

DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.2

УДК 621.771.011

**В.М. Самохвал**, к.т.н., доцент, volsamokhval@gmail.com

**В.І. Чуйко**, здобувач вищої освіти 2-го рівня

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ ПРИ ПРОКАТУВАННІ ВИСОКИХ ТІЛ НА ОБТИСКНИХ СТАНАХ

*У роботі розглянуто особливості формозміни при прокатуванні високих тіл, що є досить актуальною задачею для обтискних станів та чорнових клітей сортових прокатних станів. Метою роботи є дослідження формозміни металу, зокрема розширення, при прокатуванні високих тіл в ящичних калібрах. За результатами планованого експерименту отримано модель розширення високих тіл в ящичних калібрах, яка забезпечує прийнятний рівень точності. Модель рекомендується до використання при розробці режимів обтискень обтискних станів та чорнових клітей сортових станів.*

**Ключові слова:** розширення; високе тіло; осередок деформації; обмежене розширення; ящичний калібр.

*The peculiarities of changing form during rolling of high bodies are considered in the work, which is a rather actual task for cogging mills and roughing stands of bar and section rolling mills. The task of the work is to study the deformation of the metal, in particular spread, when rolling high bodies in box gauges. According to the results of the planned experiment, a model of expansion of high bodies in box gauges was obtained, which provides an acceptable level of accuracy. The model is recommended for use in the development of sequence pass of cogging mills and rough stands of merchant mills.*

**Keywords:** spread; high body; deformation zone; limited spread; box grooves.

### Постановка проблеми

Формозміна металу в процесі прокатування в калібрах визначається технологічно обумовленою деформацією по товщині розкату та похідними від неї видовженням та розширенням. Якщо видовження, як показник зменшення площі поперечного перерізу, відповідає основній меті прокатування, то розширення у більшості випадків прагнуть зменшити. В залежності від геометричних параметрів осередку деформації величина розширення може змінюватись в широких межах та значною мірою визначати ефективність технології прокатування. Зокрема, при прокатуванні «високих тіл» через значну нерівномірність деформації виникає подвійне бочкоутворення та значні розтягуючі напруження, що збільшує кількість проходів і може негативно впливати на якість прокату.

Для класифікації процесів прокатування за висотою використовують параметр форми осередку, який визначають як відношення його розмірів в поздовжньо-вертикальній площині, а саме відношення довжини осередку  $l_d$  до середньої товщини розкату  $h_m$ . Процеси деформування за  $l_d/h_m < 1$  зазвичай відносять до прокатування високих тіл. Такі процеси характерні для блюмінгів, обтискних станів, вертикальних клітей широкоштабових станів. В окремих випадках, в залежності від використовуваних режимів деформування, прокатування високих тіл має місце і в чорнових клітях сортових станів. Тому, незважаючи на незначну кількість діючих блюмінгів, дослідження особливостей формозміни при прокатуванні високих тіл зберігають актуальність.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Характерною особливістю прокатування високих тіл є значна нерівномірність деформації по товщині розкату. В залежності від розподілу деформаційно-швидкісних параметрів по висоті розкату О. І. Целіков [1] виділяє два принципово відмінних випадки прокатування.

За  $l_d/h_m > 0,5 - 1,0$  деформація стиснення розповсюджується по всій висоті перерізу розкату. «Нерівномірність напружень, деформацій та швидкостей переміщення металу, що прокатується, обумовлена контактними силами тертя ... Зовнішні частини розкату, в яких відсутня пластична деформація, перешкоджають розповсюдженню нерівномірності деформацій» [1, с. 100]. В результаті, для таких випадків поперечна деформація середніх прошарків переважає деформацію приконттактних.

Коли параметр форми осередку  $l_d/h_m < 0,5 - 1,0$ , нерівномірність розподілу напружень, деформацій та швидкостей зростає через вплив зовнішніх зон. «Деформація стиснення не розповсюджується на увесь переріз металу, а локалізується в зонах прилеглих до контактних поверхонь та в розташованих рядом позаконттактних зонах» [1, с. 103]. Через таку особливість може виникати подвійне бочкоутворення на боковій поверхні розкату. За певних умов в середній частині розкату може відбуватись навіть «утяжка», тобто від'ємне розширення [2].

