
Методика вибору натягу смуги під час безперервної прокатки з урахуванням стійкості процесу

Олег Павлович Максименко

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

ORCID ID 0000-0003-0846-9869

Олександр Вікторович Нікулін

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

ORCID: 0000-0002-3509-7266

Анна Борисівна Приймак

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

ORCID ID 0009-0009-9070-643X

Руслан Дмитрович Павлюк

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

Для цитування цієї статті:

Максименко Олег Павлович, Нікулін Олександр Вікторович, Приймак Анна Борисівна, Павлюк Руслан Дмитрович. Методика вибору натягу смуги під час безперервної прокатки з урахуванням стійкості процесу. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No.6, 2024, pp. 88-94. doi: 10.46299/j.isjea.20240306.08.

Надійшла до редакції: 09 листопада 2024 р.; **Схвалено:** 30 листопада 2024 р.;

Опубліковано: 01 грудня 2024 р.

Анотація: У статті розглянуто розробку методики визначення раціонального режиму натягу при безперервному плющенні металу для забезпечення поздовжньої стійкості смуги в осередку деформації. Метою дослідження є створення енергозберігаючої технології прокатки, яка враховує стабільність процесу при різних режимах натягу. Оцінка стійкості металу проводиться через середнє значення результуючих поздовжніх сил, що діють на пластично деформовану смугу. Аналіз результатів показав, що з посиленням натягу знижується поздовжня стійкість смуги в осередку деформації, що може призвести до неприпустимих умов прокатки при великих значеннях натягу. Автори пропонують оптимальний режим натягу, який забезпечує енергозбереження та стабільність процесу. Розрахунки та експериментальні дані підтверджують ефективність запропонованої методики для реальних умов прокатки на безперервному шестиклітьовому стані 1400. Результати можуть бути корисними для удосконалення технології холодної прокатки з великими натягами.

Ключові слова: натяг, поздовжня стійкість, осередок деформації, безперервна прокатка, смуга.

1. Вступ

Розробка раціональних режимів натягу смуги під час безперервного плющення є важливим завданням, тісно пов'язаним із створенням енергозберігаючих технологій. У роботі [1] проаналізовано енергетичну ефективність процесу холодної прокатки з натягом. Оцінка ефективності проводилася за допомогою критерію, який є відношенням потужностей на валках під час деформації з натягом та під час простого процесу прокатки. Результати дослідження показали, що потужність під час деформації смуги з натягом завжди менша, ніж під час простого процесу прокатки. Однак автори не в повній мірі проаналізували можливості забезпечення сталого й стабільного процесу прокатки при великих натяжіннях.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процес безперервного плющення металу на шестиклітьових прокатних станах, зокрема механізм деформації металу під час прокатки та взаємодія смуги з валками в умовах різних режимів натяжіння.

Предметом дослідження є раціональні режими натяжіння під час холодної прокатки металу, який забезпечує оптимальну поздовжню стійкість смуги в осередку деформації, а також енергетичну ефективність процесу. Особлива увага приділяється аналізу впливу різних значень натягу на стійкість і стабільність процесу прокатки, зокрема на можливість пробуксовування та зміни сил тертя у валках.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження було розробити методику визначення оптимального, з погляду ефективності, режиму натягу для забезпечення поздовжньої стійкості смуги в осередку деформації. Стійкість металу у валках оцінювалася за середньою результуючою поздовжніх сил пластично деформованої смуги. $Q_{сер.пр.}^*$. Методику її визначення викладено в роботах [2, 3]. Нагадаємо, що якщо ця сила є стискаючою, процес прокатки відбувається стійко. Якщо ця сила дорівнює нулю, деформація металу протікає в граничних умовах. За позитивного значення сили (коли напрямок її дії збігається з напрямком ходу прокатки), процес стає неможливим.

4. Методи досліджень

Як приклад розрахуємо ефективний режим натягу для реального випадку прокатки жерсті розмірами 0,2x855 мм з підкату 2,4x855 мм на шестиклітьовому стані 1400. Режим обтиснень, кінематичні та силові параметри прокатки взяті з роботи [4] і наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Режим обтиснень під час прокатки жерсті на безперервному стані 1400 [4]

Номер кліті	Товщина смуги, мм		Сплющена довжина осередку деформації $l_{сп}, мм$	$R_{сп}, мм$	$\alpha_{сп}, рад$	f_y	$V_B, м/с$	$V_1, м/с$
	h_0	h_1						
1	2,4	2,06	12,6	467	0,02698	0,086	3,08	3,18
2	2,06	1,23	18,6	421	0,04462	0,072	5,0	5,33
3	1,23	0,74	15,3	478	0,03203	0,049	8,28	8,86
4	0,74	0,45	12,7	556	0,02283	0,048	13,43	14,57
5	0,45	0,31	10,5	787	0,01333	0,057	19,62	21,15
6	0,31	0,2	10,7	1040	0,01028	0,044	30,26	32,78

Припустимо процес прокатки відбувається за чотирьох режимів натягу, наведених у табл. 2. Натягнення на розмотувачі та моталці прийняті незмінними.

