
Роль внутрішньої сили пластично деформованого металу в захоплюючій здатності валків під час прокатки

Олег Максименко

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

ORCID ID 0000-0003-0846-9869

Анна Приймак

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

ORCID ID 0009-0009-9070-643X

Володимир Ляшенко

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

Руслан Павлюк

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

Для цитування цієї статті:

Максименко Олег, Приймак Анна, Ляшенко Володимир, Павлюк Руслан. Роль внутрішньої сили пластично деформованого металу в захоплюючій здатності валків під час прокатки.

International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No. 2, 2024, pp. 78-84. doi: 10.46299/j.isjea.20240302.06

Надійшла до редакції: 03 лютого 2024 р.; **Схвалено:** 05 березня 2024 р.;

Опубліковано: 01 квітня 2024 р.

Анотація: Теорія простого процесу прокатки викладена досить докладно в повному обсязі [1-4]. Разом з тим, деякі експериментальні дані та теоретичні положення вона поки що пояснити не може. Так, можливість стійкого процесу за однозонного ковзання металу в осередку деформації або навіть за "від'ємного" випередження [5-7]. Не завжди певні положення теорії мають однозонне і послідовне трактування.

Ключові слова: теорія прокатки, однозонне ковзання, режим тертя, коефіцієнт тертя, випередження, внутрішні сили, граничні умови, сталий режим.

1. Вступ

Так, під час виведення диференціального рівняння Т. Кармана [8, 9] враховуються внутрішні поздовжні сили, а під час визначення кута нейтрального перерізу γ з подальшим трактуванням граничних умов $\gamma^{2p} = 0$ і $\alpha_y^{\max} = 2f_y$ [10-11] розглядають рівновагу тільки контактних сил, як у твердому тілі. При формозміні металу завжди діють внутрішні сили, що забезпечують роботу пластичної деформації та врівноважують зовнішній вплив [12]. Згідно рис. 1 зв'язок між контактними та внутрішніми силами в поточному об'ємі металу визначається:

$$2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} [t_x \cos \varphi - p_x \sin \varphi] R b d\varphi = Q_{хпр} \quad (1)$$

$$Q_{xnp} = \sigma_x (h_1 + R\varphi^2) b \quad , \quad (2)$$

де $Q_{x \text{ пр.}}$ - поточна поздовжня внутрішня сила

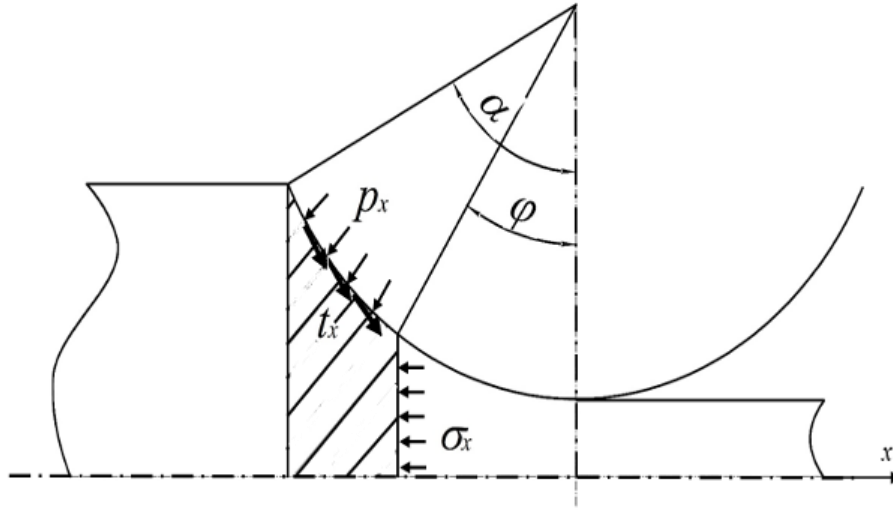


Рис. 1 Рівновага поточного об'єму металу в осередку деформації.