П. І. Полухін в роботі [3], використовуючи параметр форми осередку у вигляді  $l_d/h_0$ , пропонує наступний поділ процесів прокатування: високі тіла — при  $l_d/h_0 < 0,6$ ; середні за висотою — при  $l_d/h_0$  від 0,6 до 1,0; низькі тіла — при  $l_d/h_0 > 1,0$ . Такий поділ ґрунтується також на дослідженнях В. М. Клименко [4], який довів, що при  $l_d/h_0 > 0,6$  показник розширення середніх прошарків розкату, переважає показник розширення поверхневих прошарків. При цьому, за даними [2, с. 119], проникнення пластичної деформації на всю товщину розкату спостерігається при  $l_d/h_0 > 0,3$ . По мірі зростання параметру форми від значення 0,3, поперечна деформація середніх прошарків відбувається більш інтенсивно, ніж інших, що «призводить до зміни форми бічної поверхні з утворенням випуклості в середній частині». Отже, при прокатуванні за параметра форми осередку від 0,3 до 0,6, спостерігається відносно рівномірний розподіл розширення по товщині розкату.

Такий висновок приблизно відповідає даним О. П. Чекмарьова [5, с. 71], отриманих з використанням параметру форми у вигляді  $l_d/h_0$ . За його даними подвійне бочкоутворення спостерігається при  $l_d/h_0 < 0,5$ , для інтервалу значень  $0,55 \leq l_d/h_0 \leq 1,0$  «розширення по висоті приблизно рівномірне», а для  $l_d/h_0 > 1,0$  отримуємо «помітне одинарне бочкоутворення». Крім параметру форми осередку, Чекмарьов виділяє вплив відношення товщини розкату та діаметру валків. При  $h_0/D_k = 0,5 \div 0,9$  спостерігається подвійне бочкоутворення. Але в залежності для розрахунку розширення, запропонованій Чекмарьовим [2], використовуються такі параметри як абсолютне обтиснення  $\Delta h$ , відношення середньої ширини до середньої товщини  $B_{cp}/h_m$ , відношення середньої ширини до довжини осередку деформації  $B_{cp}/l_d = B_{cp}/(R \cdot \alpha)$  та кут захвату  $\alpha$

$$\Delta b = \frac{2 \cdot K_{con} \cdot B_{cp} \cdot \Delta h}{(h_0 + h_1) \cdot \left[ 1 + (1 + \alpha) \cdot \left( \frac{B_{cp}}{R \cdot \alpha} \right)^n \right]}$$

де  $K_{con}$  — коефіцієнт, що враховує обмеження розширення від дії бічних стінок ящикних калібрів;  $n$  — показник, який дорівнює 1,0 для вузького осередку, коли  $B_{cp}/(R \cdot \alpha)$ , а для інших випадків дорівнює 2.

Коефіцієнт обмеження розширення при прокатуванні в ящикних калібрах рекомендується обирати у межах 0,6—0,8.

Інші відомі залежності для розрахунку розширення дозволяють враховувати значно меншу кількість параметрів прокатування. Досить наочний перелік таких залежностей, відповідно до основних етапів розвитку теорії та технології прокатування, наведено в підручнику [1]. Перші залежності враховували лише величини абсолютного обтиснення (формула Л. Жеза), відносного обтиснення та довжини осередку деформації (формула Е. Зібеля). В подальші роки були отримані залежності, що враховували вплив відносного обтиснення та довжини зони відс-

тавання (формула Б. П. Бахтінова), логарифм деформації по товщині, довжину зони відставання, натягнення та ширину розкату (формула О. І. Целікова).

Серед інших залежностей слід виділити досить поширену емпіричну залежність Вусатовського (Wusatowski), яка має вид [6, 7]

$$\beta = \frac{b_{out}}{b_{inl}} = a \cdot c \cdot d \cdot f \cdot \left( \frac{h_{out}}{h_{inl}} \right)^{-w};$$

$$w = 10^{-1,269 \cdot \left( \frac{h_{inl}}{D} \right)^{0,556} \cdot \frac{b_{inl}}{h_{inl}}},$$

де  $h_{out}$  — товщина розкату на виході з осередку деформації;  $h_{inl}$  — товщина розкату, що надходить в осередок деформації;  $a, c, d, f$  — коефіцієнти, що враховують вплив, відповідно, температури, швидкості прокатування, хімічного складу матеріалу, що прокатується, та стану поверхні валків;  $D$  — діаметр валків.

З аналізу наведених співвідношень слідує, що основними факторами, що визначають величину розширення за методикою Вусатовського, є такі безрозмірні критерії: показник деформації по висоті  $h_{out}/h_{inl}$ , відношення початкових розмірів розкату  $b_{inl}/h_{inl}$ , відношення початкової товщини до діаметру валків  $h_{inl}/D$ .

Також відома емпірично-теоретична методика визначення розширення при прокатуванні в калібрах простої форми, запропонована Шинокурою та Такаї у вигляді [8]

$$\frac{\Delta b}{b_{inl}} = a \cdot \frac{l_{dm}}{b_{inl} + 0,5 \cdot H_{inl}} \cdot \frac{A_h}{A_{inl}},$$

де  $a$  — коефіцієнт пропорційності, який для систем калібрів круг-овал, квадрат-овал, квадрат-ромб та ромб-ромб рекомендовано приймати 0,83;  $l_{dm}$  — середня довжина осередку деформації.

