

УДК 621.771.01

Романюк Р. Я.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ПОЗДОВЖНЬОЇ СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСУ ТОНКОЛИСТОВОЇ ПРОКАТКИ

В роботах [1–3] розроблені умови ведення стійкого процесу тонколистової прокатки в поздовжньому напрямку в сталому режимі.

Перша з них враховує кінематичні параметри осередку деформації та свідчить про те, що діапазон можливих значень параметру $\frac{\gamma_c}{\alpha_c}$ (де γ_c , α_c – відповідно кут, що характеризує положення нейтрального перетину та кут пружно-пластичного контакту штаби з валком) обмежується довжиною пластичного контакту штаби з валком, точніше наявністю одночасно пластичних зон випередження і відставання. Ця умова має вигляд [1]:

$$\frac{x_{1n}}{l_c} - \frac{x_1}{l_c} < \frac{\gamma_c}{\alpha_c} < 1 - \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c}, \quad (1)$$

де l_c , x_1 – відповідно довжина дуги контакту штаби з валком та її приріст по лінії, яка з'єднує центри обертання валків, що є наслідком пружного стиснення валків і пружного відновлення штаби, мм;

x_{0n} , x_{1n} – відповідно збільшення довжини дуги контакту штаби з валком, що є наслідком пружного стиснення та пружного відновлення штаби, мм.

Друга умова отримана в результаті розгляду силової взаємодії в осередку деформації при тонколистовій прокатці, виходячи з диференціального рівняння Т. Кармана, яке має наступний вигляд [1, 4]:

$$dp_x = \left(2k \mp \frac{t_x}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \frac{dh_x}{h_x}, \quad (2)$$

де $2k$ – опір деформації, Мпа.

В результаті рішення цього рівняння, використовуючи моделі тертя відомі з літератури [1, 4], одержуємо епюри контактних напружень. За їх допомогою, в остаточному підсумку, визначається коефіцієнт або показник сталості K_{cm} :

$$K_{cm} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_x^* d\varphi, \quad (3)$$

де Q_x^* – поточна результуюча горизонтальних контактних сил в осередку деформації в безрозмірному вигляді.

$$Q_x^* = \int_{\varphi}^{\alpha_y} \left(-\frac{p_x}{2k} \sin \varphi + \frac{t_x}{2k} \cos \varphi \right) d\varphi, \quad (4)$$

де φ , α_y – відповідно поточний кут в осередку деформації та кут захвату, рад;

p_x та t_x – поточні значення нормального контактного напруження та напруження тертя в осередку деформації в перетині φ , які визначаються з вирішеного рівняння Т. Кармана, Мпа.

Умовою стійкого процесу прокатки в сталому режимі є виконання умови, при якому показник K_{cm} буде більше нуля, тобто:

$$K_{cm} > 0. \quad (5)$$

Слід також зазначити, що при виводі першої умови поздовжньої стійкості процесу (1) використовувалась теоретична модель розподілу контактних напружень по осередку деформації, яка враховує як ковзання в осередку деформації, так і прямопропорційний зв'язок між контактними напруженнями [1]. Відповідно для зон відставання та випередження форми для визначення напружень тертя мають вигляд:

$$t_x = -fp_x \left| \frac{h_0}{h_0 - h_n} \left(\frac{h_n}{h_x} - 1 \right) \right|;$$

$$t_x = -fp_x \left| \frac{h_1}{h_n - h_1} \left(\frac{h_n}{h_x} - 1 \right) \right|.$$
(6)

При визначенні епюр розподілу контактних напружень за другої умови (5) можна використовувати різні моделі тертя, наприклад, Амонтона-Кулона, Зібеля, Я. Д. Василева (6) [1, 4].

Таким чином, можна зробити висновок про те, що обидві умови отримані за допомогою різних підходів. Перша умова не враховує внутрішній напружений стан штаби, а друга отримана з урахуванням як зовнішніх, так і внутрішніх сил, при цьому показником сталості є не кінематичний параметр (кут нейтрального перетину), як в першій умові.

Очевидною перевагою умови (1) є те, що за допомогою формул, які наведені в [1], легко знайти складові $\frac{x_{1n}}{l_c}$, $\frac{x_1}{l_c}$, $\frac{\gamma_c}{\alpha_c}$, $\frac{x_1}{l_c}$, $\frac{x_{0n}}{l_c}$, тоді як для визначення показника сталості K_{cm} необхідно вирішити рівняння Т. Кармана, отримати епюри розподілу контактних напружень $\frac{p_x}{2k}$ та $\frac{t_x}{2k}$ по осередку деформації, визначити розподіл сили Q_x^* та розрахувати показник сталості K_{cm} і порівняти його значення з 0. Хоча з використанням ЕОМ це робиться не важко.

