

УДК 621.7 – 52

Сатонін О. В., Присяжний А. Г., Коренко М. Г., Коробко Т. Б.**МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТОВЩИНИ ХОЛОДНОКАТАНИХ
ШТАБ**

Одним із головних показників точності холоднокатаних штаб є їх поздовжня різнотовщинність, для зменшення якої використовується система автоматичного регулювання товщини (САРТ). САРТ сучасних безперервних і реверсивних станів холодної прокатки оснащені гідравлічними натискними пристроями (ГНП), які характеризуються високою точністю обробки та достатньою швидкістю [1, 2]. Розширення сортаменту холоднокатаних штаб і посилення вимог до точності їх розмірів обумовлюють необхідність до подальшого уточнення математичних моделей, що визначають режим роботи ГНП у складі САРТ [3]. Зазначені математичні моделі повинні забезпечити достовірний розрахунок розподілів по довжині штабу початкової товщини і сили прокатки, що впливають на коливання в процесі деформації міжвалкового зазору і, отже, на поздовжню різнотовщинність розкату після пропуску.

З метою уточнення даних про розподіл початкової товщини h_{0xj} по довжині штабу, що прокатується розроблена математична модель, що базується на рекомендаціях авторів роботи [3] про доцільність використання чисельного підходу.

При цьому, розділивши базову довжину розкату $L_{\bar{\sigma}}$ на кінцеву безліч m j -их ($j = 1..m$) елементарних довжин $\Delta L_{\bar{\sigma}} = L_{\bar{\sigma}} / m$ (рис. 1), визначення значень величини h_{0xj} проводили за формулою:

$$h_{0xj} = \bar{h}_0 + \delta h_{00} L_{xj} / L_{\bar{\sigma}} + \sum_{k=1}^{K_{kh_0}} \delta h_{0k} \sin(2\pi L_{xj} / L_{k_{h_0}}), \quad (1)$$

де \bar{h}_0 – номінальне значення початкової товщини; δh_{00} – низькочастотна складова початкової поздовжньої різнотовщинності штаби, що прокатується; $L_{xj} = \Delta L_{\bar{\sigma}}(j-1)$ – геометрична координата j -го поперечного перерізу штаби, що прокатується (рис. 1); δh_{0k} – високочастотні складові початкової поздовжньої різнотовщинності штаби, що прокатується (k – порядковий номер відрізка при розбитті базової довжини $L_{\bar{\sigma}}$ на кінцеву безліч K_{kh_0} окремих періодів протяжністю $L_{k_{h_0}}$).

Виконавши розрахунки за рівнянням (1), переходимо до визначення відповідної j -ої елементарній довжині (рис. 1) сили прокатки P_j , для чого скористалися регресійною математичною моделлю, яка дозволяє управляти роботою ГНП в режимі реального часу. При цьому, враховуючи нелінійний характер залежності інтегральних показників напружено-деформованого стану металу при холодній тонколистовій прокатці від впливу на них факторів, для регресійного математичного моделювання сили прокатки скористалися квадратичною математичною моделлю виду [3, 4]:

$$P_j = b_0 + \sum_{1 \leq n \leq k^*} b_n (x_n)_j + \sum_{1 \leq n \leq k^*} b_{nn} (x_n^2)_j + \sum_{1 \leq n \leq 1 \leq k^* (k^* - 1) / 2} b_{n1} (x_n x_1)_j \quad (2)$$

де $n, 1$ – порядковий номер фактору, причому $n < 1$; k^* – загальна кількість факторів; b_0, b_n, b_{nn}, b_{n1} – коефіцієнти регресії, що підлягають визначенню, загальна кількість яких дорівнює $(k^* + 1)(k^* + 2)/2$; x_n, x_1 – кодовані значення факторів (+, -, 0 та ін.), що визначаються як [4]:

$$x_{n(1)} = \left[x_{n(1)}^* - x_{n(1)}^* \right] / \Delta_{n(1)}, \tag{3}$$

де $x_{n(1)}^*$ – натуральні значення n -го (1-го) фактору, причому $x_{n(1)}^{\min} \leq x_{n(1)}^* \leq x_{n(1)}^{\max}$, $x_{n(1)}^{\min}$, $x_{n(1)}^{\max}$ – відповідно мінімально і максимально можливі натуральні значення n -го (1-го) фактору, що встановлюються по практичним даним); $x_{n(1)}^0$ – натуральні значення n -го (1-го) фактора на нульовому рівні, що задовольняє умовам сталого процесу прокатки; $\Delta_{n(1)}$ – інтервал варіювання n -го (1-го) фактора, що не перевищує згідно з рекомендаціями автора роботи [4] 10–25 % від $x_{n(1)}^{\max}$.