Але ця методика набула значного поширення у дещо іншому представленні [9, 10]

$$b_{out} = b_{inl} \left[ 1 + \gamma \cdot \frac{\sqrt{R_{mean}(\bar{H}_i - \bar{H}_o)}}{b_{inl} + 0,5 \cdot H_{inl}} \cdot \frac{A_h}{A_{inl}} \right],$$

де  $b_{inl}, b_{out}$  — ширина розкату на вході (inlet) та виході (outlet) з осередку деформації, відповідно;  $\bar{H}_i, \bar{H}_o$  — приведена товщина розкату, відповідно, на вході та виході з осередку;  $H_{inl}$  — габаритна (максимальна) товщина розкату на вході;  $A_{inl}$  — площа поперечного перерізу розкату на вході в осередок;  $A_h$  — зміщена площа перерізу;  $R_{mean}$  — середній (катаючий) радіус валків;  $\gamma$  — коефіцієнт, що визначається з експериментів.

Емпіричний коефіцієнт  $\gamma$  для овальних калібрів, в який задають круглий підкат, становить 0,83, а для круглих калібрів — 0,97.

Приведену товщину розкату, тобто товщину прямокутників з шириною, що відповідає відстані між точкам перетину контурів підкату та калібру, визначають з залежностей

$$\bar{H}_i = \frac{A_{inl} - A_s}{b_c}, \quad \bar{H}_o = \frac{A_{inl} - A_h - A_s}{b_c},$$

де  $b_c$  — ширина, що відповідає відстані між точками перетину контурів підкату та калібру;  $A_s$  — бічна площа контуру підкату, яка не піддається обтисненню, тобто виходить за межі  $b_c$ .

Методика Шинокуро-Такаї, основою якої є метод приведення до прямокутника розкату, дозволяє враховувати вплив обтиснення (через зміщену площу), довжини осередку деформації, ширини та товщини підкату.

Для випадку прокатування високих тіл, зокрема слябів в вертикальних валках, Ю. А. Єремін, за даними [11], запропонував залежність

$$\Delta b_B / \Delta h_B = 0,537 - 0,106 \frac{l_{db}}{h_0} + 0,0116 \frac{b_{cp}}{l_{dB}} - 0,0052 \frac{l_{db}}{h_0} \cdot \frac{b_{cp}}{l_{dB}},$$

де  $l_{db}$  — довжина осередку деформації в вертикальних валках;  $b_{cp}$  — середня ширина розкату.

Області визначення використаних в залежності параметрів становлять:

$$\frac{l_{db}}{h_0} = 0,67 \div 2,0; \quad \frac{b_{cp}}{l_{dB}} = 5,0 \div 25.$$

В роботі [12], на основі експериментального прокатування та моделювання з використанням методу кінцевих елементів, виконано дослідження впливу геометричних параметрів калібрів та режиму обтиснень при реверсивному прокатуванні підкатів на енергосилові параметри та величину обрізі. Досліди виконували на прокатному стані з валками діаметром 925 мм з використанням блювів 320×400 мм. Геометричними параметрами, які розглядались в дослідженні, були: випуск (кут нахилу бічних стінок ящичного калібру), радіуси закруглень по дну калібру, глибина врізу. Кут нахилу призначали на рівнях 9°, 15°, 25°, 35°. Радіус закруглення по дну калібру змінювали на трьох рівнях: 15, 30, 45 мм. Глибину врізу змінювали також на трьох рівнях: 50, 63, 80 мм.

За результатами досліджень встановлено, що невеликі обтиснення та відповідно збільшене число проходів призводять до зменшення навантажень та формування збільшеного за розмірами «хвоста риби». Прокатування з збільшеними обтисненнями призводить до зниження ефективного напруження і дає більшу форму хвоста риби. Збільшення обтиснення за прохід та числа кантовок забезпечує краще проникнення деформації та зменшення обрізі (менше «хвіст риби»).

Кут нахилу бічних стінок ящичного калібру у 9° забезпечує мінімальні навантаження і потрібне заповнення калібру. По мірі збільшення кута нахилу зростають навантаження і проявляється не повне заповнення калібру. По мірі збільшення глибини врізу калібру покращуються умови проникнення деформації (пророблюваність), зменшуються навантаження та кінцева обрізь. Радіуси закруглень по дну калібру прямо пропорційно впливають на навантаження, тобто з збільшенням радіусу енергосилові параметри зростають.

