



УДК 658.52.011.56:621.771.23-413

М.Г. ІЄВЛЄВ*, Г.Г. ГРАБОВСЬКИЙ**

**АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ШИРИНОЮ ЛИСТА НА СТАНАХ
ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ**

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**ДНВК «Київський інститут автоматички», м. Київ, Україна

Анотація. Управління шириною листа за допомогою ЕОМ на товстолистових станах (ТЛС) та в чорнових групах клітей (ЧГК) ширококузових станів гарячої прокатки (ШСГП) має забезпечити задану ширину листа (підкату); прямокутність листа (підкату) у плані, що характеризується рівномірністю ширини листа як у середній частині за довжиною, так і на передньому та задньому кінцях; мінімальний обріз переднього та заднього некондиційного кінців листа («язики» та «ластівчин хвіст»). Формування заданої ширини листа здійснюється або у спільно працюючих вертикальній та горизонтальній клітях у реверсивному режимі, або у безперервній нереверсивній групі клітей (попарно вертикальній – горизонтальній). За провідною участю авторів виконані розробка Автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) та дослідження з регулювання ширини у ЧГК стану 560. У відомих роботах наведено математичні моделі опису природного та додаткового розширення й вимоги до точності цих моделей. З метою оцінки точності характеристик були проведені експериментальні дослідження на лабораторному стані. При дослідженні моделювалися умови прокатки в ЧГК стану 560. Аналіз експериментальних даних та розрахованих за різними формулами, наведеними у літературних джерелах, показав, що всі відомі моделі не відповідають пред'явленим до них з боку АСУ ТП ЧГК стану 560 вимогам до точності. Тому було розроблено нові математичні моделі розширення. У статті наведено математичні моделі зміни ширини в середній частині по довжині підкату та моделі зміни ширини на «голові» та «хвості» підкату. Описано метод визначення розчину валків, що реалізує такий закон зміни розчину вертикальних валків, який усуває відхилення ширини підкату від вихідної (до прокатки) величини. Перевірка розроблених математичних моделей в умовах технологічного процесу в ЧГК стану 560 показала їхню здатність забезпечити вирішення задачі керування шириною листа в реальному масштабі часу.

Ключові слова: ширина листа, математичні моделі, природне та додаткове розширення.

Abstract. Controlling the sheet width using a computer on heavy plate mills (HPM) and roughing mill trains (RMT) of wide-strip hot rolling mills (WSHRM) must ensure the set width of the sheet (roll), rectangularity of the sheet (roll) in the plan characterized by the uniformity of the sheet width in the middle part along its length, as well as at the front and rear ends, and the minimal trimming of the front and rear defective ends of the sheet (so-called "tongues" and "swallowtail"). Forming the desired sheet width is carried out either in jointly working vertical and horizontal mills in a reversible mode or in a continuous non-reversible group of mills (vertically-paired – horizontal). With the leading participation of the authors, there were carried out the development of the automated process control system (APCS) and studies aimed at regulating the width in the RMT of mill 560. Mathematical models describing natural and additional expansion and the requirements for their accuracy are presented in famous scientific works. To assess the accuracy of the characteristics, experimental studies were conducted on a laboratory mill. The rolling conditions in the RMT of mill 560 were simulated during the research. The analysis of experimental data and data obtained through the calculation using various formulas provided in literary sources showed that all known models do not meet the accuracy requirements set by the APCS for the RMT of mill 560. Therefore, new mathematical models of expansion were developed. The paper presents the mathematical models for changing the width in the middle part along the length of the roll and the models for

changing the width at the “head” and “tail” of the roll. A method for determining a roll gap is described, which implements the law of change of the gap of vertical rolls that eliminates deviations in the width of the roll from the initial (before rolling) value. The testing of the developed mathematical models under the conditions of the technological process in the RMT of mill 560 showed their ability to solve the problem of controlling the sheet width in real time.

Keywords: sheet width, mathematical models, natural and additional expansion.

DOI: 10.34121/1028-9763-2023-2-82-87

1. Вступ

Управління шириною листа за допомогою ЕОМ на товстолистових станах (ТЛС) та в чорнових клітках (ЧК) ширококутових станів гарячої прокатки (ШСГП) має забезпечити задану ширину листа (підкату); прямокутність листа (підкату) у плані, що характеризується рівномірністю ширини листа як у середній частині за довжиною, так і на передньому та задньому кінцях; мінімальний обріз переднього та заднього некондиційного кінців листа («язики» та «ластівчин хвіст»).

Метою даної статті є дослідження математичних моделей, які використовуються для формування заданої ширини листа на товстолистових станах та в чорнових клітках ширококутових станів гарячої прокатки.

