

DOI 10.36074/logos-13.03.2026.023

ПЕРЕГЛЯД КРИТЕРІЇВ СТАБІЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ З УРАХУВАННЯМ ВНУТРІШНІХ ПОЗДОВЖНІХ СИЛ

Приймак Анна Борисівна¹, Зінченко Максим Сергійович²
Науковий керівник: Максименко Олег Павлович³

1. здобувачка вищої освіти механічного факультету
Дніпровський державний технічний університет, УКРАЇНА
ORCID ID: 0009-0009-9070-643X

2. здобувач вищої освіти механічного факультету
Дніпровський державний технічний університет, УКРАЇНА

3. доктор техн. наук, професор,
професор кафедри ОМТ
Дніпровський державний технічний університет, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0003-0846-9869

1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Процеси прокатування на безперервних станах значно складніші за послідовне прокатування в окремих клітках через специфічні кінематичні умови та постійну наявність міжклітьових натяжінь. Натяжіння безпосередньо впливає на умови захоплення штаби та стабільність процесу, що може призводити до пробуксовок металу.

Традиційна теорія стверджує, що граничний стан прокатки настає при нульовому куті нейтрального перерізу ($\gamma=0$), тобто при однозонному ковзанні. Однак експериментальні дані (зокрема А. П. Грудєва) свідчать, що втрата стійкості з подальшим пробуксовуванням можлива навіть за наявності зони випередження. Це вказує на необхідність перегляду критеріїв оцінки граничних умов, особливо для високошвидкісних дротяних станів.

2. Теоретична модель поздовжньої рівноваги

Для більш точного прогнозування стійкості запропоновано метод, що базується на розрахунку середньоінтегрального значення внутрішніх поздовжніх сил пластично деформованого металу ($Q_{\text{сер.пр}}$).

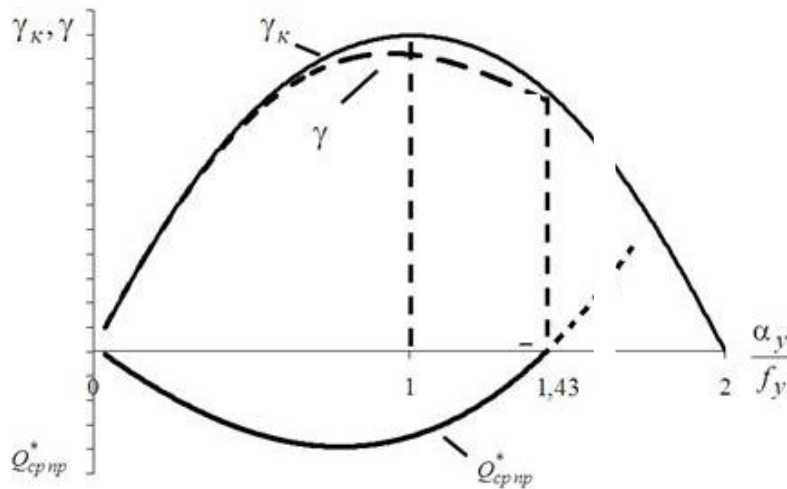


Рис. 1 Співвідношення між кінематичними параметрами та результуючою поздовжніми силами в осередку деформації

Фізично сила $Q_{\text{ср.нр}}$ є реакцією металу на зовнішню дію валків. Умова поздовжньої рівноваги в осередді деформації описується інтегральним рівнянням, що враховує контактні напруження та поточну товщину смуги:

- Якщо $Q_{\text{ср.нр}} < 0$ (сила спрямована проти руху), процес є стійким.
- Якщо $Q_{\text{ср.нр}} = 0$, процес знаходиться у граничному стані.
- При зміні знаку сили на «+» (активна сила за рухом) стабільна прокатка стає неможливою, і виникає прослизання.

Математичний аналіз показує, що критерій $Q_{\text{ср.нр}} = 0$ є «жорсткішим» за умову $\gamma = 0$, що краще відповідає реальним умовам безперервної прокатки з натягом.

Ключові аспекти дослідження:

- **Перегляд класичної парадигми:** Традиційно вважається, що пробуксовування починається лише тоді, коли зона випередження зникає. Проте, спираючись на дослідження А. П. Грудєва, встановлено, що втрата рівноваги смуги можлива навіть за наявності зони випередження.

- **Роль внутрішніх сил:** на рівновагу впливає не лише зовнішнє тертя, а й характер розподілу внутрішніх поздовжніх сил. Результуюча цих сил у сталому процесі завжди є вектором опору, спрямованим проти руху металу.

- **Динаміка напружень залежно від кута захоплення:**

- При малих кутах захоплення в осередку деформації переважають стискаючі напруження, що гарантує високу стабільність.

- Зі збільшенням кута захоплення з'являються зони розтягувальних напружень. Коли інтегральна сума цих сил (результуюча) наближається до нуля, процес переходить у граничний стан.