Метою даної роботи є порівняння граничних умов захвату в сталому режимі, що знаходяться з цих двох умов поздовжньої стійкості процесу прокатки.

Теоретичні дослідження з оцінки граничної захоплюючої здатності валків, використовуючи обидві умови, проведемо для випадків деформації за існуючими режимами прокатки на стані 1400 КарМК.

Даний стан призначений для виробництва луженої та чорної жерсті, сталевих листів покрівельної та конструкційної сталей. У сортамент готової продукції цеху входять біла жерсть товщиною 0,15–0,36 мм, у тому числі жерсть, що одержана методом подвійної прокатки і сталеві штаби товщиною 0,25–0,6 мм. Прокатку жерсті ведуть на шестиклетьовому стані 1400 безперервної холодної прокатки. Діаметр робочих валків 570–600 мм, опорних – 1320–1400 мм, довжина бочки валків 1400 мм, максимальна швидкість прокатки 33 м/с, гранично припустиме значення сили прокатки 20 МН.

Обмежимося розглядом 2 та 3 кліті, режими обтисень в цих клітях наведені в табл. 1 [5]. Змінним параметром при аналізі будемо використовувати, наприклад, задній натяг штаби, оскільки при його збільшенні погіршується стійкість процесу прокатки.

Визначаємо стійкість процесу прокатки жерсті в другій кліті за обома теоретичними умовами.

Таблиця 1

Існуючі режими обтисень при виробництві жерсті 0,2×855 мм
($\sigma_{T0} = 260$ МПа) в 2 та 3 кліті стану 1400 КарМК

№ кліті	$h_0, \text{мм}$	$\varepsilon, \%$	$V, \text{м/с}$	$q_0, \text{МПа}$	$q_1, \text{МПа}$	f_y
2	2,06	40,3	5,33	160	140	0,072
3	1,23	39,8	8,86	140	175	0,049

За умови (1), маємо: $\frac{x_{1n}}{l_c} - \frac{x_1}{l_c} = -0,06 < \frac{\gamma_c}{\alpha_c} = 0,26 < 1 - \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c} = 0,88$.

Умова виконується, що свідчить про стійкість процесу прокатки.

Перш ніж використати умову (5), обираємо модель тертя для теоретичного прогнозування розподілу контактних напружень по осередку деформації.

Попередньо відмітимо, що прийнята О. І. Целіковим модель розподілу напружень тертя у вигляді $t_x = f_y p_x$, є недостатньо точною моделлю, оскільки вона не враховує впливу зони прилипання практично на всі параметри прокатки, у тому числі і на поздовжню стійкість процесу, окрім того, в нейтральному перетині напруження тертя приймають невизначене значення, а також епюри контактних напружень кількісно дають завищені результати при тонколистовій прокатці. Те ж саме можна сказати і про модель тертя Зібеля. Тому для даних умов (холодна тонколистова прокатка зі змащенням) доцільно використовувати модель (6) або аналогічну їй.

Приймаємо модель розподілу напружень тертя, розроблену в [3]. Вона також враховує прямопропорційний зв'язок між контактними напруженнями та зону прилипання і використовується для прогнозування розподілу контактних напружень при тонколистовій прокатці. Дана модель має наступний вигляд:

$$\frac{t_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \alpha_y > \varphi > \varphi^*; \\ f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, & \text{при } \varphi^* > \varphi > \varphi^{**}; \\ -f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \varphi^{**} > \varphi > 0, \end{cases} \quad (7)$$

Побудова епюр контактних напружень з використанням цієї моделі детально розглянута в роботі [6]. Після цього, за допомогою формул (3–5), визначаємо сталість процесу прокатки. Результати оцінки наведені на рис. 1, а, б.

Показник сталості в цьому випадку є більшим 0 та дорівнює $K_{cm} = 0,000052$.

Таким чином, обидві умови теоретично підтвердили сталість процесу прокатки.

Далі збільшуємо задній натяг до того моменту, поки за умовами сталості, які розглядаються, будуть наступати граничні випадки прокатки.

