
Механічний аспект результуючої поздовжніх сил в осередку деформації при прокатці

Олег Максименко

Кафедра металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова/металургійний факультет, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна
ORCID ID 0000-0003-0846-9869

Олександр Нікулін

Кафедра металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова/металургійний факультет, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна
ORCID ID 0000-0002-3509-7266

Вадим Петрашов

Кафедра металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова /металургійний факультет, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

Руслан Павлюк

Кафедра металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова /металургійний факультет, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

Для цитування цієї статті:

Максименко Олег, Нікулін Олександр, Петрашов Вадим, Павлюк Руслан. Механічний аспект результуючої поздовжніх сил в осередку деформації при прокатці. International Science Journal of Engineering & Agriculture Vol. 2, No. 3, 2023, pp. 18-25. doi:10.46299/j.isjea.20230203.03.

Надійшла до редакції: 02 травня 2023 р.; **Схвалено:** 12 травня 2023 р.;

Опубліковано: 01 червня 2023 р.

Анотація: У даній роботі розвинуто інженерну методику розрахунку моментів сил, діючих в осередку деформації при прокатці на сучасних станах, з урахуванням рівноваги металу в валках та поздовжньої стійкості процесу. На цієї основі розкривається додатковий фізичний аспект результуючої поздовжніх сил в осередках деформації. Результати тестових розрахунків показують синхронність зміни моментів, розрахованих відповідно формули Фінка та за запропонованою формулою з використанням середньої результуючої поздовжніх сил. При цьому енерговитрати на деформацію металу визначаються аналітично з більшою відповідністю до відомих експериментальних даних. Встановлено системний вплив результатів розрахунку діючих моментів сил на можливість енергозбереження та підвищення стабільності процесу.

Ключові слова: середня результуюча поздовжніх сил, момент сили, поздовжня стійкість прокатки, методика розрахунку, параметри енерговитрат.

1. Вступ

Кількісний і якісний аналіз напружено-деформованого стану розкату в процесі обробки дає можливість обґрунтувати технологічні заходи щодо вдосконалення існуючого виробництва та освоєння нових видів продукції. Контроль і зниження енергоємності виробництва впливають на собівартість продукції, тобто мають велике практичне значення і тому пред'являють вимоги щодо підвищення точності розрахунків.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Оцінка величини роботи формозмінення металу в осередку деформації при прокатці [1-5], а також при осаджуванні часто проводиться за формулою Фінка [6.7]. Корисні енергетичні витрати спрямовані на подолання внутрішніх зусиль в пластично деформуємої штаби та залежать від фізико-механічних властивостей металопрокату, геометрії деформації, температури, кінематики процесу та інших факторів.

Беручи до уваги аналіз, проведений В.М. Видріним [8], формулу роботи формоутворення можна представити у вигляді

$$A_{\phi} = 2k_{cp} \cdot h_1 \cdot b_1 \cdot (1+S) \cdot R \cdot \psi \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (1)$$

де $2k_{cp}$ - середній опір металу пластичної деформації;

h_0 і h_1 - початкова і кінцева товщина штаби;

S - випередження металу, b_1 - кінцева ширина штаби;

R і ψ - радіус і кут повороту валків.

Як відомо [6.7], формула Фінка в порівнянні з даними експерименту по визначенню енергоспоживання дає помітно занижені результати. Слід зазначити, що дослідження, пов'язані зі створенням нових технологій, вимагають більш точного обліку енерговитрат в зоні контакту металу з валками. Тому подальше вивчення питання з метою уточнення оцінок представляється актуальним.

3. Мета та задачі дослідження

Важливим енергетичним фактором прокатування є момент прокатки [6]. Враховуючи відому геометрію поздовжнього перерізу осередку деформації, при його визначенні потрібно вірно обрати поздовжню силу [7]. Метою роботи є вдосконалення інженерної методики розрахунку моменту сил, потрібного для пластичної деформації металу розкату, з використанням результуючої поздовжніх сил в осередку деформації.