З наведеного аналізу можемо зробити висновок, що основними групами параметрів, які визначають величину розширення при прокатуванні, в тому числі і в калібрах, є наступні:

- розміри розкату:  $h_0$ ,  $b_0$  та їх відношення  $b_0/h_0$ ;
- показники деформації:  $\Delta h$ ,  $\varepsilon$ ,  $h_0/h_1$ ,  $\ln(h_0/h_1)$ ;
- параметри осередку деформації:  $l_d$ ,  $l_d/h_m$ ,  $l_d/h_0$ ,  $b_{cp}/l_d$ ,  $b_0/l_d$ ,  $b_0/h_m$ ,  $D/h_m$ ;
- параметри калібру  $\psi$ ,  $h_{gr}/h_m$ ,  $r$ ;
- умови тертя — коефіцієнт тертя, який відображає вплив температуро-швидкісних параметрів, хімічного складу металу, який прокатують, та матеріалу валків, стан поверхні валків.

З наведеного переліку параметрів, за даними наведених публікацій, можемо скласти ранговий ряд за мірою впливу на розширення

$$\Delta b = \varphi(l_d/h_m; \varepsilon; b_0/h_0; f; D/h_m; h_{gr}/h_m).$$

Для випадків прокатування високих тіл найбільш значимим є параметр форми, який відображає вплив як деформаційного параметру ( $\Delta h$ ), так і радіусу валків та товщини розкату.

Крім цього, для високих тіл важливим є також параметр  $h_{gr}/h_m$ .

Але з відомих залежностей лише формула Єремїна містить параметр форми осередку. Тому, отримання залежності для визначення розширення для умов прокатування високих тіл є актуальною задачею.

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження формозміни металу, зокрема розширення, при прокатуванні високих тіл в ящичних калібрах.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі:

- розробка плану експерименту для дослідження розширення металу з використанням наявного лабораторного обладнання;

- проведення експерименту, аналіз відтворюваності дослідів;
- отримання моделі формозміни високих тіл з врахуванням параметру форми осередку деформації;
- порівняння отриманих результатів з даними інших авторів і аналіз точності моделі.

#### Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень формозміни металу при прокатуванні високих тіл в ящичних калібрах використали лабораторний прокатний стан з сталевими валками діаметром 180 мм. Стан оснащено відкритими підшипниками ковзання з бронзовими вкладишами. Швидкість прокатування становить 0,3 м/с. Потужність двигуна 40 кВт. З наявних на комплекті валків калібрів використовували один ящичний калібр шириною по дну 16 мм, глибиною врізу 7 мм та випуском 15°.

З наведеного рангового ряду параметрів, які впливають на розширення обмежились вивченням параметру форми осередку деформації у вигляді  $l_d/h_0$  та відношення початкових розмірів зразків  $b_0/h_0$ . В якості цільової функції (функції відгуку) обрали коефіцієнт розширення  $\beta$ , як відношення максимальної ширини розкату після прокатування до початкової ширини зразка. При цьому початкова ширина зразків для всіх дослідів була постійною — 16 мм. Товщину зразків визначали виходячи з можливостей лабораторного стану. Матеріал зразків — свинець.

Для проведення досліджень обрали план повного двофакторного експерименту з зміною факторів на трьох рівнях. План експерименту та основні геометричні параметри дослідів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. План експерименту та основні геометричні параметри за планом

№ досліду	План експерим.		Значення факторів		Плановані параметри прокатування					
	X1	X2	X1 ( $b_0/h_0$ )	X2 ( $l_d/h_0$ )	$h_0$	$l_d$	$\Delta h$	$\varepsilon$	$h_m$	$l_d/h_m$
1	-1	-1	0,32	0,30	50,00	15,00	2,71	0,054	48,64	0,3084
2	0	-1	0,49	0,30	32,65	9,80	1,16	0,035	32,07	0,3054
3	+1	-1	0,66	0,30	24,24	7,27	0,64	0,026	23,92	0,3040
4	-1	0	0,32	0,45	50,00	22,50	6,10	0,122	46,95	0,4792
5	0	0	0,49	0,45	32,65	14,69	2,60	0,080	31,35	0,4687
6	+1	0	0,66	0,45	24,24	10,91	1,43	0,059	23,53	0,4637
7	-1	+1	0,32	0,60	50,00	30,00	10,84	0,217	44,58	0,6730
8	0	+1	0,49	0,60	32,65	19,59	4,62	0,142	30,34	0,6457
9	+1	+1	0,66	0,60	24,24	14,55	2,55	0,105	22,97	0,6333

В кожній точці плану виконували по два дослідів. Прокатування здійснювали з використанням ввідних лінійок та вивідної проводки для нижнього валка. Вимірювання розмірів зразків виконували штангенциркулем класу точності 0,05 мм.

Фактичні розміри зразків та результати дослідів, після усереднення, зведено до табл. 2. В таблиці наведена максимальна ширина зразків. Під терміном «максимальна ширина зразків» розуміється ширина зразків по потовщенням при наявності подвійного бочкоутворення на бічній поверхні, що спостерігалось для зразків з товщиною 32 та 50 мм.