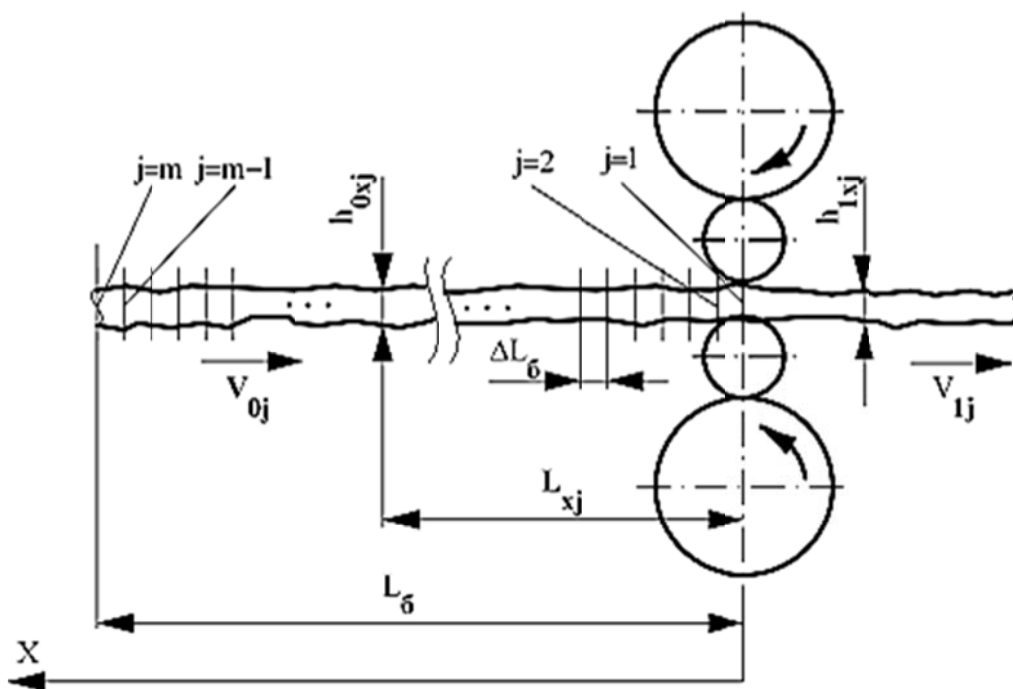


Рис. 1. Розрахункова схема V_{0j}, V_{1j} – відповідно швидкості штабу на вході у осередок деформації і виході з нього, що виникають при деформації j -ої елементарної довжини

Для побудови регресійної математичної моделі (2) скористалися рекомендаціями авторів роботи [3]. При цьому за певним планом, що складається з N дослідів, проводили чисельний експеримент, який полягав у виконанні розрахунків значень цільової функції в залежності від заданого в кожному u -том дослідженні ($1 \leq u \leq N$) набору можливих значень факторів, що на неї впливають (x_n або x_n^*). В якості цільової функції застосували чисельну математичну модель [5], яка дозволяє при визначенні значень сили прокатки найбільш повно врахувати реальний характер розподілів по довжині осередку деформації його геометричних параметрів, механічних властивостей деформованого матеріалу, а також умов зовнішнього

контактного тертя. За аналогією з авторами роботи [3] чисельний експеримент проводили по композиційному плану Хартлі [4], варіюючи в установлених межах значеннями таких факторів, як товщина штаби до і після прокатки (відповідно h_0 і h_1), а також сила переднього і заднього натягу розкату (відповідно T_0 і T_1). Безпосереднє визначення коефіцієнтів регресії здійснювали за результатами зазначеного чисельного експерименту на основі методу найменших квадратів і з урахуванням роботи [4].

Після розрахунку відповідно до формули (2) значень сили прокатки P_j переходили до визначення точності розмірів холоднокатаної штаби по товщині. При цьому, припускаючи спочатку повну обробку ГНП (коефіцієнт обробки ГНП $k_{ГНП} = 1$), кінцеву товщину штабу h_{1xj} (рис. 1) брали відповідно її номінального значення \bar{h}_1 , що не змінюється в процесі прокатки. При визначенні виникаючих у цьому випадку коливань значення міжвалкового зазору виходили з рівняння Головіна-Сімса у вигляді:

$$S_{0j} = \bar{h}_1 - P_j / G_{кл}, \quad (4)$$

де $G_{кл}$ – модуль жорсткості робочої кліти.

Формула (4) справедлива при $\bar{h}_1 > P_j / G_{кл}$. У випадках, коли $\bar{h}_1 \leq P_j / G_{кл}$, необхідне попереднє підтискання робочих валків один до одного, сила P^* якого дорівнює:

$$P^* = f_{п} G_{кл}, \quad (5)$$

де $f_{п} = \bar{P} / G_{кл} - \bar{h}_1$ – пружне сплющення робочих валків в місці їх контакту (\bar{P} – сила прокатки, розрахована за рівнянням (2) для значень факторів, які відповідають нульовому рівню).