4. Методи досліджень

Для оцінювання поздовжньої стійкості процесу прокатки в [9.10] розроблено метод визначення середньої результуючої горизонтальних сил пластично деформованого металу $Q_{серпр}$ [11-15]. Значення цієї сили в аналізованому процесі прокатки можна визначити за допомогою величини поздовжньої сили в поточному перерізі

$$Q_{xnp} = \sigma_x h_x b_{cp} = (p_x - 2k_{cp}) \cdot (h_1 + R\phi^2) \cdot b_{cp}, \quad (2)$$

де σ_x - поздовжнє нормальне напруження в пластично деформуємому металі;

h_x – поточна товщина штаби в осередку деформації;

b_{cp} – середня ширина штаби в осередку деформації;

R – радіус валку;

ϕ – кут поперечного перерізу,

з подальшим її усередненням по дузі захоплення

$$Q_{серпр} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_{хпр} d\phi, \quad (3)$$

де α_y - кут захоплення в сталому стані.

Попередньо розв’язується рівняння Т. Кармана з визначенням діаграми нормальних контактних напружень p_x . Для якісного аналізу поздовжньої стійкості використовуються середня результуюча горизонтальних сил в безрозмірному вигляді

$$Q_{серпр}^* = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} \frac{Q_{хпр}}{2k_{cp} R b_{cp}} d\phi. \quad (4)$$

Згідно з матеріалами робіт [14, 15], для забезпечення стабільного процесу прокатування контактні сили повинні подолати дію середньої результуючої сили $Q_{серпр}$. Схема дії сил в осередку деформації з урахуванням середньої результуючої сили показана на рис. 1.

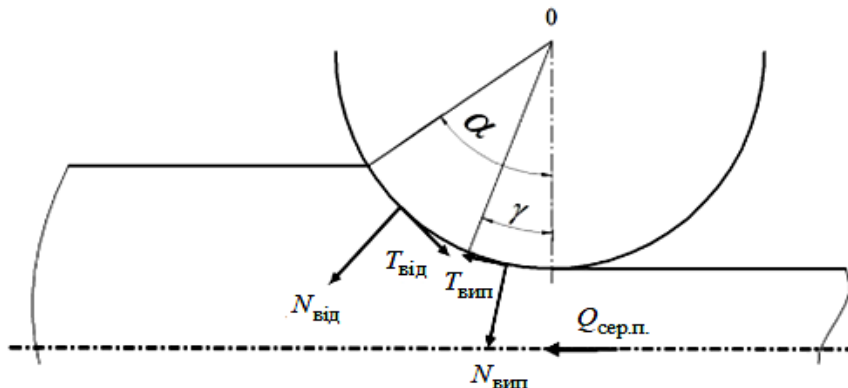


Рис. 1. Діаграма сил з урахуванням середньої результуючої сили пластично деформуємого металу.

У першому наближенні момент, створюваний цією силою, визначається за формулою:

$$M_Q = Q_{серпр} \cdot \left(R + \frac{h_1}{2} \right). \quad (5)$$

Порівняємо його з моментом формо змінення

$$M_\phi = \frac{A_\phi}{\psi} = 2k_{cp} \cdot h_1 \cdot b_1 \cdot (1+S) \cdot R \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (6)$$

попередньо довівши їх до безрозмірного вигляду

$$M_Q^* = \frac{M_Q}{2k_{cp} \cdot R^2 \cdot b_{cp}} = Q_{серпр}^* \cdot \left(1 + \frac{h_1}{2R} \right), \quad (7)$$

$$M_{\phi}^* = \frac{M_{\phi}}{2k_{cp} \cdot R^2 \cdot b_{cp}} \approx \frac{h_1}{R} \cdot (1+S) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (8)$$

Беручи до уваги контактні взаємодії, викликані тертям ковзаючого металу вздовж валків, верхньою оцінкою для M_Q і M_{ϕ} може служити момент прокатки, який в прийнятому наближенні (див. рис. 1)

$$M_{np} = 2(T_{omc} - T_{on}) \cdot R, \quad (9)$$

де T_{omc} і T_{on} – величини результуючих сил тертя в зоні відставання і випередження, відповідно.