Знайдемо середнє значення цих сил для всього осередку деформації:

$$\frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} \{ 2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} [t_x \cos \varphi - p_x \sin \varphi] R b d\varphi \} d\varphi = Q_{сепрп} \quad (3)$$

$$Q_{сепрп} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_{xnp} d\varphi \quad , \quad (4)$$

де p_x і t_x – нормальний тиск та питома сила тертя;

α_y і φ – кут захоплення при сталому процесі та його поточне значення;

R і b – радіус валків та ширина прокатуваної смуги.

Рівняння (2) відображає баланс між контактними та внутрішніми силами при пластичному деформуванні.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Проаналізуємо зміну внутрішньої сили $Q_{x \text{ пр.}}$ за довжиною осередку деформації в конкретних умовах прокатування. Для цього при рішенні рівняння Т. Кармана знайдемо як розподіляється тиск. Потім з рівняння пластичності у кожному перерізі осередку деформації розрахуємо значення поздовжньої нормальної напруги σ_x і далі за формулою (2) визначимо значення сили $Q_{x \text{ пр.}}$. З метою спрощення всі розрахунки виконували у безрозмірному вигляді:

$$Q_{xnp}^* = \frac{Q_{xnp}}{2K_{сеп} R b} \quad ; \quad Q_{сепрп}^* = \frac{Q_{сепрп}}{2K_{сеп} R b} \quad ,$$

де $2K_{сеп}$ – середній опір металу пластичної деформації.

3. Мета та задачі дослідження

Нехай прокатка ведеться в валках радіусом $R=100$ мм з кутом захоплення $\alpha_y = 0,06$ рад, початкова товщина смуги $h_0=1$ мм, а коефіцієнт тертя f_y приймає значення 0,06; 0,042; 0,03. Результати розрахунку розподілу тиску $\frac{P_x}{2K_{ср}}$ та поточної сили $Q_{хпр}^*$ приведені на рис.2.

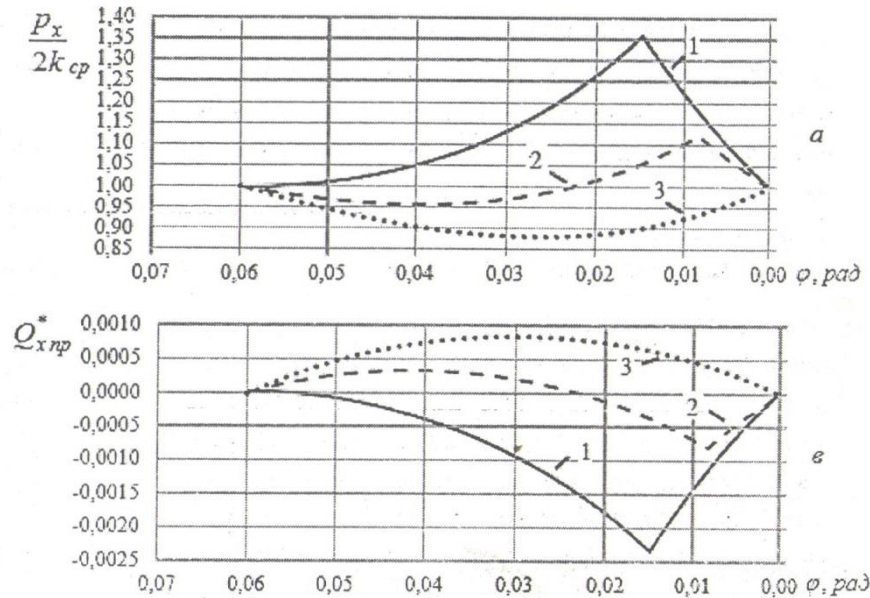


Рис. 2 Розподіл нормального тиску та поздовжніх внутрішніх сил при різному значенню коефіцієнта тертя.