Обробка результатів експерименту включала визначення коефіцієнтів регресії для поліноміальної моделі другої степені

$$y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_1^2 + a_4 \cdot X_2^2 + a_5 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Визначення коефіцієнтів регресії виконали методом найменших квадратів за методикою [13], як це показано в табл. 3. Використовуючи отримані коефіцієнти регресії визначали розра-

хункові значення цільової функції послідовно для лінійної моделі, лінійної з взаємодією факторів та квадратичної без взаємодії. Для вказаних моделей в кодованому виді визначали розрахункові значення для кожної точки плану та відхилення від експериментальних значень. Суму квадратів відхилень використовували для обґрунтування вибору виду моделі.

Таблиця 2. Фактичні розміри зразків (усереднені) і результати дослідів

№ досл	Розміри зразків			Фактичні параметри прокатування					
	$b_0$	$h_0$	$b_1$	$\Delta h$	$l_d$	$\varepsilon$	$h_m$	$l_d/h_m$	$\beta$
1	16,0	50,00	16,65	2,70	15,00	0,054	48,64	0,308	1,0407
2	16,1	32,50	16,25	1,15	9,75	0,035	31,93	0,305	1,0173
3	16,0	24,00	16,15	0,02	7,20	0,026	23,69	0,304	1,0096
4	16,0	50,00	18,20	6,10	22,50	0,122	46,95	0,479	1,1372
5	16,0	32,60	17,00	2,60	14,67	0,080	31,30	0,469	1,0845
6	16,1	24,00	16,50	1,40	10,80	0,059	23,30	0,464	1,0323
7	16,0	50,00	20,20	10,85	30,00	0,217	44,58	0,673	1,2625
8	16,0	32,60	18,20	4,60	19,56	0,141	30,30	0,646	1,1387
9	16,1	24,00	17,20	2,50	14,40	0,104	22,75	0,633	1,0765

Таблиця 3. Визначення коефіцієнтів регресії

Рівні фактору X1	Рівні фактору X2			Середні по рядкам	Коефіцієнти при X1	
	0,30	0,45	0,60			
0,32	1,041	1,137	1,263	1,1468	$a_1 =$	-0,0537
0,49	1,017	1,085	1,139	1,0802	$a_3 =$	0,0129
0,66	1,010	1,032	1,076	1,0394		
Середні	1,0225	1,0847	1,1592	1,0888		
			$a_0 =$	1,0888		
Коефіцієнти при X2	$a_2 =$	0,0684			$a_5 =$	-0,0387
	$a_4 =$	0,0062				

Значення суми квадратів відхилень для лінійної моделі дорівнює 0,006753, для лінійної з взаємодією факторів 0,000752, для квадратичної 0,01055. Отже, мінімальні відхилення забезпечує лінійна модель з врахуванням взаємодії факторів, яка має вид

$$\beta = 1,0888 - 0,0537 \cdot X_1 + 0,0684 \cdot X_2 - 0,0387 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Після перетворень до натурального виду факторів, модель набуває виду

$$\beta = 0,704 + 0,368 \cdot \frac{b_0}{h_0} + 1,199 \cdot \frac{l_d}{h_0} - 1,519 \cdot \frac{b_0}{h_0} \cdot \frac{l_d}{h_0}.$$

За дисперсії відтворюваності (похибка експерименту)  $S_y^2 = 2,12 \cdot 10^{-5}$  підтверджується відтворюваність дослідів та значимість коефіцієнтів регресії, відповідно [14]

$$G = 4,56 \cdot 10^{-5} / 1,91 \cdot 10^{-4} = 0,24 < G_{(0,05; 9; 1)} = 0,6385;$$

$$\Delta a = t_{(0,05; 9)} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{n}} = 2,262 \cdot \sqrt{\frac{2,12 \cdot 10^{-5}}{9}} = 0,0035.$$

Розраховане значення критерію Фішера не перевищує табличного [14]

$$F = 3,35 < F_{(0,05; 4; 9)} = 3,6,$$

що підтверджує адекватність моделі.

Для обґрунтування можливості застосування отриманої моделі розширення і оцінки її точності виконали порівняння розрахункових даних з результатами, обчисленими за залежностями інших авторів для умов проведення дослідів. Для порівняння використовували залежності Шинокури-Такаї та Єреміна. При цьому формулу Шинокури-Такаї використовували у вигляді

$$\beta = 1 + \gamma \cdot \frac{l_d}{b_0 + 0,5 \cdot h_0} \cdot \frac{A_h}{A_0},$$

де  $\gamma$  — коефіцієнт, що враховує форму калібру, який для ящикних калібрів приймали 1,0.

