

5. *Оппенгейм А.В.* Цифровая обработка сигналов / *А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер.* – М. : Техносфера, 2006. – 856 с.

6. *Суровцев И.В.* Моделирование дифференциальных хронопотенциограмм суммой нормальных распределений / *И.В. Суровцев, А.Э. Татаринцев, С.К. Галимов* // Управляющие системы и машины. – 2009. – № 5. – С. 40–45.

7. *Шелевицкий И.В.* Сплайны в цифровой обработке данных и сигналов / *И.В. Шелевицкий, М.О. Шутко, В.М. Шутко, О.О. Колганова.* – Кривий Ріг: Видавничий дім. – 2008. – 232 с.

8. *Васильев В.Н.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам / *В.Н. Васильев, И.П. Гуров* // – СПб. : БХВ – Санкт-Петербург, 1998. – 240 с.

9. *Задирака В.К.* Цифровая обработка сигналов / *В.К. Задирака, С.С. Мельникова* – К. : Наук. думка, 1993. – 294 с.

10. Спосіб гістограмної цифрової фільтрації хронопотенціометричних даних: пат. 96367 Україна: МПК G01N 27/48 / *И.В. Суровцев, В.М. Галимова, О.В. Бабак*; Опубл. 25.10.2011. – Бюл. № 20.

11. *Суровцев И.В.* Преобразование структуры данных при определении концентрации методом инверсионной хронопотенциометрии / *И.В. Суровцев* // Кибернетика и вычислительная техника. – 2015. – № 180. – С. 4–14.

12. Пристрій для вимірювання концентрації токсичних елементів: пат. 107412 Україна: МПК G01N 27/48 / *И.В. Суровцев, С.К. Галимов, І.А. Мартинов, О.В. Бабак, В.М. Галимова*; Опубл. 25.12.2014. – Бюл. № 24.

13. Система поєсового зважування на платформних вагах: пат. 106013 Україна: МПК G01G 19/02 / *И.В. Суровцев, О.В. Бабак, О.Е. Татаринцев, Ю.А. Крижановський*; Опубл. 10.07.2014. – Бюл. 13.

УДК 658.52.011.56:621.771.23-413

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПЛОЩИННОСТІ ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ



**М.Г. Ієвлєв,**  
канд. техн. наук,  
**Г.Г. Грабовський,**  
докт. техн. наук

**Актуальність проблеми.** Підвищення вимог до точності розмірів і форми гарячекатаних смуг і листів продиктовано тим, що збільшується частка продукції таких галузей промисловості, як машинобудування, виготовлення будматеріалів і труб, котра проводиться на автоматичних потокових лініях. Нормальне функціонування таких ліній залежить не тільки від точності товщини, а й ширини і площинності металу, який поставляється. Таким чином, одним із найважливіших якісних показників прокату є площинність готових листів.

**Мета роботи** – дослідження математичного опису формоутворення товстого листа в просторі щодо автоматизованої системи керування технологічним процесом товстолистого стану (АСКТП ТЛС).

**Виклад основного матеріалу.** Механізм виникнення неплщинності прокату, як відомо, пояснюється нерівномірністю його витяжок у різних поздовжніх перерізах по ширині смуги, що призводить до появи додаткових напружень. У зонах підвищених обтискань виникають напруження стиснення, а в менш обтиснутих частинах смуги – напруження розтягнення. При цьому є два нейтральних перерізи по ширині смуги, в яких немає додаткових напружень і які знаходяться приблизно на відстані  $B/4$  від осі смуги, де  $B$  – ширина смуги. Величина стискаючих додаткових напружень пропорційна різниці відносних поперечних різнотовщинностей до і після пропуску:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{C_i}{h_i}, \quad (1)$$

де  $C_{i-1}$ ,  $h_{i-1}$ ,  $C_i$ ,  $h_i$  – відповідно поперечні різнотовщинності й товщини прокату до  $i$ -го пропуску та після нього;  $\sigma_{\text{доп}}$  – додаткові напруження [1; 2].

Якщо ці додаткові напруження перевищують деяку критичну величину, то відбувається короблення листа. При цьому напруження істотно зменшуються або зникають зовсім.