2. Формування заданої ширини листа на ТЛС та в ЧК ШСГП

Формування заданої ширини листа здійснюється або у спільно працюючих вертикальній та горизонтальній клітках у реверсивному режимі, або у безперервній нереверсивній групі клітей (попарно вертикальній – горизонтальній).

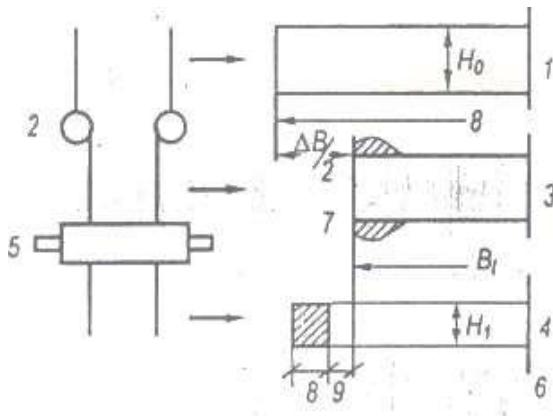


Рисунок 1 – Характер режимів обтискань послідовно у вертикальній та горизонтальній клітках

Характер режимів обтискання ілюструє рис. 1, де представлені підкат 1 перед пропуском у вертикальній клітці 2; підкат 3 після прокатки у клітці 2; підкат 4 після прокатки в горизонтальній клітці 5. Там же показана права частина підкатів щодо осової лінії 6 стану. Після обтискання у вертикальній клітці підкат став вужче і випнув по краях 7. Далі в результаті обтискання в горизонтальній клітці підкат знову прийняв умовно прямокутну форму, але став ширше на величину суми приростів 8, 9, приріст 8 обумовлено зняттям опуклостей 7, а приріст 9 простим розширенням за рахунок обтискання у клітці 5.

За провідною участю авторів виконані розробки АСУ ТП та дослідження з регулювання ширини у чорновій групі клітей (ЧГК) стану 560. У роботах [1–4] наведено математичні моделі опису природного та додаткового розширення і вимоги до точності цих моделей. З метою оцінки точності характеристик були проведені експериментальні дослідження на лабораторному стані. При дослідженні моделювалися [6] умови прокатки в ЧГК стану 560. Аналіз експериментальних значень природного та додаткового розширення, розрахованих за різними формулами, наведеними у літературних джерелах, показав, що всі відомі моделі не відповідають пред’явленим до них з боку АСУ ТП ЧГК стану 560 вимогам до точності. Тому було розроблено нові математичні моделі розширення [2, 4]. Як математичний апарат використано метод групового обліку аргументів. Середньоквадратичні помилки прогнозування розши-

рення за розробленими моделями становлять 0,3–0,5% для середньої частини довжини листа.

У роботах [1, 5] показано, що для прогнозування ширини підкату потрібні різні рівняння для опису процесів обтискань на «голові», середній частині та на «хвості» підкату. Нижче наведено короткий опис математичних моделей розширення листа для трьох ділянок його довжини.

3. Математична модель зміни ширини в середній частині по довжині підкату

Ширина підкату після вертикального та горизонтального обтискання може бути описана рівнянням

$$B = B_e + \Delta B_h + \Delta B_m, \quad (1)$$

де B_e – ширина підкату після вертикальної кліті 3, ΔB_h – приріст ширини підкату 9 при звичайному розширенні за рахунок обтискання в горизонтальній кліті 5, ΔB_m – приріст ширини 8 за рахунок обтискання опуклих ділянок 7.

Величини приросту ширини описуються рівняннями

$$\Delta B_h = \left[\left(\frac{H_0}{H_1} \right)^{C_h} - 1 \right] B_e, \quad (2)$$

$$\Delta B_m = C_{me} \Delta B, \quad (3)$$

де ΔB – обтискання у вертикальній кліті, H_0, H_1 – відповідно товщина листа до та після пропуску, C_{me} – прогнозований коефіцієнт приросту ширини, C_h – коефіцієнт приросту ширини за рахунок обтискання в горизонтальній кліті.

Коефіцієнти в рівняннях (2) та (3), що характеризують розподіл складових приросту ширини, знайдені за результатами експериментальних даних прокатки, визначаються такими виразами:

$$C_h = \exp \left[-1,64 \left(\frac{B_e}{H_0} \right)^{0,376} \left(\frac{B_e}{l_d} \right)^{0,016 \frac{B_e}{H_0}} \left(\frac{H_0}{R_r} \right)^{0,015 \frac{B_e}{H_0}} \right], \quad (4)$$

$$C_{me} = \exp \left[-1,877 \left(\frac{\Delta B}{B} \right)^{0,063} \left(\frac{H_0}{R_B} \right)^{0,441} \left(\frac{R_B}{B} \right)^{0,989} \left(\frac{B}{B_e} \right)^{1,591} \right], \quad (5)$$

де $\Delta B = \Delta B_h + \Delta B_m$; R_r – радіус валка горизонтальної кліті, R_B – радіус валка вертикальної кліті, l_d – довжина дуги захвату.

