осередку деформації при прокатуванні/ **М. М. Бережний, А. А. Хіноцька, В. А. Чубенко**// Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: вид – во СНУ ім. В. Даля, 2012. – С. 60 – 67.
9. Час перебування металу в осередку деформації та утворення нової поверхні/ [**Бережний М. М., Чубенко В. А., Хіноцька А. А., Глінкин А. В.**] // Вісник КНУ. – Вип. 30. – 2012. – ст. 171 – 174.
10. **Писаренко Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / **Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев.** – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
11. **Коновалов Ю. В.** Пути решения температурной задачи прокатки / **Ю. В. Коновалов, А. С. Хохлов** // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. 2012. – № 2 (31). – С. 185-188.
12. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке/ **П. И. Полухин, В. А. Николаев** и др. – М.: Металлургия, 1974. – 199 с.
13. **Старченко Д. И.** К расчету давления металла на валки/ **Старченко Д. И., Резниченко Е. И.** // Известия АН СССР. Металлы. – 1985. – № 4. – С.80-88.
14. **Коновалов Ю. В.** Справочник прокатника. /**Ю. В. Коновалов.** – Справочн. изд-е в 2-х книгах. – Книга 1. – Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2009. – 640 с.
15. **Огинский И. К.** Силовая картина в очаге деформации при установившемся процессе прокатки / **И. К. Огинский** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 1. – С. 37-40.
16. **Губкин С. И.** Теория обработки металлов давлением / **С. И. Губкин** – М.: Металлургиздат, 1947. – 360 с.
17. **Владимиров В. В.** Физическая природа разрушения металлов // **В. И. Владимиров.** – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
18. **Зайков М. А.** Режимы деформации и усилия при горячей прокатке/ **Зайков М. А.** – М.: Металлургиздат, 1960. – 286 с.

Рукопис подано до редакції 02.04.2021

УДК 622.274.3

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд.техн.наук  
Криворізький національний університет

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ СИСТЕМАМИ ПІДПОВЕРХОВОГО ОБВАЛЕННЯ РУДИ ТА ВМІЩУЮЧИХ ПОРІД

**Мета.** Метою виконаних досліджень є удосконалення технології розробки залізорудних родовищ системами підповерхового обвалення руди та вміщуючих порід, яка дозволить підвищити кількість видобутої рудної маси при наявності нестійких порід висячого боку.

**Методи дослідження.** При видобутку багатих залізних руд Криворізького залізорудного басейну застосовують системи розробки з відкритим очисним простором та з обваленням порід, які дозволили підвищити вміст заліза в видобутій рудній масі на 0,5–1,5%. Основним недоліком даних систем розробки є обмежені умови застосування. Так, наявність зі сторони висячого боку нестійких порід суттєво погіршують показники вилучення. Запропонований варіант системи розробки з переуцільненим шаром руди у висячого боку виключає проникнення пустих порід в очисний блок, що відпрацюється. Однак, при визначенні ширини переуцільненого шару не враховуються фізико-механічні властивості гірських порід. Так, при відпрацюванні блоку в нестійких породах ширина цілика у висячого