Область отримання плоского листа зі зниженням товщини прокату зменшується. Вона обумовлена наявністю в системі стану пружних деформацій. Її можна наближено описати такою нерівністю [1; 2]:

$$-80\left(\frac{h_i}{B}\right)^2 < \left(\frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{C_i}{h_i}\right) < 40\left(\frac{h_i}{B}\right)^2. \quad (2)$$

Виключення згаданої нерівномірності витяжок при автоматичній прокатці знімає питання про короблення листів. Однак такий принцип управління, як правило, не використовується через неприйнятне подовження циклу прокатки.

Таким чином, для побудови алгоритмів автоматичного управління режимами прокатки товстих листів із урахуванням заданих допусків щодо площинності необхідно мати математичний опис процесу короблення листів, а саме:

– умов виникнення короблення, тобто моделей фактичних  $\sigma = f(C, h, B, \text{марка сталі}, t)$  і допустимих додаткових напружень  $\sigma_{\text{доп}} = f(h, B, \text{марка сталі}, t)$ , де  $h, B$  і  $C$  – відповідно товщина, ширина і поперечна різнотовщинність смуг,  $t$  – температура;

– параметрів короблення – амплітуди  $A$ , довжини півперіоду хвилі  $L$ , числа півхвиль на смузі  $m$ , форми хвилі, ширини ділянки короблення і зміни їх у процесі прокатки (через зміни форми та параметрів поперечного перерізу смуги) і подальшої правки.

У літературі процес короблення товстих листів освітлено недостатньо. Теоретичні висновки не підтверджуються достовірними експериментальними даними, отриманими у промислових умовах [1; 2].

Відповідно до викладеного для вирішення поставленого завдання і установлення застосовності (можливо з коригуванням) емпіричних, а також теоретичних залежностей при описі процесу короблення фахівці Київського інституту автоматики за провідної участі авторів протягом низки років проводили теоретичні та експериментальні дослідження, зокрема експерименти на товстолистових станах (ТЛС) 2250, 3600, 2300.

Так, дослідження на ТЛС 2250 охоплювали процес прокатки більше 130 листів різних геометричних розмірів і марок сталі. У процесі досліджень фіксувалися такі параметри: зусилля прокатки ( $P$ ) і розчини валків ( $H$ ) по пропусках (за відповідними датчиками), номер пропуску ( $j$ ), в якому починалося короблення, вид короблення (по краю або середині) й кількість півхвиль ( $m$ ) на смузі в різних пропусках (візуально), товщина і ширина смуги в низці пропусків (по вимірах вальцювальника), профіль ненавантажених валків ( $C^*$ ) (прокаткою алюмінієвих прутків), початкові розміри сляба, товщина перед чистою кліткою і кінцеві розміри листа (по змінному завданню). У пропусках, де смуга була неплоскою, виконувалося її фотографування збоку і зверху. Після закінчення прокатки на ножицях поперечного різання від смуги відрізалися зразки, товщина яких у різних точках вимірювалась мікрометром.

По розчину валків, зусиллю прокатки і профілю ненавантажених валків із використанням відомих модулів кліти та валкової системи були розраховані товщини смуг і поперечні різнотовщинності після кожного пропуску.

Умови виникнення короблення встановлювалися за параметрами прокату та процесу прокатки, відповідним факту появи хвилястості смуги. Насамперед, була визначена верхня межа області згаданих параметрів  $h^*$ , в рамках якої короблення спостерігається (для характерних представників усього сортаменту стана 2250 на смугах товщиною понад 15 мм короблення відсутнє). Очевидно, існування

певних  $h^*$  для інших об'єктів обумовлює доцільність ведення управління площинністю при товщині  $h < h^*$ . Якщо ширина листів  $B$ , що прокатуються на стані, змінюється в широкому діапазоні, то доцільно визначення  $h^* = h^*(B)$ .

Для управління площинністю або прогнозування короблення рекомендується залежність (2). Невиконання лівої нерівності призводить до короблення країв листа, а невиконання правої – до короблення середини.

Коефіцієнти  $K_K = -80$  і  $K_C = 40$  були отримані в лабораторних умовах [3]. Значення цих коефіцієнтів, розраховані за отриманими на стані 2250 експериментальними даними, майже збігаються з наведеними. Таким чином, вираз (2) із уточненими за експериментальними даними коефіцієнтами  $K_K$  і  $K_C$  можна застосовувати для визначення умов короблення в алгоритмах управління прокаткою.