Як видно, характер зміни внутрішньої поздовжньої сили $Q_{хпр}^*$ суттєво залежить від відношення $\frac{\alpha_y}{f_y}$. При відношенні $\frac{\alpha_y}{f_y} = 1$ (крива 1) в усіх перетинах осередку деформації $Q_{хпр}^*$ є стискаючою та направлена протилежно руху смуги. В умовах, коли $\frac{\alpha_y}{f_y} = 2$ (крива 3), сила

$Q_{хпр}^*$ по всій довжині осередку деформації є такою, що розтягує та направлена в сторону прокатки. В цьому випадку вона виконує роль активної рушійної сили. Враховуючи, що внутрішня поздовжня сила металу, що пластично деформується завжди є силою супротиву, реакцією на дію контактних сил і тому активну роль виконувати не може. З останнього випливає, що за теоретичної граничної умови $\alpha_y^{\max} = 2f_y$ процес прокатки здійснюватись не може.

Він можливий і при менших значеннях кута захоплення аж до умови, коли відношення $\frac{\alpha_y}{f_y}$ не буде дорівнювати 1,446. В цьому випадку площини додатних і від'ємних значень сили $Q_{хпр}^*$ дорівнюватимуть між собою (див. рис. 2, крива 2), а середня результуюча $Q_{хпр}^*$ приймає нульове значення.

4. Методи досліджень

При збільшенні коефіцієнта тертя внутрішня сила $Q_{серпр}$ змінює свій знак, а процес прокатки стає стійким та стабільним. Такого висновку можна дійти, аналізуючи рівняння балансу (3). Припустимо, що деякі параметри процесу прокатки змінилися і $Q_{серпр}^*$ перетворилися на активну силу. При цьому реакція лівої частини рівняння (3) вимушено буде наступною: зміниться співвідношення між силами, що втягують метал у валки, і силами, що виштовхують, на користь останніх, що призведе до зупинки процесу. Таким чином, стійкою прокатка може бути тільки в разі, коли середня результуюча внутрішніх поздовжніх сил спрямована протилежно щодо руху смуги. Умовно припишемо силі $Q_{серпр}^*$ знак «мінус». Тоді, виходячи з проведеного аналізу, можна сформулювати нову граничну умову захоплення в сталому режимі. Якщо:

$$Q_{серпр} < 0, \quad (4)$$

то процес прокатки буде здійснюватися стабільно без будь-яких відключень при дотриманні рівноваги сил в осередку деформації. У граничному випадку прокатки:

$$Q_{серпр} = 0 \quad (5)$$

Зауважимо, що нова гранична умова (5) є жорсткішою порівняно з граничною умовою $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y} = 2$. Для вищезгаданого прикладу це відношення становить 1,446. Аналіз кривої 2 рис.2 також показує, що у граничному випадку прокатки має місце зона випередження з кутом нейтрального перетину $\gamma \approx 0.01 \text{ рад}$. Результати експериментального дослідження, описаних у роботах [13.14], також показують, що порушення рівноваги металу в осередку деформації можливе за наявності зони випередження.

5. Результати досліджень

Проведемо спільний аналіз дослідних даних роботи [13] та розрахунків середньої результуючої сили $Q_{серпр}^*$, які наведено на рис. 3. Зауважимо, що у своїх дослідях О. П. Грудєв прокочував свинцеві зразки початковою товщиною $h_0=11.4 \div 12.7$ мм. Прокатку проводив на сталевих сухих валках діаметром 194,6 мм за коефіцієнта тертя $f_y=0,25$. Випередження вимірював керновим методом. У своїх дослідженнях він звернув увагу на те, що за кута захоплення, що дорівнює 0,34 рад, деформація зразків відбувалася зі значним випередженням, що дорівнює 10%. Здавалося б, в осередку деформації є достатній запас сил тертя. Однак уже під час $\alpha = 0,35 \text{ рад}$ виникало пробуксовування і процес прокатки обривався. Автор стверджує, що рівновага в осередку деформації порушувалася за наявності зони випередження, що підтверджує результати теоретичного дослідження. Як впливає з графіка рис. 3, у момент пробуксовування сила $Q_{серпр}^*$ була близькою до нульового значення, тобто вираз (5) дійсно відображає граничні умови під час усталеного процесу прокатки.