На рис. 1, в, г наведені епюри розподілу сили Q_x^* за умови заднього натягу 175 Мпа ($\frac{q_0}{\beta\sigma_{Tcr}} = 0,25$). В цьому випадку показник сталості приймає нульове значення $K_{cm} = 0$ і настає граничний випадок деформації за умови (5). Слід зазначити, що за умови (1) сталий процес є можливим, оскільки:

$\frac{x_{1n}}{l_c} - \frac{x_1}{l_c} = -0,06 < \frac{\gamma_c}{\alpha_c} = 0,25 < 1 - \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c} = 0,88$.

Збільшуємо задній натяг до значення 372 Мпа ($\frac{q_0}{\beta\sigma_{Tcr}} = 0,53$). В цьому випадку умова

(5) показує, що сталий процес неможливий, а за умови (1) настають граничні умови деформації: $\frac{x_{1n}}{l_c} - \frac{x_1}{l_c} = -0,0076 < \frac{\gamma_c}{\alpha_c} = -0,0075 < 1 - \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c} = 0,93$.

З проведеного дослідження можна зробити висновки про те, що умова (1) в граничному випадку, напевно, показує при яких параметрах процесу настає порив штаби і сталий процес прокатки стає неможливим, а умова (5) враховує внутрішній напружений стан металу і тому граничний випадок деформації настає раніше.

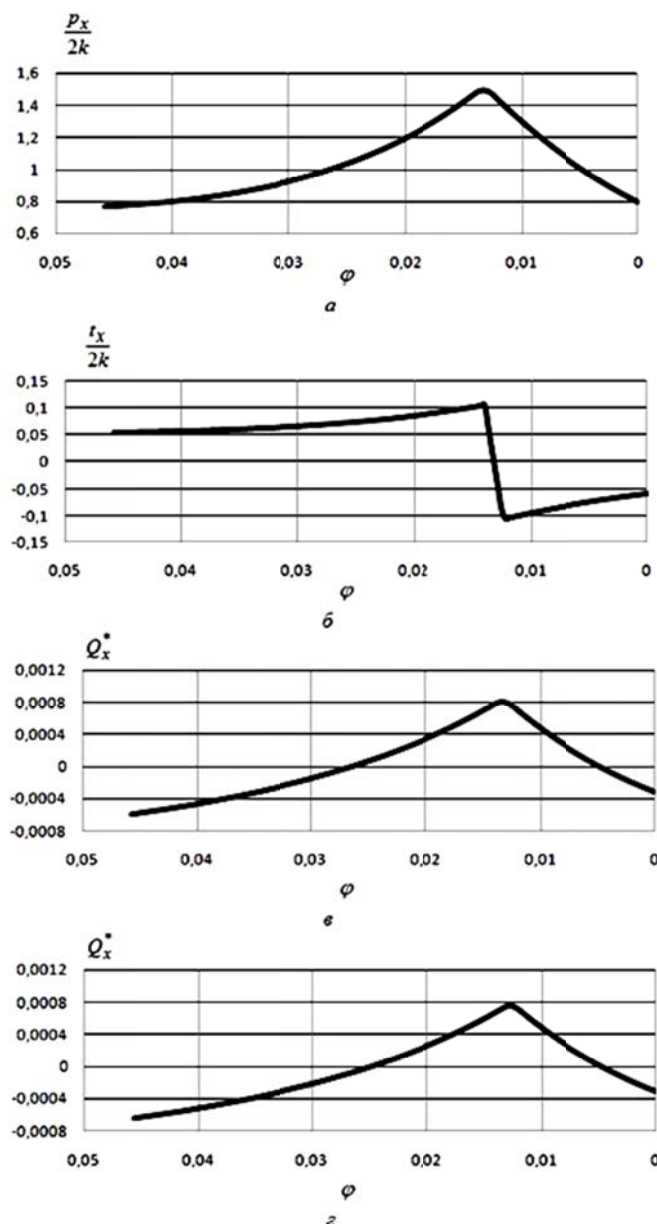


Рис. 1. Епюри розподілу по осередку деформації:

а, б – контактних напружень; в, г – сили Q_x^*

Аналогічний висновок можна зробити проаналізувавши процес і в третій клітці даного стану. Граничні випадки наступають: за умови (1) при $q_0 = 450$ Мпа ($\frac{q_0}{\beta\sigma_{Tcr}} = 0,55$); за умови

(5) при $q_0 = 185$ Мпа ($\frac{q_0}{\beta\sigma_{Tcr}} = 0,23$).