При описі параметрів короблення в теорії стійкості пластин, а також у низці робіт із площинності тонких листів, прийнято, що хвиля має форму, близьку до синусоїдальної, і описується функцією

$$y = A \sin \frac{\pi}{L} l, \quad (3)$$

де  $A$  – амплітуда хвилі;  $l$  і  $L$  – відповідно точна координата і довжина півперіоду хвилі.

Порівняння експериментальної ламаної форми короблення, одержаної за масштабними фотографіями неплоских листів, з теоретичною (синусоїдальною) характеризується максимальними відхиленнями не більше 7 % від вимірюваної величини, що підтверджує доцільність подання форми хвилі у вигляді синусоїди. Нерівномірність витяжок по ширині визначається співвідношенням довжин прокату по його краю або середині й у нейтральному перерізі, де немає додаткових напружень, викликаних цією нерівномірністю. Відповідно при управлінні площинністю не-

обхідно мати математичний опис поперечного профілю смуги, який дозволить розрахувати товщину прокату в нейтральному перерізі, що знаходиться на відстані  $B/4$  від вертикальної осі поперечного перерізу.

Поперечний профіль смуги в [3] описується квадратичною параболою виду

$$h_x = h + C - \frac{4C}{B^2} x^2, \quad (4)$$

де  $x$  – відстань від вертикальної осі поперечного перерізу смуги;  $h$  – товщина краю листа;  $C$  – поперечна різнотовщинність (різниця товщин середини і краю листа), або, переходячи від товщини до різнотовщинності,

$$C_x = C - \frac{4C}{B^2} x^2, \quad (5)$$

де  $C_x$  – різниця товщин у перерізі  $x$  і краю листа.

При цьому початковий профіль валків – циліндричний, а профіль міжвалкового зазора у процесі прокатки при рівномірному зносі валків визначається накладенням двох парабол: теплового профілю і прогину валків від зусилля прокатки [4]. Для підтвердження застосовності (4), (5) насамперед експериментально встановлено наявність на даному об'єкті описаних вище умов. Була проведена ідентифікація експериментальної ламаної поперечного профілю (визначався за вимірами зразків і виразів (4), (5)), яка проводилася порівнянням вимірних і розрахункових значень  $C_x$ . У результаті статистичної обробки відхилень експериментальних даних від розрахункових для різних поздовжніх перерізів встановлено, що похибки розрахунків по (4), (5) характеризуються середньою помилкою 0,01 мм і середнім квадратичним відхиленням не більше 0,02 мм.

Похибка визначення товщини в нейтральному перерізі за формулою (4) визначається

при автоматичному управлінні прокаткою листа з урахуванням площинності похибкими прогнозування (реалізації) товщини краю листа і поперечної різнотовщинності, а також похибкою власне математичної моделі поперечного профілю (5). З урахуванням відстані від вертикальної осі поперечного перерізу смуги до її нейтрального перерізу, рівному  $x = B / 4$ , середня квадратична похибка визначення товщини в нейтральному перерізі без урахування систематичної похибки моделі (5) становитиме:

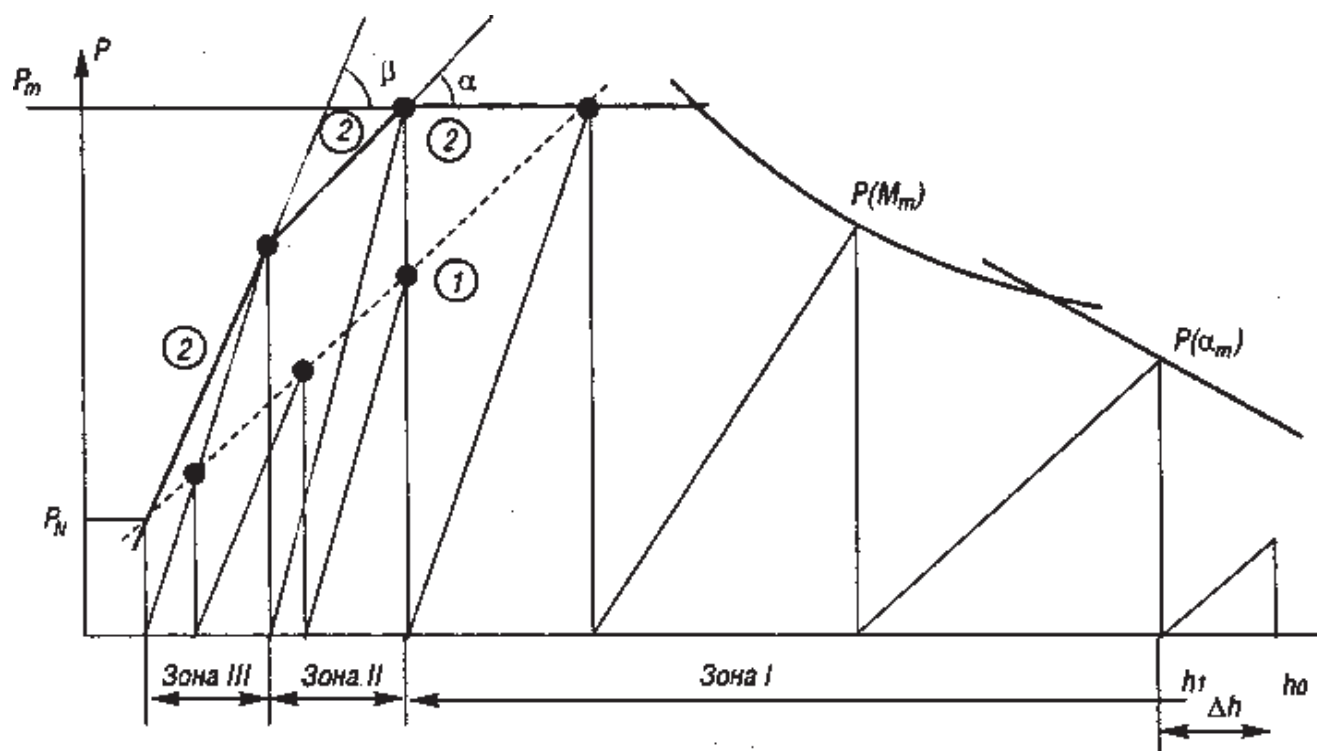
$$\sigma_{\text{нн}} = (\sigma_h^2 + \sigma_{\text{расч}}^2 + (0,75\sigma_c)^2)^{1/2}, \quad (6)$$

де  $\sigma_h$  і  $\sigma_c$  – відповідно середні квадратичні відхилення прогнозування (реалізації) товщини по краю і поперечної різнотовщинності, які у свою чергу визначаються точністю прогнозування зусилля прокатки і модулів розтягування кліті та валкової системи;

$\sigma_{\text{расч}}$  – середнє квадратичне відхилення розрахунку  $C_x$  за моделлю (5), яке визначено вище за експериментальними даними.

Розрахунки для стана 2250 показують, що обчислення похибки  $\sigma_{\text{нн}}$  без урахування  $\sigma_{\text{расч}}$  змінює результат менш ніж на 1 %. Ще менше впливає на похибку визначення товщини в нейтральному перерізі систематична похибка моделі (5). Таким чином, зазначеними похибками моделі (5) можна знехтувати, а формули (4), (5) доцільно використовувати для опису поперечного профілю смуги при автоматичному управлінні площинністю листа.

На ТЛС, як правило, використовуються стратегії управління площинністю листа з утворенням хвилі у проміжних пропусках і з наступним зменшенням її в останньому пропуску до допустимих меж. На рисунку показана ця технологія графіками залежності зусиль прокатки  $P(h)$  від товщини листа  $h$ , що прокатується.



Графіки режиму прокатки з управлінням формою листа, де  $P$  – зусилля прокатки;  $P_m$  і  $P_N$  – максимальне та кінцеве зусилля прокатки;  $P(M_m)$  – зусилля, відповідне максимальному моменту прокатки;  $P(\alpha_m)$  – зусилля, відповідне допустимому куту захвату;  $h$ ,  $h_0$ ,  $h_1$  – товщина поточна, вхідна і вихідна у пропуску; 1, 2 –  $P(h)$  ідеальна і гранично допустима для заданої форми листа;  $\alpha$  і  $\beta$  – кути нахилу;  $\Delta$  – обтискання

Ламана 1 відповідає ідеальному варіанту прокатки, коли площинність смуги не порушується в усіх пропусках, але при цьому необхідне підвищене число пропусків; ламана 2 в зоні I призводить до утворення бічних хвиль на листі; в зонах II і III ці хвилі поступово зводяться до мінімуму. Зонам II і III зазвичай відповідають 2–3 останніх пропуски при товщині готового листа менше 15–20 мм. Дві зони забезпечують більш плавний перехід від великих до малих зусиль і полегшують підстроювання системи до мінливих технологічних вимог.