Таблиця 2. Прийняті режими натягу в міжклітинному проміжку стану 1400

Номер кліті		1	2	3	4	5	6
Режим натягнень							
q_{0i}/q_{1i}	I	0,07/0,12	0,12/0,1	0,1/0,13	0,13/0,15	0,15/0,17	0,17/0,025
	II	0,07/0,17	0,17/0,15	0,15/0,18	0,18/0,21	0,21/0,23	0,23/0,025
	III	0,07/0,2	0,2/0,18	0,18/0,21	0,21/0,23	0,23/0,25	0,25/0,025
	IV	0,07/0,25	0,25/0,3	0,3/0,25	0,25/0,26	0,26/0,28	0,28/0,025

Примітка: $q_{0i} = \frac{\sigma_{0i}}{2K_{сер}}$ та $q_{1i} = \frac{\sigma_{1i}}{2K_{сер}}$, σ_{0i} та σ_{1i} – задній та передній питомі натяги в кожній кліті стану.

Результати розрахунку середньої результуючої сили $Q_{сер,пр}^*$, а також моментів M_Q^* ; M_{np}^* ; M_H^* і їхнього сумарного значення $\sum M^*$ для всіх клітей стану 1400 за чотирьох режимів натягу наведено в таблиці 3. Зауважимо, що всі зазначені параметри подано в безрозмірній формі:

$$M_{np}^* = \frac{M_{np}}{2K_{сер}R^2b}; M_Q^* = \frac{M_Q}{2K_{сер}R^2b}; M_H^* = \frac{M_H}{2K_{сер}R^2b}; Q_{сер,пр}^* = \frac{Q_{сер,пр}}{2K_{сер}R^2b} \quad (1)$$

$$M_{np} = 2(T_{відс} - T_{вин})R; M_Q = Q_{сер,пр}R; M_{H_0} = Q_{01}R; (M_{H1} = Q_{16}R), \quad (2)$$

де M_{np}^* — момент в осередку деформації;

M_Q^* — момент, що створюється рівнодійною поздовжніх сил $Q_{сер,пр}$;

M_H^* — момент від сил натягу на розмотувачі до моталки;

$T_{відс}$ та $T_{вин}$ — результуючі сил тертя в зоні відставання і випередження;

Q_{01} — сила заднього натягу в першій кліті;

Q_{16} — сили переднього натягу в останній кліті;

$2K_{сер}$ — середній опір деформації металу в задній кліті;

R — радіус валків, R = 300 мм;

B — ширина смуги.

Таблиця 3. Результати розрахунку кінематичних і силових параметрів при різних режимах натягу

Номер кліті	$Q_{сер,пр}^*$	M_{np}^*	M_Q^*	M_H^*	$\sum M^*$	S	V_B , м/с	$\frac{P_{сер}}{2K_{сер}}$
1	-0,0007	0,000621	0,0007	0,00036	0,001681	0,0326	3,08	1,138
	-0,0006	0,000319	0,0006	0,00036	0,001279	0,0374	3,06	1,109
	-0,0006	0,000136	0,0006	0,00036	0,001096	0,0405	3,06	1,091
	-0,0006	-0,000171	0,0006	0,00036	0,000789	0,0463	3,01	1,058
2	-0,0008	0,00411	0,0008	0,10	0,004910	0,0672	4,99	1,239
	-0,0005	0,00401	0,0005		0,00451	0,0632	5,01	1,155
	-0,0003	0,00395	0,0003		0,00425	0,0607	5,03	1,104
	0	0,003331	0		0,003331	0,0649	5,01	0,988