Інші залежності не розглядали тому, що вони призначені переважно для прокатування середніх та тонких тіл, через що для високих тіл дають занижені результати. Порівняння результатів розрахунків представлено на рис. 1.

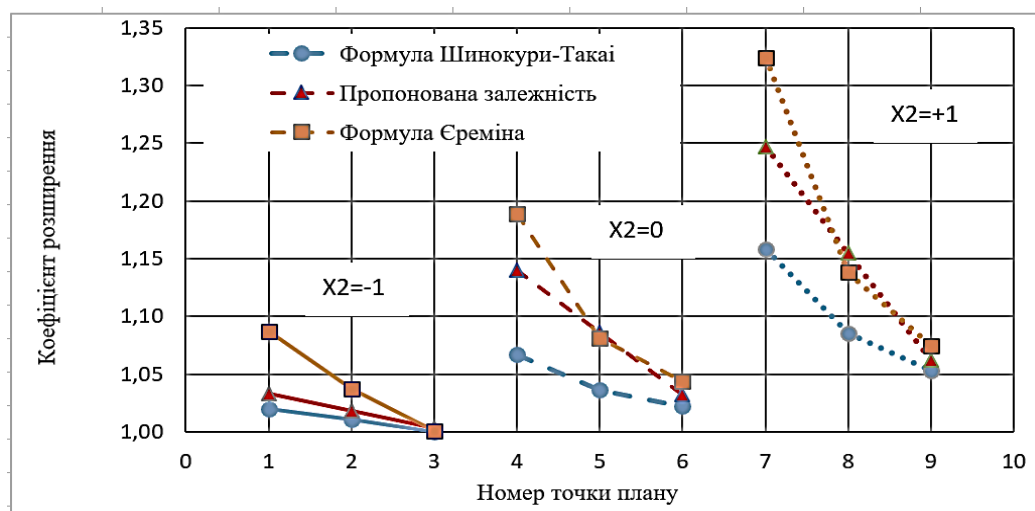


Рис. 1. Порівняння коефіцієнту розширення, визначеного за різними формулами для умов експерименту

Згідно отриманих даних, формула Шинокури-Такаї дає близькі але занижені результати у порівнянні з формулою, отриманою з експерименту. Це пояснюється тим, що формула не враховує вплив зовнішніх зон, характерний для прокатування високих тіл.

Формула Єреміна дає досить близькі результати, за винятком точок плану де товщина зразків найбільша (фактор X1 на рівні -1). Відмінності результатів для цих точок плану пояснюються впливом бічних стінок ящикного калібру. Саме в точках плану, де товщина зразків найбільша, деформація не проникає на всю товщину і локалізується в приконтактних прошарках. Через таку особливість формозміни, весь зміщений об'єм металу перерозподіляється у поперечному напрямку. Відповідно в умовах вільного розширення спостерігалось би збільшене розширення в приконтактних прошарках — подвійне бочкоутворення. Але в ящикному калібрі бічні стінки перешкоджають такому розширенню, тобто має місце обмежене розширення, що й обумовлює зменшення значень коефіцієнту розширення в проведених дослідях.

Явище обмеженого розширення має місце для всіх точок плану. При цьому величина обтиснення кожним з валків не перевищує глибини врізу, які утворюють калібр. За глибини врізу 7 мм, однакової для всіх дослідів, максимальне обтиснення кожним з валків становило 5,4 мм (дослід №7). Переповнення калібру, тобто перевищення ширини розкату ширини калібру по буртам, також спостерігалось лише у досліді №7. При цьому параметр  $h_{gr} / h_m$  для проведеного експерименту змінювався у межах від 0,144 до 0,308, відповідно  $h_{gr} / h_0 = 0,140 \div 0,292$ .

З порівняння цих параметрів проведених дослідів, можемо зробити висновок, що параметр  $h_{gr} / h_m$  незначною мірою впливає на розширення. Більш значимими параметрами є відношення глибини врізу та абсолютного обтиснення, а також співвідношення глибини врізу та

запасу на розширення, яке характеризується кутом нахилу бічних стінок ящикного калібру, або різницею ширини врізу по буртам та по дну. Дослідження впливу цих параметрів може бути проведене з використанням даних проведеного експерименту.

Для всіх залежностей характерне помірне зменшення коефіцієнту розширення з збільшенням фактору  $b_0/h_0$  та збільшення значень по мірі збільшення фактору  $l_d/h_0$ . Це свідчить про те, що отримана з експерименту залежність для визначення коефіцієнту розширення з достатньою точністю враховує вплив основних параметрів процесу і може бути рекомендована до практичного використання. При цьому область визначення параметрів становить

$$\frac{b_0}{h_0} = 0,32 \div 0,66 ; \quad \frac{l_d}{h_0} = 0,30 \div 0,60.$$

Тобто запропонована залежність може бути використана для визначення коефіцієнту розширення при прокатуванні високих тіл за  $l_d/h_0 \leq 0,60$ .