У [2] наведена умова, дотримання якої забезпечує одержання після прокатки смуги з неплщинністю, допустимою за умовами правки. Ця умова записується так:

$$1,33 \left( \frac{1 + 0,75 \frac{C_N}{h_N}}{\sqrt{1 + \left( \frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2}} - 1 \right) \leq \frac{C_{j-1}}{h_{j-1}} \leq \frac{\left( \sqrt{1 + \left( \frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} - 0,75 \right) \frac{C_N}{h_N} + \sqrt{1 + \left( \frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} - 1}{0,75 \left( 1 - \sqrt{1 + \left( \frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} \right) \frac{C_N}{h_N} - 0,75 \sqrt{1 + \left( \frac{L_N}{\pi \gamma h_N} \right)^2} + 1}, (7)$$

де  $j - 1$  – індекс пропуску, що передє коробленню смуги;  $L$  – довжина півперіоду хвилі на покоробленій смугі;  $\gamma$  – коефіцієнт, який залежить від можливостей правильної машини;  $C_N$ ,  $h_N$  – задані значення поперечної різнотовщинності та товщини смуги після прокатки;  $N$  – індекс останнього пропуску циклу прокатки. При виведенні умови (7) приймалося, що хвиля має форму синусоїди і описується виразом (3), а поперечний профіль – виразом (4).

Вираз  $C_{j-1}/h_{j-1}$ , а також ліва і права частини нерівності (7) мають випадкові складові,

що визначаються похибками прогнозування (реалізації) параметрів, які входять до них. У зв'язку з цим необхідно ввести відповідні зміщення для лівої і правої частин нерівності (7) з метою забезпечення фактичного дотримання умов прокатки площинного листа. Для використання умови (7) необхідно визначення довжини півперіоду хвилі після закінчення прокатки. Відповідно до теорії стійкості пластин [1] довжина півперіоду хвилі в момент втрати стійкості становитиме:

для випадку короблення смуг по краю

$$L = 0,82b \sqrt[4]{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_K}{\varphi_c}} = 0,41B \sqrt[4]{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_K}{\varphi_c}}, (8)$$

для випадку короблення по середині ширини смуги

$$L = 0,7b \sqrt[4]{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_K}{\varphi_c}} = 0,35B \sqrt[4]{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_K}{\varphi_c}}, (9)$$

де  $b$  – ширина неплщинної ділянки смуги (ширина двох покороблених крайових ділянок), яка складає згідно з [3] половину ширини смуги;  $\varphi_K = \frac{E_K}{E}$ ,  $\varphi_c = \frac{E_c}{E}$ ,  $E_K$  – дотичний модуль,  $E_c$  – січний модуль,  $E$  – модуль пружності.

Оскільки згідно з [1] величина  $\psi = \sqrt[4]{0,25 + 0,75 \frac{\varphi_K}{\varphi_c}}$  змінюється в межах від 1 до 0,75 ( $\varphi = 1$  у разі втрати стійкості в межах пружності), то для випадку короблення смуг по краю, який спостерігався у процесі досліджень,

$$\frac{L}{B} = 0,29 \div 0,41. (10)$$

Слід зазначити, що довжина хвилі, яка утворилася на початку короблення, може збільшуватися з витяжкою смуги з одного боку і зменшуватися при збільшенні числа хвиль у зв'язку з виникненням закритичної деформації [1]. При експерименті спостерігалося або постійне після первинного короблення число хвиль, або це число подвоювалося. Сьогодні явище закритичної деформації смуг, особливо за межами пружності, вивчено недостатньо. Існуючі теоретичні методи розрахунку числа півхвиль після закритичної деформації громіздкі й дають значні розбіжності в результатах. Тому доцільно застосовувати експериментальні дані про збільшення числа півхвиль після закритичної деформації, одержаних на об'єкті, де ці дані будуть використані, або на аналогічному об'єкті.

З урахуванням сказаного, в залежності (7) доцільно використовувати замість  $L_N$  мінімальну довжину півхвилі в останньому пропуску  $L_{N \min}$  для певного об'єкта і конкретного сортаменту. Отже, експериментального підтвердження вимагало мінімальне значення коефіцієнта  $\left(\frac{L}{B}\right)_{\min} = 0,29$ .