У безрозмірному вигляді момент прокатки

$$M_{np}^* = 2 \left(\frac{T_{omc} - T_{on}}{2k_{cp} \cdot R \cdot b_{cp}} \right) \quad (10)$$

Проаналізуємо зміни значень моментів M_{np}^* , M_{ϕ}^* і M_Q^* при конкретних умовах простого процесу прокатки і різних умовах тертя в осередку деформації. У табл. 1 наведені режими обтиснень, умови тертя при контакті валків з розкатом при прокатці в валках діаметром 200, 300 і 400 мм з різною товщиною деформованого металу. Розрахункові значення кута нейтрального перерізу γ , середньої результуючої сили $Q_{серnp}^*$, сил тертя в зонах відставання T_{omc}^* і випередження T_{on}^* , моментів M_{np}^* , M_{ϕ}^* і M_Q^* також наведені в цій таблиці.

Як впливає з табл. 1, у всіх випадках прокатки $Q_{серnp}^*$ є від'ємною величиною, тобто сила спрямована протилежно руху смуги, що, згідно [14, 15], вказує на стійкий, без часткового ковзання, процес деформування металу.

Як приклад, на рис. 2 наведені в безрозмірному вигляді діаграми розподілу нормальних контактних напружень $\frac{p_x}{2k_{cp}}$, питомих сил тертя $\frac{t_x}{2k_{cp}}$, внутрішніх поздовжніх контактних напружень $\frac{\sigma_x}{2k_{cp}}$ і поточних поздовжніх сил Q_{xnp}^* при прокатці першого зразка з кулонівської моделлю тертя. Крім того, в таблиці, розташованій поруч з рис. 2, наведені значення $Q_{серnp}^*$, $\frac{p_x}{2k_{cp}}$, M_{np}^* , T_{on}^* , T_{omc}^* і кута γ .

Таблиця 1. Розрахункові значення моментів і середньої результуючої поздовжніх сил

№	Товщина смуги, мм		α , рад	R, мм	f	γ , рад	$Q_{серnp}^*$ · 10 ²	T_{omc}^* · 10 ²	T_{on}^* · 10 ²	M_{np}^* · 10 ²	M_Q^* · 10 ²	M_{ϕ}^* · 10 ²	$\frac{M_Q^*}{M_{\phi}^*}$
	h_0	h_1											
1	2,0	1,75	0,05	100	0,12	0,0197	-0,27	0,415	0,274	0,282	0,27	0,237	1,14
					0,3	0,0222	-0,69	0,834	0,666	0,736	0,69	0,24	1,16
2	4,0	2,0	0,141	100	0,2	0,044	-1,19	2,826	1,433	2,78	1,19	1,1	1,08
					0,35	0,0472	-1,832	3,981	1,653	3,254	1,832	1,54	1,19
3	5,0	3,0	0,116	150	0,22	0,041	-1,3	2,488	1,501	1,97	1,3	1,11	1,18
					0,3	0,0411	-1,336	2,231	1,234	1,995	1,336	1,108	1,18
4	6,0	4,0	0,116	150	0,23	0,0424	-1,3	2,375	1,453	1,844	1,3	1,15	1,13
					0,3	0,0422	-1,36	2,2	1,265	1,87	1,36	1,15	1,18
5	2,0	1,5	0,05	200	0,12	0,021	-0,3	0,496	0,329	0,334	0,3	0,23	1,3
					0,15	0,0195	-0,31	0,458	0,292	0,333	0,31	0,226	1,37
6	3,0	2,0	0,070	200	0,25	0,022	-0,46	1,237	1,018	0,488	0,46	0,43	1,07
					0,25	0,0273	-0,736	1,071	0,682	0,778	0,736	0,435	1,69