Продовження таблиці 3

3	-0,0004	0,000448	0,0004		0,000848	0,0634	8,33	1,203
	-0,0002	0,000436	0,0002		0,000636	0,0657	8,31	1,122
	-0,0001	0,000429	0,0001		0,000529	0,0634	8,33	1,073
	0,0002	0,000469	-0,0002		0,000269	0,0411	8,51	0,905
4	-0,0004	0,000285	0,0004		0,000485	0,0851	13,43	1,401
	-0,0003	0,000271	0,0003		0,000571	0,0828	13,46	1,3
	-0,0002	0,000271	0,0002		0,000471	0,0806	13,48	1,249
	-0,0002	0,000270	0,0002		0,000470	0,0768	13,53	1,179
5	-0,0004	0,000156	0,0004		0,000550	0,081	19,57	1,721
	-0,0004	0,000149	0,0004		0,000549	0,077	19,64	1,837
	-0,0004	0,000146	0,0004		0,000546	0,077	19,64	1,785
	-0,0003	0,000142	0,0003		0,000442	0,076	19,66	1,709
6	-0,0003	0,000163	0,0003	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,000458	0,087	30,16	2,6
	-0,0003	0,000171	0,0003	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,000466	0,0825	30,28	2,412
	-0,0003	0,000174	0,0003	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,000469	0,0807	30,33	2,369
	-0,0003	0,000177	0,0003	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,000472	0,0782	30,40	2,903

Крім того, в таблиці 3 наведені значення випередження S , лінійної швидкості валків V_v і середнього тиску $\frac{P_{сер}}{2K_{сер}}$. Швидкість виходу смуги з валків V_1 за різних режимів натягу залишали незмінною та рівною тій, що представлена в таблиці 1. При цьому, відповідно до випередження, коригували швидкість V_v .

5. Результати досліджень

Аналіз результатів дослідження показує, що з посиленням режиму натягу знижується поздовжня стійкість смуги в осередку деформації, оскільки абсолютне значення сили $Q_{сер.пр}^*$ зменшується. Така картина спостерігається по всіх клітках стану 1400. Слід підкреслити, що за IV режиму натягу прокатка в другій клітці відбувається в граничних умовах $Q_{сер.пр}^* = 0$ і будь-яка зміна параметрів, наприклад, зменшення коефіцієнту тертя, може призвести до часткового або повного пробуксовування металу у валках.

Крім того, під час прокатки з четвертим режимом натягу смуги в третій клітці рівноважний стан металу в осередку деформації неможливий. Очевидно, що при значеннях $q_{03} = 0,3$ і $q_{13} = 0,25$ в контакт металу з валками втягувальних сил недостатньо для забезпечення нормального і стійкого процесу. З наведеної таблиці 3 також випливає, що задній натяг смуги істотніше впливає на результуючу $Q_{сер.пр}^*$ порівняно з переднім, що позначається на поздовжній стійкості металу у валках.

Оцінимо вплив режиму натягу на ефективність енергозбереження загалом за станом 1400. Для цього підсумуємо моменти ΣM^* по всіх клітках за відповідного режиму натягу. Наприклад, при першому режимі сумарний момент по стану буде становити:

$$\Sigma M_I^* = 0,001681 + 0,004910 + 0,000848 + 0,000485 + 0,000556 + 0,000458 = 0,008938$$

За інших режимів натягу він представлений у таблиці 4.

Таблиця 4. Вплив режиму натягу на сумарний момент по стану 1400

Сумарний момент по стану	Режим натягу			
	I	II	III	IV
$\Sigma\Sigma M_i^*$	0,008938	0,008011	0,007301	0,005773

Як видно, мінімальний момент $\Sigma\Sigma M_i^*$ у цілому по стану має місце за четвертого режиму натягу. Однак за умовами стійкості смуги у валках цей режим неприйнятний. Очевидно оптимальні натяжіння за умовою ефективності з урахуванням стабільного процесу слід очікувати між III і IV режимами. Скоригуємо натяжіння в міжклітинних проміжках таким чином, щоб вони були близькими до четвертого режиму, але при цьому дотримувалася б поздовжня стійкість смуги по всій лінії стану. Новий, близький до оптимального, режим натягу і розрахункові значення кінематичних і силових параметрів наведено в таблиці 5, з якої випливає, що в усіх проходах $Q_{сер.пр}^* < 0$ і умови поздовжньої стійкості смуги у цілому по стану дотримуються.

Таблиця 5. Раціональний режим натягу металу при прокатуванні жерсті на стані 1400

Номер кліті	Питомий натяг q_{0i}/q_{1i}	S	V_B	$\frac{P_{сер}}{2K_{сер}}$	$Q_{сер.пр}^*$	$M_{пр}^*$	M_Q^*	M_H^*	ΣM^*
1	0,07/0,21	0,0416	3,05	1,084	-0,0006	0,000074	0,0006	0,00036	0,001034
2	0,21/0,21	0,0632	5,013	1,078	-0,0003	0,00378	0,0003		0,00408
3	0,21/0,26	0,0637	8,32	1,016	-0,0001	0,000406	0,0001		0,000506
4	0,26/0,26	0,0744	13,56	1,164	-0,0002	0,000274	0,0002		0,000274
5	0,26/0,28	0,0790	19,60	1,734	-0,0003	0,000142	0,0003		0,000442
6	0,28/0,025	0,0782	31,33	2,355	-0,0003	0,000177	0,0003	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,000477