Обробка експериментальних даних, отриманих шляхом вимірювання масштабних фотографій неплоских смуг (64 смуги з низьковуглецевих, середньовуглецевих і низьколегованих марок сталі) з надійною ймовірністю 0,997, показала, що нижнє значення згаданого коефіцієнта  $\left(\frac{L}{B}\right)_{\min}^{\text{експ}} = 0,27$ .

Таким чином,  $L_{N \min}$  доцільно обчислювати за формулою

$$L_{N \min} = \frac{L_{\min} \lambda_{\Sigma}}{K n_{\Sigma}}, \quad (11)$$

де  $L_{\min}$  – мінімальна довжина півхвилі в момент короблення, яка визначається за формулою  $L_{\min} = B \left(\frac{L}{B}\right)_{\min}^{\text{експ}}$ ;  $\lambda_{\Sigma}$  – сумарна

витяжка смуги у пропусках, наступних за коробленням;  $K$  – максимальна кратність зміни числа півхвиль у пропусках після виникнення короблення;  $n_{\Sigma}$  – число пропусків, в яких змінювалася кількість півхвиль.

Максимальна кратність зміни числа півхвиль (попередньо прийнята рівною 2) вимагає додаткового експериментального уточнення.

Таким чином, відповідно до отриманої залежності (7) процес автоматичного управління прокаткою із забезпеченням площинності листа складається з таких етапів (див. рисунок):

- прокатка без урахування умов площинності (умови (7)) при товщинах прокату, що перевищують  $h^*$ ;

- дотримання умови (7) у пропуску, що передусє викривленню;

- прокатка без урахування умови (7) після встановлення факту короблення прокату із забезпеченням в останньому пропуску заданої поперечної різновтовщинності  $C_N$  (за відсутності інформації про виникнення короблення умова (7) дотримується до кінця прокатки).

Реалізація описаного вище алгоритму автоматичного управління прокаткою листів із урахуванням вимог до їх площинності забезпечується шляхом введення відповідних обмежень при виборі обтискань у пропусках або за допомогою противигину валків. У роботах [5; 6] показаний якісний вплив на площинність прокату ефекту швидкісної асиметрії, що полягає у зниженні зусилля прокатки зі зміною швидкостей одного валка щодо іншого.

З метою визначення енергосилових параметрів у процесі асиметричної прокатки на ТЛС 3600 металургійного комбінату «Азовсталь» були проведені експериментальні дослідження. У процесі прокатки металу в чистовій клітї кварто фіксувалися такі параметри: температура і товщина прокату, моменти на нижньому і верхньому валках, зусилля прокатки, швидкість і струм якоря двигунів верхнього і

нижнього валків. Крім того, на принтері керуючого обчислювального комплексу, встановленому на стані, реєструвалися прокатуваний сортамент, розчин валків, середнє за пропуск зусилля прокатки. В останніх пропусках прокатки подавався сигнал на неузгодженість моментів верхнього і нижнього валків.

Результати досліджень показали роль швидкісної асиметрії в досліджуваному діапазоні сортаменту, що підлягав прокатуванню, за марками сталі й типорозмірами. При неузгодженості швидкостей верхнього і нижнього валків у середньому на 4,7 % зусилля прокатки знизилося на 100 т, що становить 5–7 % від загального зусилля прокатки. Проведені за результатами досліджень розрахунки показали також зниження сумарного моменту прокатки на 14 ТМ, що становить 17,5% загального моменту з урахуванням повернення електроенергії в мережу (один із валків працював у генераторному режимі і момент у нього був від'ємний). У період проведення досліджень на ділянках листа, що прокатувались із неузгодженістю швидкостей, неодноразово спостерігалися зменшення та усунення хвилястості. Проведено аналіз причин зменшення хвилястості за відомими критеріям.

Для визначення зміни величини прогину валків  $C_j, C_{j-1}$  (поперечних різновтовщинностей прокату) за рахунок зміни зусилля прокатки при неузгодженості швидкостей використовувалися методика фірми-продавця обладнання та фактичні дані про зміни зусилля прокатки по осцилограмах, після чого перевірялося виконання критерію (2). Результати розрахунку показали, що зміна стріли прогину валкової системи за рахунок подачі неузгодженості швидкостей валків не може чинити такого впливу на форму листа, який призвів би до усунення хвилястості.