Дослідні дані [7] свідчать про оптимальні значення відносних питомих натягів в діапазоні $0,17 \leq \frac{q}{\sigma_T} \leq 0,49$, хоча досвід роботи промислових станів показує $\frac{q}{\sigma_T} = 0,15$ [8], тому

граничні умови в діапазоні $\frac{q_0}{\beta\sigma_{Tcr}} = 0,23 - 0,25$ найбільш можливі на практиці.

Таким чином, умова стійкості (5), розроблена в [2, 3], доповнює або уточнює відомі дослідження з поздовжньої стійкості процесу прокатки в сталому режимі.

ВИСНОВКИ

Проаналізовані умови існування стійкого процесу деформації в сталому режимі при тонколистовій прокатці та проведено їх порівняння. Зроблено припущення, що в граничному випадку процесу умова (1) характеризує порив штаби і стійкий процес прокатки стає неможливим. Визначення граничної захоплюючої здатності валків за умовою (5), яка враховує внутрішній стан металу, відповідає дослідним даним роботи промислових прокатних станів. Отже, вона доповнює теоретичні відомості в даній області і може бути використана для теоретичного визначення поздовжньої стійкості процесу тонколистової прокатки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Василев Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
2. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки по эпюрам контактных напряжений / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2010. – №2. – С.110–114.
3. Романюк Р. Я. Підвищення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки на основі розвитку теоретичних положень щодо контактної взаємодії полоси з валками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском» / Р. Я. Романюк. – Дніпропетровськ, 2012. – 19 с.
4. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : *Металлургия*, 1980. – 320 с.
5. Уточнение методики расчета энергосиловых параметров при холодной полосовой прокатке с большим градиентом удельных натяжений / Я. Д. Василев, Д. В. Коноводов, А. В. Дементенко [и др.] // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С.190–194.*
6. Романюк Р. Я. Моделювання розподілу контактних напружень при тонколистовій прокатці / Р. Я. Романюк // *Зб. наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету : (технічні науки). – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2013. – Вип. 1 (21). – С.104–109.*
7. Кузнецов Л. А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки / Л. А. Кузнецов. – М. : *Металлургия*, 1988. – 304 с.
8. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян // «*Вища школа*», 1975. – 192 с.

REFERENCES

1. Vasilev J. D. Teoriya pozdovzhnyoi prokatki / J. D. Vasilev, O. A. Minaev. – Doneck : UNITEK, 2009. – 488 s.
2. Maximenko O. P. Ocenka ustoichivosti processa prokatki po epuram kontaktnih napryazheniy / O. P. Maximenko, R. J. Romanyuk // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promischlennost'*. – 2010. – №2. – S.110–114.
3. Romanyuk R. J. Pidvischennya pozdovzhnyoi stalosti procesu tonkolistovoi prokatki na osnivi rozvitku teoretichnih polozhen shodo kontaktnoi vzayemodii polosy z valkami: avtoref. dis. na zdjbuttya nauk. stupenya kand. techn. nauk: spez. 05.03.05 «Prozesi ta maschini obrobki tiskom» /R. J. Romanyuk. – Dnipropetrovs'k, 2012. – 19 s.
4. Celikov A. I. Teoriya prodolnoy prokatki / A. I. Celikov, G. S. Nikitin, S. E. Rokotyanyan. – M. : *Metallurgiya*, 1980. – 320 s.
5. Utochnenie metodiki rascheta energosilovich parametrov pri holodnoy polosovoy prokatke s bolschim gradientom udel'nych natyazheniy / J. D. Vasilev, D. V. Konovodov, A. V. Dementienko [i dr.] // *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 2 (23). – S. 190–194.*
6. Romanyuk R. J. Modelyuvannya rozpodilu kontaktnih napruzhen' pri tonkolistoviy prokatci / R. J. Romanyuk // *Zb. nauk. prac' Dniprodzerzhins'kogo derzhavnogo technichnogo universitetu : (technichni nauki). – Dniprodzerzhins'k : DDTU. – 2013. – Vip. 1 (21). – S.104–109.*
7. Kuznecov L. A. Primenenie UVM dlya optimizacii tonkolistovoy prokatki / L. A. Kuznecov. – M. : *Metallurgiya*, 1988. – 304 s.
8. Vasilev J. D. Proisvodstvo polosovoy i listovoy stali / J. D. Vasilev, M. M. Safyan // «*Vischa skola*», 1975. – 192 s.

Романюк Р. Я. – канд. техн. наук, ст. викл. ДДТУ

ДДТУ – Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Дніпродзержинськ.

E-mail: r22roma@mail.ru