Зміни приросту ширини в середній частині довжини підкату залежать від висоти спучування. Тому коефіцієнт, який визначається за результатами вимірювання ширини, адаптується введенням параметра ν :

$$C_{mes} = C_{me} + \nu. \quad (6)$$

Цей параметр експериментально оцінюється за результатами вимірів при прокатці. Рекомендована послідовність розрахунку за наведеними рівняннями:

- коефіцієнти C_{me} та C_{mes} розраховуються за даними прокатки та фактичною шириною підкату;

- параметр $\nu(x)$ оцінюється за рівнянням (6);
- приріст ширини ΔB прогнозується з використанням $\nu(x)$;
- далі обчислюється корекція розчину вертикальної кліті $\Delta s_e(x)$ для отримання заданої ширини, тут x – поточна відстань від «голови» або «хвоста» підкату, що прокатується у вертикальній або горизонтальній кліті.

4. Математичні моделі зміни ширини на «голові» та «хвості» підкату

За результатами дослідів були отримані регресійні рівняння, які містять три частини, що відповідають опису пластичної деформації при прокатуванні у вертикальних та горизонтальних валках:

1) зміна ширини при обтисканні ділянок спучування у вертикальній кліті на «голові» підкату

$$\text{при } B(x) > s_e(x) \quad \Delta B_{vT}(x) = s_e(x) - s_e + B'_{vT} \exp\left(-2,5\sqrt{\frac{x}{R_B}}\right), \quad (7)$$

$$\text{де} \quad \Delta B'_{vT} = 0,13 \left(\frac{B(x)}{\Delta B(x)}\right)^{0,469} \left(\frac{H_0}{R_B}\right)^{0,274} \Delta B(x); \quad (8)$$

$$\text{при } B(x) \leq s_e(x) \quad \Delta B_{vT}(x) = B(x) - s_e; \quad (9)$$

на «хвості» підкату

$$\text{при } B(x) > s_e(x) \quad \Delta B_{vT}(x) = s_e(x) - s_e; \quad (10)$$

$$\text{при } B(x) \leq s_e(x) \quad \Delta B_{vB}(x) = B(x) - s_e; \quad (11)$$

2) зміна ширини при обтисканні ділянок спучування в горизонтальній кліті на «голові» підкату

$$\Delta B_{MT}(x) = \alpha_T B_M(x) - B_M \quad (12)$$

$$\text{при } x \leq 1,5R_\Gamma \quad \alpha_T(x) = 1 - \left(1 - \frac{x}{1,5R_\Gamma}\right)^{C_T}, \quad (13)$$

$$\text{при } x > 1,5R_\Gamma \quad \alpha_T(x) = 1; \quad (14)$$

на «хвості» підкату

$$\Delta B_{MB}(x) = \alpha_B B_M(x) - B_M \quad (15)$$

$$\text{при } x \leq R_\Gamma \quad \alpha_B(x) = 1 - C_B \left(1 - \frac{x}{R_{p.\Gamma}}\right)^{2,0}, \quad (16)$$

$$H_0 \geq \frac{R_\Gamma}{3,85}, \quad C_B = 3,85 \frac{H_0}{R_\Gamma},$$

$$H_0 < \frac{R_{p.\Gamma}}{3,85}, \quad C_B = 1;$$

при $x > R_r$

$$\alpha_B(x) = 1;$$

3) зміна ширини при звичайній горизонтальній прокатці на «голові» підкату

$$\Delta B_{H.T} = \Delta B'_{H.T} \exp\left(-3,4 \frac{x}{R_{p.T}}\right), \quad (17)$$

$$\Delta B'_{H.T} = 0,275 \left(\frac{H_0 - H_1}{H_0}\right)^{0,953} \left(\frac{H_0}{R_r}\right)^{0,428} R_r; \quad (18)$$

на «хвості» підкату

$$\Delta B_{H.B}(x) = \Delta B'_{H.B} \exp\left(-3,4 \frac{x}{R_{H.T}}\right), \quad (19)$$

$$\Delta B'_{H.B} = 0,313 \left(\frac{H_0 - H_1}{H_0}\right)^{0,689} \left(\frac{H_0}{R_r}\right)^{0,471} R_r. \quad (20)$$