У [5] проведено теоретичний аналіз силової взаємодії листа і валків при асиметричній прокатці. Встановлено, що при асиметричній

прокатці відбувається процес правки листа знаковмінним вигином із розтягуванням. У результаті такої правки з'являється подовження окремих ділянок листа. Мірою правки при такому процесі є рівність довжин подовжених ділянок листа, в яких немає дефектів площинності, довжинам ділянок листа, на яких спостерігається короблення

$$L_{N\max}^K = L'_N + \Delta L_N^A, \quad (12)$$

де  $L_{N\max}^K$  – максимальна довжина листа покоробленої ділянки в останньому  $N$ -му пропуску;  $L'_N$  – довжина ділянки листа, що не має короблення;  $\Delta L_N^A$  – приріст довжини ділянки листа, що не має короблення, при веденні процесу з використанням асиметрії.

Загальне відносне подовження листа  $\varepsilon^A$ , відповідне параметру  $\Delta L_N^A$ , визначається як сума подовжень під дією додаткового розтягування  $\varepsilon_{A\tau^*}$  і згинальних моментів  $\varepsilon_M, \varepsilon'_M$ , що виникають під дією асиметричної прокатки. Автоматичне управління прокаткою повинно забезпечувати отримання листа з площинністю, що задовольняє ДСТ, згідно з яким площинність оцінюється стрілою прогину поверхні листа на довжині 1 м.

Відхилення поверхні листа від площини на довжині 1 м визначається за формулою [2]:

$$A^* = A \left\{ 1 + \sin \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{L} \left( \frac{2L-1}{2} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

при  $L > 0,5$  м,

$$\text{або } A^* = 2A$$

при  $L \leq 0,5$  м.

Отже, допустима амплітуда хвилі по краю або середині листа після прокатки складе

$$A \leq \frac{A_{\text{доп}}^*}{1 + \sin \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{L} \left( \frac{2L-1}{2} \right) \right]} \quad (14)$$

при  $L > 0,5$  м та

$$A \leq \frac{A_{\text{доп}}^*}{2} \quad (15)$$

при  $L \leq 0,5$  м, де  $A_{\text{доп}}^*$  – допустиме по ДСТ відхилення поверхні листа від площини на довжині 1 м.

У [5] показано виведення умови одержання після прокатки з використанням швидкісної асиметрії листа, що задовольняє по площинності вимоги ДСТ. Ця умова представляється нерівністю

$$1,33 \left( \frac{1 + 0,75 \frac{C_N}{h_N}}{\sqrt{(1 + \varepsilon^A)^2 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2}} - 1 \right) \leq \frac{C_{j-1}}{h_{j-1}} \leq \frac{\left( \sqrt{(1 + \varepsilon^A)^2 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} - 0,75 \right) \frac{C_N}{h_N} + \sqrt{(1 + \varepsilon^A)^2 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} - 1}{0,75 \left( 1 - \sqrt{(1 + \varepsilon^A)^2 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} \right) \frac{C_N}{h_N} - 0,75 \sqrt{(1 + \varepsilon^A)^2 + (A_{\text{доп}}^* \pi)^2} + 1} \quad (16)$$

При виведенні умови (16) приймалося до уваги, що хвиля має форму синусоїди і описується виразом (3), а поперечний профіль – виразом (5). Процес автоматичного управління прокаткою із забезпеченням площинності листа при використанні умови (16) аналогічний описаному вище для умови (7) з урахуванням того, що останній пропуск циклу прокатки виконується з неузгодженістю швидкостей верхнього і нижнього валків (швидкісною асиметрією). При виборі обтискання в останньому пропуску, який визначає зусилля прокатки і відповідно параметр  $C_N$ , враховується ефект зниження зусилля прокатки за рахунок швидкісної асиметрії.

Управління профілем і формою листа  $\varepsilon$ , таким чином, комплексною проблемою, для розв'язання якої використовуються як засоби автоматичного контролю і регулювання технологічних параметрів, так і різні виконавчі органи, якими оснащується прокатний стан [2; 7]. За наявності таких органів задача АСКТП полягає в реалізації відповідних впливів

на величину і форму розчину навантажених валків стану. На ТЛС для отримання плоского листа в АСКТП при прокатці особливо тонких (5–7 мм) і широких (> 3 м) листів не завжди вдається обмежитися тільки автоматичним управлінням профілем і формою листа. Доводиться передбачати втручання оператора, який візуально оцінює появу хвилястості листа і вносить корекцію в роботу автоматики.