### Висновки

З аналізу відомих залежностей для визначення розширення при прокатуванні визначено найбільш значимі параметри, які впливають на показники розширення. Для умов прокатування високих тіл, найбільш значимими є параметр форми осередку деформації у вигляді відношення довжини осередку до початкової товщини розкату та відношення ширини розкату до його товщини.

За результатами планованого експерименту розмірності  $3^2$ , отримано залежність для визначення коефіцієнту розширення при прокатуванні високих тіл в ящикних калібрах. Пропонована залежність забезпечує достатній рівень точності визначення розширення в межах області визначення і може бути використана при розробці технології прокатування високих тіл.

З аналізу отриманих результатів встановлено, що для коректного врахування впливу обмеження розширення бічними стінками ящикних калібрів при прокатуванні високих тіл слід розширити область досліджень, доповнивши отриману модель такими параметрами як відношення глибини врізу до абсолютного обтиснення, а також співвідношення глибини врізу та запасу на розширення.

### Список використаної літератури

1. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки. [Учебн. пособие]. М.: Металлургия. 1980. 320 с.
2. Чекмарев А. П., Нефедов А. А., Николаев В. А. Теория продольной прокатки. Харьков: Издво госуниверситета. 1965. 212 с.
3. Полухин П. И., Воронцов В. К., Каширин В. Ф. и др. Некоторые закономерности плоского и объемного течения металла при прокатке высоких полос. Теория прокатки : Материалы Всесоюзной научно-технической конф. (г. Днепропетровск, 24-27 октября 1972 г.). Москва. Металлургия, 1975. С. 138–142.
4. Клименко В. М. Об определении величины диаметра валков блюминга. Прокатное производство. Труды Института черной металлургии АН УССР. 1957. Вып. XI.
5. Чекмарев А. П. Мутьев М. С., Машковцев Р. А. Калибровка прокатных валков : Учебное пособие. М. : Металлургия, 1971. 512 с.
6. Riljak S. Numerical Simulation of Shape Rolling. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2006. P. 32. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:10197/FULLTEXT01.pdf>
7. Wusatowski Z. Fundamentals of Rolling. Pergamon Press. 1969. 679 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-02066-X>
8. Shinokura T., Takai K. A new method for calculating spread in rod rolling. *J. Applied Metalworking*. 1982. 2(2). P. 94–99. <https://doi.org/10.1007/BF02834206>
9. Lambiase F. and Langella A. Automated Procedure for Roll Pass Design. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. 18(3) P. 263–272. DOI: 10.1007/s11665-008-9289-2



10. Biswas S. Simulation of Thermo-mechanical Deformation in High Speed Rolling of Long Steel Products. A Thesis by Degree of Master of Science. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE. 2003. 159 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/213000807.pdf> ; <https://digitalcommons.wpi.edu/etd-theses>
11. Технология прокатного производства : Справочник. В 2-х книгах. Кн. 2. Беняковский М. А., Богоявленский К. Н., Виткин А. И. и др. М.: Металлургия. 1991. 423 с.
12. Nalawade R.S., Marje V. R., Balachandran G., Balasubramanian V. Effect of pass schedule and groove design on the metal deformation of 38MnVS6 in the initial passes of hot rolling. *Sadhana (Indian Academy of Sciences)*. Vol. 41. No. 1. 2016. P. 111–124. <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0457-4>
13. Дэниел К. Применение статистики в промышленном эксперименте. (Перевод с англ. под ред. Э. К. Лецкого). М.: Мир. 1979. 301 с.
14. Системний підхід, методи досліджень процесів прокатування з аналізом поздовжньої сталості: Навчальний посібник. О. П. Максименко, О. В. Нікулін, В. М. Самохвал, Д. І. Лобойко. Кам'янське : ДДТУ. 2021. 347 с.

## RESEARCH OF FORM CHANGING IN ROLLING HIGH BODIES ON ROUGHING MILLS

Samokhval V., Chuyko V.

### Abstract

Changing form workpiece in rolling high bodies has its own features that must be taken into account when developing technology. One of the main technological parameters of change form, which largely determines the efficiency of processes, is the rate of spread. Known expressions for the calculation of the spread are obtained for a simple case of rolling, so that for the conditions of rolling high bodies do not provide to determine the spread with acceptable accuracy. Therefore, studies of the peculiarities of changing form during rolling of high bodies remain relevant not only for bloomings, but for rough passages on mills for the manufacture of flat and long products.

The aim of the work is to study the deformation of the metal, in particular spread, when rolling high bodies in rectangular box gauges.