$b, \text{мм}$	1
R	100
h_1	1,75
f	0,1
α	0,05
$Q_0/2k$	0
$Q_1/2k$	0
$R_{\text{ном}}$	100

$Q^*_{\text{срп}}$	-0,0021
$p_{\text{ср}}$	1,11471
$M^*_{\text{нр}}$	-0,014
$T^*_{\text{он}}$	0,0021
$T^*_{\text{ом}}$	0,00347
γ	0,0187

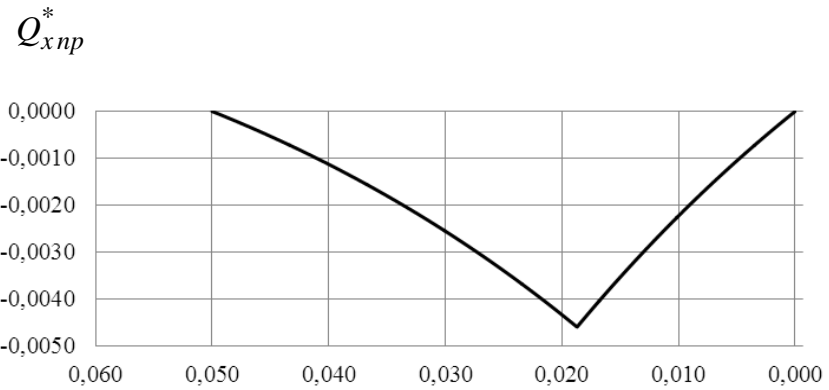
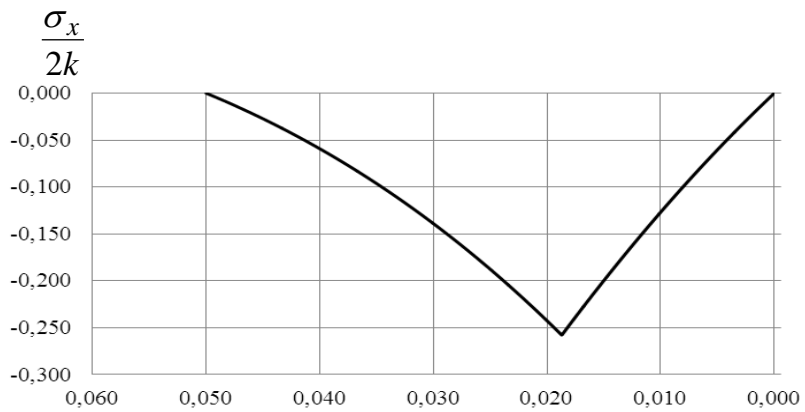
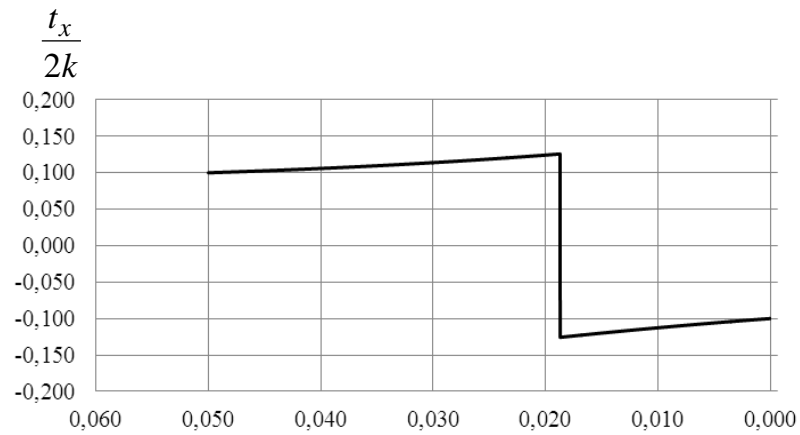
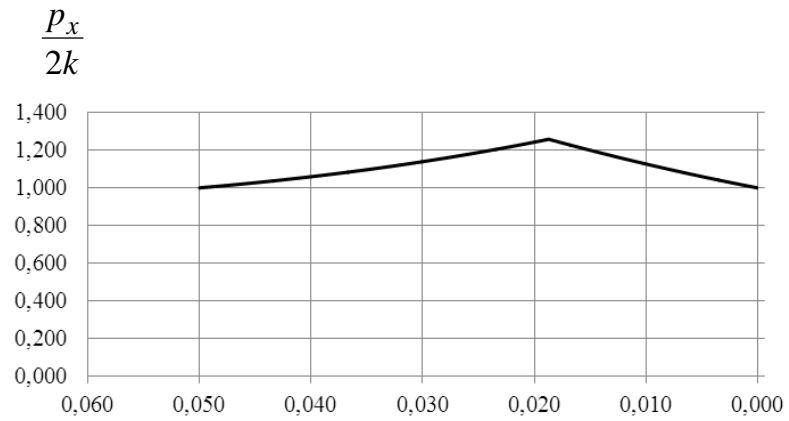