Сумарне розширення кінців листа на «голові» підкату

$$\Delta B_{vH.T}(x) = \Delta B_{vT}(x) + \Delta B_{MT}(x) + \Delta B_{H.T}(x); \quad (21)$$

на «хвості» підкату

$$\Delta B_{vH.B}(x) = \Delta B_{vB}(x) + \Delta B_{MB}(x) + \Delta B_{H.B}(x). \quad (22)$$

5. Метод визначення розчину валків

З наведених рівнянь випливає, що існує такий закон зміни розчину вертикальних валків $s_e(x)$, який усуває відхилення ширини підкату від вихідної (до прокатки) величини. Але аналітично неможливо обчислити необхідний розчин валків, оскільки отримані рівняння є невизначеними функціями $s_e(x)$ розчину та ширини $B_e(x)$.

У зв'язку з цим при керуванні шириною від ЕОМ використовується метод «проб і помилок», представлений схемою алгоритму (рис. 2). Після введення завдання 2 на розчин валків $s_e(x)$ вертикальної кліті наступним кроком є розрахунок 3 ширини підкату $B_e(x)$ на виході з цієї кліті, а також розрахунок 4 ширини $B_H(x)$ на виході з горизонтальної кліті. Якщо $\Delta B_H = (B_H(x) - B_{H.3AD})$ не дорівнює нулю, вводиться корекція 5 розчину $s_e(x)$ і розрахунок повторюється для кожної точки x поточного положення підкату 6. Якщо цей розрахунок виконати неможливо, передбачається повторний розрахунок 7. Останнім кроком 8 є вибір «шаблону управління» шириною кінців підкату. Шаблон характеризує розраховані прирости розчину валків на «голові» Δs_T і на «хвості» Δs_B щодо ширини в середній частині по довжині підкату.

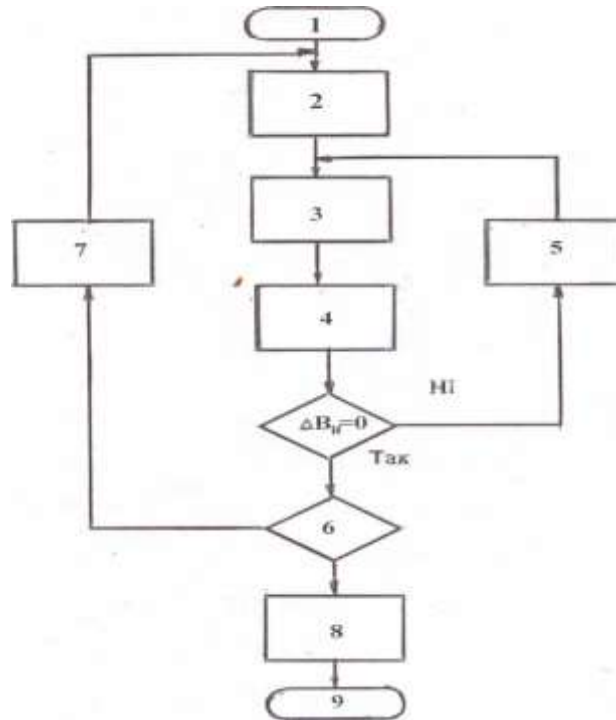


Рисунок 2 – Структурна схема алгоритму при керуванні шириною підкату

6. Висновки

У статті наведено математичні моделі зміни ширини в середній частині по довжині підкату та моделі зміни ширини на «голові» і «хвості» підкату. Описано метод визначення розчину валків, що реалізує такий закон зміни розчину вертикальних валків, який усуває відхилення ширини підкату від вихідної (до прокатки) величини.

Перевірка розроблених математичних моделей в умовах технологічного процесу в ЧГК стану 560 показала їхню здатність забезпечити вирішення задачі керування шириною листа в реальному масштабі часу.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Грабовский Г.Г. ИАСУ толстолистовыми прокатными станами. К.: Техніка, 2001. 448 с.
2. Ієвлєв М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
3. Ієвлєв Н.Г. Анализ требований к точности математических моделей параметров прокатки для АСУ ТП толстолистовых станов. *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 56–68.
4. Ієвлєв Н.Г., Полещук В.В., Полещук Н.П. Математические модели уширения и задача управления шириной листа в АСУ ТП. *Вопросы комплексной автоматизации технологических процессов прокатного производства*: сб. науч. тр. К.: КИА, 1988. С. 69–72.
5. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970. 359 с.
6. Чижиков Ю.М. Теория подобия и моделирования процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1970. 295 с.

Стаття надійшла до редакції 01.03.2023