To achieve this goal, the following tasks are solved in the work: design of experiment for the study of metal spread using existing laboratory equipment; conducting an experiment, analysis of reproducibility of experiments; obtaining a model of deformation of high bodies taking into account the shape parameter of the deformation zone; comparison of the obtained results with the data of other authors and analysis of the accuracy of the model.

From the analysis of publications on dependencies for calculation of spread, a rank number of parameters influencing of spread was defined. Of this series, for the conditions of rolling high bodies, the most significant parameters are the parameter of the shape of the deformation zone and the ratio of the initial dimensions of the workpiece. Experimental studies of the effect of these parameters on the spread were performed using a single box pass embedded in the rolls of the laboratory mill 180. For the conditions and size of the caliber, an experiment of dimension  $3^2$  was planned and conducted.

According to the results of the experiment, the dependence for determining the coefficient spread when rolling high bodies in box passes was obtained. The proposed dependence provides a sufficient level of accuracy in determining the spread within the scope and can be used in the development of technology for rolling high bodies.

From the analysis of the obtained results it is also established that to correctly take into account the effect of limiting the spread of the side walls of box grooves when rolling high bodies, the research area should be spread by supplementing the obtained model with such parameters as ratio depth grooves and stock on spread in the pass.

### References

- [1] Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyanyan S.E. (1980) *Teoriya prodol'noy prokatki : Uchebn. Posobiye [ Longitudinal rolling theory : Handbook]*. M. :Metallurhiya. [in Russian].
- [2] Chekmarev A.P., Nefedov A.A., Nikolaev V.A. (1965) *Teoriya prodol'noy prokatki [Longitudinal rolling theory]* Kharkov: State University Publishing House.[in Russian].
- [3] Polukhin P.I., Vorontsov V.K., Kashirin V.F. and others. (1972) *Nekotoryye zakonomernosti ploskogo i ob'yemnogo techeniya metalla pr iprokatke vysokikh polos. Teoriya prokatki : Materialy Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konf. [Some regularities of flat and volumetric metal flow during rolling of high strips. Rolling theory: Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Conf. (Dnepropetrovsk)]*. [in Russian].
- [4] Klimenko V. M. (1957) *Ob opredelenii velichiny diametra valkov blyuminga. Prokatnoy eprouzvodstvo. Trudy Instituta chernoy metallurgii AN USSR.. Vyp. XI. [About determining the diameter of blooming rolls. Rolling production. Proceedings of the Institute of Ferrous Metallurgy of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Issue. XI]* [in Russian].
- [5] Chekmarev A.P., Mut'ev M.S., Mashkovtsev R.A. (1971) *Kalybrovka prokatnykh valkov : Uchebnoye posobiye [Calibration of rolling rolls : Handbook]*. M.: Metallurhiya. [in Russian].
- [6] Riljak S. (2006) Numerical Simulation of Shape Rolling. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:10197/FULLTEXT01.pdf>.
- [7] Wusatowski Z. (1969) Fundamentals of Rolling : Pergamon Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-02066-X>
- [8] Shinokura T., Takai K. (1982) A new method for calculating spread in rod rolling. *J. Applied Metalworking*.. 2(2). <https://doi.org/10.1007/BF02834206>
- [9] Lambiase F. and Langella A. (2009) Automated Procedure for Roll Pass Design. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. 18(3). DOI: 10.1007/s11665-008-9289-2
- [10] Biswas S. (2003) *Simulation of Thermo-mechanical Deformation in High Speed Rolling of Long Steel Products. A Thesis by Degree of Master of Science*. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/213000807.pdf> ;
- [11] Benyakovskiy M.A., Bogoyavlenskiy K.H., Vitkin A.I. and others (1991) *Tekhnolohyya prokatnoho proyzvodstva: Spravochnik [Rolling production technology: Reference book]* M. : Metallurhiya. [in Russian].
- [12] Nalawade R.S., Marje V. R., Balachandran G., Balasubramanian V. (2016) Effect of pass schedule and groove design on the metal deformation of 38MnVS6 in the initial passes of hot rolling. *Sadhana (Indian Academy of Sciences)*. Vol. 41. No. 1. <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0457-4>
- [13] Deniyel K. (1979) *Primeneniye statistiki v promyshlennom eksperimente [The Application of Statistics in an Industrial Experiment]*. M.: Mir. 301 c. [in Russian].
- [14] Maksymenko O.P., Nikulin O.V., Samokhval V.M., Loboyko D.I. (2021) *Systemnyy pidkhid, metody doslidzhennya protsesiv prokatuvannya z analizom pozdovzhnoyi stalosti: Navchalnyy posibnyk [System approach, methods of research of rolling processes with the analysis of longitudinal stability: Handbook]*. Kam'yanske : DDTU. [in Ukrainian].