Взаємодія автоматизованої системи керування прокаткою і оператора організовано таким чином. Перед початком прокатки на екрані дисплея оператора відображається обрана стратегія управління і передбачувані результати управління. З урахуванням досвіду, а також додаткової інформації про процес прокатки оператор може коригувати початкову стратегію (наприклад, величину  $h^*$ , значення  $C_N$  та ін.). Він може вводити в систему оцінки тих параметрів, стан яких не вимірюється автоматизованими засобами (наприклад, поява або зникнення хвилі по краях або по центру смуги). Розрахунок і реалізація управлінь проводиться автоматично, але у процесі управління оператор може робити корекцію управлінь, розрахованих системою. Якщо ці корективи не призвели до погіршення якості прокату, вони враховуються системою при автоматичному управлінні прокаткою наступних заготовок того самого сортаменту.

### Висновки

Досліджено питання забезпечення умов прокатки площинного листа. Проведено теоретичний аналіз та ідентифікацію за експериментальними даними математичних моделей, що описують параметри короблення листа (форму і довжину хвилі, поперечний профіль смуги) та умови виникнення короблення, наведені в роботах по прокатці з натяганням або з теорії стійкості пластин. Встановлено застосовність (у деяких випадках з коригуванням) цих моделей для умов прокатки товстого листа. Отримані результати можуть бути використані в АСКТП ТЛС.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Архангельский В.И.* Математическое описание формообразования толстого листа в алгоритмах автоматического управления прокаткой / *Архангельский В.И., Твардовский В.П., Иевлев Н.Г.* [и др.] // *Технология легких сплавов: Научно-технический бюллетень.* – М. : Всесоюзный институт легких сплавов. – 1981. – № 4. – С. 65–69.
2. *Иевлев М.Г.* Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів / *М.Г. Ієвлев, Г.Г. Грабовський.* – К. : Техніка, 2001. – 248 с.
3. *Shohet K.N.* Flatness control in plate rolling / *K.N. Shohet, N.A. Townsend* // *Journal of the Iron and Steel Institute.* – 1971. – № 10. – P. 769–775.
4. *Кухта Ю.Б.* Совершенствование процесса формирования поперечного профиля и плоскостности горячекатаных полос на основе моделирования работы

валковой системы «кварто»: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2009.

5. *Грабовский Г.Г.* Анализ влияния скоростной асимметрии на плоскостность листового проката применительно к АСУ ТП / *Г.Г. Грабовский, Н.Г. Иевлев.* – Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения. – М. : 1985, № 3030. – 24 с.

6. *Бельский С.М.* Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. – Москва, 2009.

7. *Салганик В.М.* Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы / *В.М. Салганик, П.П. Полецков, Ю.Б. Кухта, Л.Г. Егорова* // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2010. – № 1. – С. 59–64.

УДК 621.9 (621.1-1-681.2)

## СИСТЕМНИЙ СИНТЕЗ СУПЕРПРЕЦИЗІЙНОЇ ЛІНІЙНОЇ НАПРЯМНОЇ



**В.О. Тарасов**, *докт. техн. наук,*  
**Т.М. Назаренко**,  
**Л.О. Злочевська**

Упровадження сучасних, високих, науковомістких технологій вимагає постійного підвищення точнісних характеристик верстатів, які не повинні змінюватися під впливом динамічного навантаження та при тривалій експлуатації. Проблему точнісних характеристик можна розв'язати в різний спосіб: за рахунок жорсткої стабілізації радіального і осевого положення осі шпindelної опори; стабілізації положення рухомого елемента лінійної напрямної щодо нерухомої у просторі площини; системою рівнянь, котрі забезпечують зворотний зв'язок між комп'ютером і пристроями інформаційного управління верстата. У цій статті будемо розглядати питання стабілізації положення рухомого елемента несучої плоскої

опори суперпрецизійної лінійної напрямної відносно нерухомої у просторі площини.

Суперпрецизійна лінійна напрямна [1; 2] призначена для конструювання верстатів, що забезпечують обробку точних елементів оптики й механіки, зокрема, при конструюванні верстатів для обробки плоских поверхонь із особливо високою точністю.

**Мета** – підвищити точність стабілізації положення рухомого елемента плоских опор суперпрецизійної лінійної напрямної при обробці плоских поверхонь.

**Викладення основного матеріалу.** Для вирішення поставленої мети спочатку розглянемо *склад та елементи конструкції суперпрецизійної лінійної напрямної.*