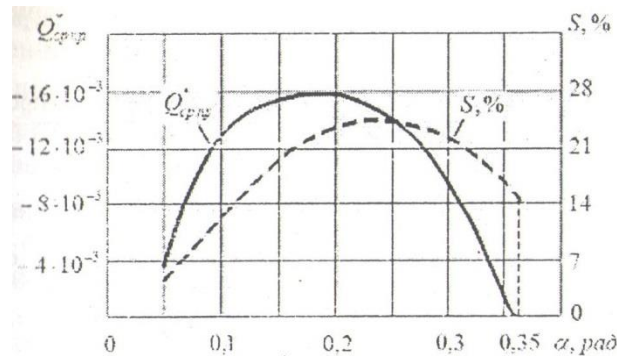


Рис. 3 Вплив кута захоплення на результуючу поздовжніх сил і випередження при прокатці.

6. Висновки

Уточнено методику визначення граничної захоплюючої здатності валків, що враховує поздовжні внутрішні сили металу, який пластично деформується. Процес прокатки відбувається стійко і стабільно, якщо середня результуюча сила є стискаючою і спрямована протилежно щодо руху смуги. Рівняння $Q_{српр}^* = 0$ відображає граничні умови прокатки в сталому режимі і є більш жорстким щодо відомого.

Список літератури:

- 1) Полухин В.П. и др. (1980) *Алгоритмы расчетов основных параметров прокатных станов*. москва: Металлургия.
- 2) Зильберг Ю.В. (2009) Некоторые вопросы теории прокатки и осадки металлов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. (1). 49-73.
- 3) Коновалов Ю. В. (2008) *Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах*. М.: Теплотехник.
- 4) 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.
- 5) Долженков Ф.Е. Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки). *Известия вузов. Черная металлургия*. (5). 41-44.
- 6) Грудев А.П. (1973) *Внешнее трение при прокатке*. москва: Металлургия.
- 7) Зильберг Ю.В. (2000) Закон и модели пластического трения. *Известия вузов. Черная металлургия*. (11). 22-24.
- 8) Грудев А.П. (2001) *Теория прокатки*. (2-е перераб. и доп. изд.). москва: СП Интермет Инжиниринг.
- 9) Северденко В.П. (1969) *Основы теории прокатки*. минск: Наука и техника.
- 10) Целиков А.И., Гришков А.И. (1970) *Теория прокатки*. москва: Металлургия.
- 11) Васильов Я. Д., Мінаєв О.А. (2009) *Теорія поздовжньої прокатки*. Донецьк : УНІТЕХ.
- 12) Максименко О. П., Лобойко Д.И., Измайлова М. К. (2016). *Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий*. Днепропетровск: ДДТУ.
- 13) Грудев А.П. (1998) *Захватывающая способность прокатных валков*. москва: СП Интермет Инжиниринг.
- 14) Прокофьев В.И. (1962) Максимальные углы захвата при установившемся процессе прокатки. *Обработка металлов давлением: Научные труды, ДМетЧ. М: Металлургиздат*. (XLVIII). 31-56.
- 15) Максименко О. П., Лейко О.Є. (2001) *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. Зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА.

16) Данченко В.М., Гринкевич В.О., Головка О.М. (2008) *Теорія процесів обробки металів тиском: Підручник*. – Дніпропетровськ: Пороги.

17) Смирнов В.С. (1967) *Теория прокатки*. москва: Металлургия.

The role of the internal force of plastically deformed metal in the gripping capacity of rolls during rolling

Oleg Maksimenko

Department of metallurgy named after prof. V.I. Loginov/ Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

ORCID ID 0000-0003-0846-9869

Anna Pryimak

Department of metallurgy named after prof. V.I. Loginov/ Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

ORCID ID 0009-0009-9070-643X

Volodymyr Liashenko

Department of metallurgy named after prof. V.I. Loginov/ Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

Ruslan Pavliuk

Department of metallurgy named after prof. V.I. Loginov/ Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

Abstract: The theory of the simple rolling process is described in detail in full [1-4]. At the same time, it still cannot explain some experimental data and theoretical positions. For example, the possibility of a stable process with single-zone metal sliding in the deformation zone or even with a "negative" advance [5-7]. Certain provisions of the theory do not always have a single-zone and consistent interpretation.

Keywords: theory of rolling, single-zone sliding, friction mode, friction coefficient, advance, internal forces, boundary conditions, steady-state mode.