Знайдемо сумарний момент по всіх клітях стану при скоригованому режимі натяжіння:

$$\Sigma\Sigma M_i^* = 0,001034 + 0,00408 + 0,000506 + 0,000274 + 0,000442 + 0,000477 = 0,006813$$

Як видно, у цьому випадку сумарний момент прокатки $\Sigma\Sigma M_i^*$ істотно менший (від 7 до 20%) порівняно з його величиною за інших режимів натягу (табл. 4) в умовах стабільного процесу.

Необхідно підкреслити, що скоригований режим натягу є дуже близький до реального, який застосовується на безперервному шестиклітьовому стані 1400.

6. Висновки

Таким чином, розроблено методику побудови раціонального, за умови енергозбереження, режиму натяжіння металу при безперервному прокатуванні, яка включає оцінку поздовжньої стійкості смуги по всій лінії прокатного стану. Ця оцінка має важливе значення в разі деформації зі значним натяжінням, коли запас втягуючих сил є близьким до граничного.

Список літератури:

- 1) Василев Я.Д., Самокиш Д.Н. (2013) Разработка энергосберегающих режимов натяжений на непрерывных станах холодной прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* № 2, с. 34-38.
- 2) Максименко О.П., Романюк Р.Я. (2011) Уточнение условий устойчивости процесса прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* № 1, с. 41-43.

- 3) Максименко О.П., Романюк Р.Я., Лобойко Д.И. (2013) Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. № 6, с. 47-49.
- 4) Василев Я. Д., Мінаєв О.А. (2009) Теорія поздовжньої прокатки. Донецьк : УНІТЕХ.
- 5) Данченко В.М., Гринкевич В.О., Головка О.М. (2008) Теорія процесів обробки металів тиском: Підручник. – Дніпропетровськ: Пороги.
- 6) Максименко О. П., Лейко О.Є. (2001) Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА.
- 7) 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.
- 8) Максименко О.П., Лейко О.Є. (2005) Основи трибології. Навчальний посібник для студентів спеціальності: Обробка металів тиском. Дніпродзержинськ: ДДТУ.
- 9) Ніколаєв В. О., Мазур В. Л. (2010) Виробництво плоского прокату : підр. Для студ. Вищ. Навч. Заклад. Запоріжжя : ЗДІА.
- 10) Mizuno T. (1966) An experimental research on cold rolling. 1. Report: Estimating the mechanism of the lubrication / T. Mizuno // Japan Society of Technology of Plasticity. – № 7.
- 11) Коновалов Ю. В., Мінаєв А. А. (2012) Металургія :навчальний посібник в 3 кн. Книга 2. Металознавство та основи термічної обробки металів. Теоретичні основи обробки металів тиском. Сортамент прокатної продукції. Виготовлення заготовок, листопрокатне виробництво. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ».

Methodology for selecting strip tension during continuous rolling, taking into account process stability

Oleh Maksymenko

Prof. V.I. Loginov Chair of Metallurgy, Dnipro State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID 0000-0003-0846-9869

Oleksandr Nikulin

Prof. V.I. Loginov Chair of Metallurgy, Dnipro State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID 0000-0002-3509-7266

Anna Pryimak

Prof. V.I. Loginov Chair of Metallurgy, Dnipro State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID 0009-0009-9070-643X

Ruslan Pavliuk

Prof. V.I. Loginov Chair of Metallurgy, Dnipro State Technical University, Kamianske, Ukraine

Abstract: The article deals with the development of a methodology for determining the rational tension regime during continuous metal rolling to ensure the longitudinal stability of the strip in the deformation zone. The aim of the study is to create an energy-saving rolling technology that takes into account the stability of the process under different tension conditions. The metal stability is assessed through the average value of the resulting longitudinal forces acting on the plastically deformed strip. The analysis of the results showed that with increasing tension, the longitudinal stability of the strip in the deformation zone decreases, which can lead to unacceptable rolling conditions at high tension values. The authors propose an optimal tension regime that ensures energy saving and process stability. The calculations and experimental data confirm the effectiveness of the proposed methodology for real rolling conditions on the continuous six-stand mill 1400. The results can be useful for improving the technology of cold rolling with high tensions.

Keywords: tension, longitudinal stability, deformation centre, continuous rolling, strip.