Рис. 2 Епюри контактних та внутрішніх напружень, а також поздовжньої сили при прокатуванні металу.

Примітка: верхній ряд для кожного зразка, що підлягає прокатуванню, відноситься до випадку, коли моделлю тертя в осередку деформації була залежність $t_x = f p_x$, нижчою - закон пластичне тертя $t_x = f_3 2k_{cp}$.

Безрозмірні сили тертя в зонах випередження і відставання

$$T_{on}^* = \frac{T_{on}}{2k_{cp}Rb} ; T_{omc}^* = \frac{T_{omc}}{2k_{cp}Rb} . \quad (11)$$

Як випливає з аналізу ділянок (див. рис. 2), на всіх ділянках поздовжні нормальні напруги стискаючі, поточні поздовжні сили по всій довжині осередку деформації спрямовані протилежно руху смуги і $Q_{серпр}^* = -0,0021$. З іншими параметрами деформації, які наведені в табл. 1, також були виконані розрахунки і побудовані графіки для величин, які наведені на рис. 2. Характер їх зміни аналогічний проаналізованому вище.

Як випливає з даних табл. 1, у всіх випадках прокатки крутний момент на бочках валків помітно вище значень M_{ϕ}^* і M_Q^* , що відповідає закону енергії в простому процесі прокатки

$$M_{np} = M_{\phi} + 2M_{npck} , \quad (12)$$

де $2M_{npck}$ - момент сил тертя ковзання у осередку деформації.

Звернемо увагу на те, що в змінах моментів M_{ϕ}^* і M_Q^* присутня певна послідовність. Залежно від зміни параметрів прокатки вони або збільшуються, або зменшуються синхронно.

Причому істотно відрізняються їх значення лише в деяких випадках (див. результати розрахунків під номерами 1 і 6 в моделі пластичного тертя). Такі результати говорять про те, що природа дії моментів M_{ϕ}^* і M_Q^* однакова. Тоді середня результуюча $Q_{серпр}^*$ є внутрішня сила, яку необхідно подолати активними силами, щоб забезпечити деформування металу в поздовжньому напрямку. Саме в цьому і полягає фізична сутність сили $Q_{серпр}^*$.

Результати розрахунків також показали, що момент формозмінення смуги залежить від умов тертя при контакті. У моделі тертя ковзання він дещо менше в порівнянні із законом пластичного тертя. У всіх розглянутих випадках прокатки M_Q^* трохи вище M_{ϕ}^* , тому момент формування металу, розрахований за формулою (4), повинен давати результати, наближені до спостережуваних даних (експерименту).