섹션 13.

GENERAL MECHANICS AND MECHANICAL ENGINEERING

○ Подальше зростання кута робить результуючу силу «активною» (спрямованою за рухом), що фізично суперечить умовам сталого процесу та призводить до зриву прокатки.

3. Об'єкт та методика дослідження

Дослідження проводилось для умов стану 400/200 при виробництві катанки діаметром 5,5 мм. Розрахунки виконувалися для 10 проходів дротяного блоку.

– Вихідні дані: геометричні параметри калібрів (h_0, h_1, b_0, b_1), швидкість прокатки (v_1), радіус валків (R_k).

– Коефіцієнт тертя: прийнятий рівним 0,10, що є типовим для таких умов.

– Розрахунковий параметр: безрозмірне зусилля $Q_{\text{сер.пр}}^* = Q_{\text{сер.пр}} / (2k_{\text{сер}} R_k b)$, де $2k_{\text{сер}}$ — середній опір деформації.

4. Аналіз результатів та практичні рекомендації

Результати моделювання (Таблиця 1) показують, що при стандартних режимах у всіх клітках дротяного блоку зберігається від'ємне значення результуючої сили ($Q_{\text{сер.пр}} < 0$), що гарантує стабільність.

Вплив натягіння на стійкість:

– Посилення міжклітьового натягіння призводить до зміщення $Q_{\text{сер.пр}}$ у бік позитивних значень, що погіршує поздовжню стійкість.

– Зношування валків провокує зростання напружень у міжклітьових проміжках, що підвищує ризик прослизання.

– Для запобігання зупинкам процесу та пробуксовкам встановлено критичну межу: питома напруга натягіння (q) не повинна перевищувати 4–6% (0,04...0,06) від середнього опору пластичній деформації в конкретному проході.

Таблиця 1

Параметри прокатування катанки 5,5 мм

№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	$Q_{\text{сер.пр}}^*$	Стан стійкості
1	17,3	11,0	6,3	-0,016	Стійко
2	21,05	13,78	7,27	-0,011	Стійко
3	13,78	9,1	4,68	-0,014	Стійко
4	16,6	10,96	5,64	-0,013	Стійко
5	10,96	6,52	4,44	-0,015	Стійко
6	14,32	8,62	5,7	-0,013	Стійко
7	8,62	5,5	3,12	-0,014	Стійко
8	10,77	6,85	3,92	-0,013	Стійко
9	6,85	4,36	2,49	-0,014	Стійко
10	8,49	5,5	3,0	-0,016	Стійко

Висновки

Доведено, що для оцінки стійкості безперервної прокатки геометричного критерію $\gamma=0$ недостатньо; необхідно враховувати баланс внутрішніх поздовжніх сил.

Запропонований критерій $Q_{\text{сер.пр}}=0$ дозволяє точніше визначити межу, за якою починається пробуксовка металу в валках.

Практичні розрахунки для стану 400/200 підтвердили стабільність заводських режимів прокатки катанки 5,5 мм за умови дотримання натяжінь у межах 0,04...0,06 від опору деформації.

Рекомендовано підтримувати рівень міжклітьових натяжінь не вище 6% від опору деформації для запобігання динамічним ударам та пробуксовкам.

Вплив тертя: при використанні ефективних мастил (коли діє закон Ньютона, а не Амонтона—Кулона) фізика процесу змінюється, дозволяючи стабільну прокатку навіть за негативного випередження.

Практичне значення: моделювання балансу внутрішніх сил дозволяє точніше прогнозувати граничні умови для складних режимів прокатки, де класичні розрахунки дають похибку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Жучков С. М. Динаміка безперервних сортових станів: монографія. Дніпро: Пороги, 2003. – 364 с.
- [2] Ніколаєв В. О., Мазур О.О. Теорія процесів обробки металів тиском: підручник. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. – 388 с.
- [3] Данченко В. М., Сергєєв В.В., Смоляк В.К. Технологія сортопрокатного виробництва: підручник. Дніпро: Пороги, 2011. – 564 с.
- [4] Путнокі О. Ю. Проектування і експлуатація сортових та дротяних станів. Київ: Техніка, 2008. – 256 с.
- [5] Огінський І. К. Теоретичні основи поздовжньої стійкості процесу прокатки з натягом. Теорія і практика металургії. 2015. № 1-2. – С. 45–51.
- [6] Schinzinger R. Energy Efficiency in Wire Rod Rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210, Is. 12. P. 1540–1548.
- [7] Lenard J. G. Primer on Flat Rolling. 2nd Edition. Oxford: Elsevier, 2014. 312 p.
- [8] Tieu K., P. B. Kosasih P.B. Modeling of Friction in Metal Rolling. Tribology International. 2007. Vol. 40. P. 230–235.