6. Висновки

Запропоновано новий метод визначення моменту формозміни металу, заснований на розрахунку середніх результуючих поздовжніх сил в осередку деформації. Результати розрахунку моменту формозмінення за запропонованою методикою дають значення на 15 - 30% і більше вище значень, розрахованих за формулою Фінка. Якісно визначення моменту формування розкриває новий механічний аспект середніх результуючих поздовжніх сил в осередку деформації, кількісно дає більш точну оцінку енерговитрат на пластичну деформацію смуги, що прокатується.

Список літератури:

- 1) Зибель Э. (1934) Обработка металлов в пластическом состоянии. Москва-Ленинград: ОНТИ.
- 2) Виноградов А.П. (1935) Расход энергии при прокатке и мощность двигателей при станах. Металлург. (2), 34 - 38.

- 3) Павлов И.М. (1938) Теория прокатки и основы пластической деформации металлов. Москва: ГОНТИ
- 4) Мутьев М.С. (1939) О равновесии сил и крутящем моменте при прокатке. *Металлург.* (4-5), 87 – 91.
- 5) Павлов И.М. (1950) Теория прокатки. Москва: Metallurgizdat.
- 6) Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. (1982) Теория прокатки. Справочник / Москва: Metallurgiya.
- 7) Хензель А., Шпиттель Т. (1982) Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. Справ. изд. Пер. с нем. Москва: Metallurgiya.
- 8) Выдрин В.Н. (1960) Динамика прокатных станов. - Свердловск: Metallurgizdat.
- 9) Грудев А.П. (1973) Внешнее трение при прокатке. Москва: Metallurgiya.
- 10) Клименко П.Л., Данченко В.Н. (2007) Контактные напряжения при прокатке: монография. Днепропетровск: Пороги.
- 11) Максименко О.П., Никулин А.А., Романюк Р.Я. (2008) Теоретический анализ захватывающей способности валков в установившемся режиме прокатки. *Известия вузов. Черная металлургия.* (20), 32 – 34.
- 12) Максименко О.П., Романюк Р.Я. (2009) Методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки. *Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".* (33), 84 – 90.
- 13) Максименко О.П., Лобойко Д.И., Романюк Р.Я. (2013) Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* (6), 47 – 49.
- 14) Максименко О. П., Лобойко Д.И., Измайлова М. К. (2016). Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий. Днепропетровск: ДДТУ.
- 15) Максименко О. П., Нікулін О.В., Самохвал В.М., Лобойко Д.І. (2021) Системний підхід, методи досліджень процесів прокатування з аналізом поздовжньої сталості: Навчальний посібник. Кам'янське: ДДТУ.

Mechanical aspect of the resulting longitudinal forces in the deformation zone during rolling

Oleg Maksimenko

Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing named after prof. V.I. Loginov/
Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID ID 0000-0003-0846-9869

Alexander Nikulin

Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing named after prof. V.I. Loginov/
Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID ID 0000-0002-3509-7266

Vadim Petrashov

Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing named after prof. V.I. Loginov/
Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

Ruslan Pavlyuk

Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing named after prof. V.I. Loginov/
Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

Abstract: In this paper, an engineering method for calculating the moments of forces acting in the deformation zone during rolling at modern mills, taking into account the balance of the forces in metal at

the rolls and the longitudinal stability of the process has been developed. On this basis, an additional physical aspect the average of resulting longitudinal forces in the zone of deformation is revealed. The results of test calculations show the synchronization of the change the moments calculated according to the Fink formula and according to the proposed formula using the average resulting longitudinal forces. In this case, the energy consumption for metal deformation is determined analytically with greater compliance with the known experimental data. The systemic influence of the results at calculation of the acting moments by forces on the possibility of energy saving and increasing the stability of the process has been established.

Keywords: average resultant longitudinal forces, torque of force, longitudinal rolling stability, calculation methodology, parameters of energy consumption.