Результати розрахунку за формулою (4) використовували для встановлення значень величини $\Delta S_{0jГНП}$, яка представляє собою необхідну для виконання рівності $h_{1xj} = \bar{h}_1 = const$ зміни положення робочих валків у вертикальній площині, що визначає технологічний режим роботи ГНП при прокатці:

$$\Delta S_{0jГНП} = S_{0j} - \bar{S}_0, \quad (6)$$

де \bar{S}_0 – міжвалковий зазор, визначений за виразом (4) для встановленого процесу деформації.

Рівняння (6) відповідає ідеальному випадку, коли похибка обробки ГНП відсутня і $k_{ГНП} = 1$. Тому для реальних умов, якщо $0 \leq k_{ГНП} \leq 1$, значення величин $\Delta S_{0jГНП}$ і S_{0j} коректували, використовуючи формули:

$$\Delta S_{0jГНП}^* = k_{ГНП} \Delta S_{0jГНП}; S_{0j}^* = S_{0j} + \Delta S_{0jГНП}^*, \quad (7)$$

де $\Delta S_{0jГНП}^*$ і S_{0j}^* – відповідно відкориговані значення величин $\Delta S_{0jГНП}$ і S_{0j} .

Враховуючи, що при $0 \leq k_{ГНП} \leq 1$ умова $h_{1xj} = \bar{h}_1 = const$ не виконувалась, переходили до отримання даних про розподіл кінцевої товщини h_{1xj} по довжині штаби, що прокатується, які й визначають подовжню різнотовщинність прокату і, отже, ефективність роботи ГНП у складі САРТ даного прокатного стану. Для визначення значень величини h_{1xj} відповідно до рекомендацій авторів роботи [3] скористалися рівнянням:

$$S_{0j}^* - h_{1xj} + P_j^* / G_{кл} = 0, \quad (8)$$

де P_j^* – розраховується за регресійної математичної моделі (2) сила прокатки j -ї ділянки розкату (рис. 1), яка, на відміну від значень величини P_j , відповідає умові $h_{1xj} \neq const$.

З виразу (8) ітераційно визначали кінцеву товщину $h_{1xj} \neq const$ металу, що прокатується, відповідно його j -й ділянці (рис. 1). При цьому, ітераційну процедуру рішення по аналогії з авторами роботи [3] здійснювали методом половинного ділення, використовуючи алгоритмічну послідовність виду:

$$h_{1xj \min(t+1)} = h_{1xj}; \quad h_{1xj \max(t+1)} = h_{1xj \max t} \text{ при } F_t > 0; \quad (9)$$

$$h_{1xj \min(t+1)} = h_{1xj \min t}; \quad h_{1xj \max(t+1)} = h_{1xj t} \text{ при } F_t < 0; \quad (10)$$

$$h_{1xj(t+1)} = [h_{1xj \min(t+1)} + h_{1xj \max(t+1)}] / 2 \quad (11)$$

де t – порядковий номер чергового циклу ітераційної процедури рішення;

$h_{1xj \min t}$, $h_{1xj \max t}$ – відповідно мінімальне і максимальне значення кінцевої товщини штаби, що прокатується в даному циклі ітераційної процедури вирішення;

$F_t = S_{0j}^* - h_{1xj} + P_{jt}^* / G_{кл}$ – допоміжна функція.

Маючи в своєму розпорядженні отриманими на основі виразів (1) – (11) даними про розподіл початкової h_{0xj} і кінцевої h_{1xj} товщини штаби, що прокатується переходили до розрахунку для кожної j -ої її ділянки (рис. 1) поздовжньої різнотовщинності до і після деформації в даній кліті (або в даному пропуску):

$$\delta h_{0xj} = h_{0xj} - h_{0cp}; \quad \delta h_{1xj} = h_{1xj} - h_{1cp}; \quad (12)$$

де середня товщина штаби до пропуску:

$$h_{0cp} = (1/m) \sum_{j=1}^{j=m} h_{0xj};$$

де середня товщина штаби після пропуску:

$$h_{1cp} = (1/m) \sum_{j=1}^{j=m} h_{1xj}.$$

Експериментальні дослідження поздовжньої різнотовщинності холоднокатаних штаб проведено стосовно до безперервного чотирьохклітьового стану 1 700 ПАТ «ММК ім. Ілліча». При цьому вимір поточних по довжині холоднокатаних штаб значень товщини проводили в цеху холодної прокатки за допомогою мікрометра, встановленого після четвертої робочої кліті. Отримані для штаб зі сталі 08кп перетином 0,9×1 275 мм і 0,6×1 020 мм результати статистичної обробки переставлено на рис. 2 у вигляді розрахункових і емпіричних гістограм (W), а також відповідних функцій розподілу (F) поздовжньої різнотовщинності холоднокатаних штаб зазначених розмірів.

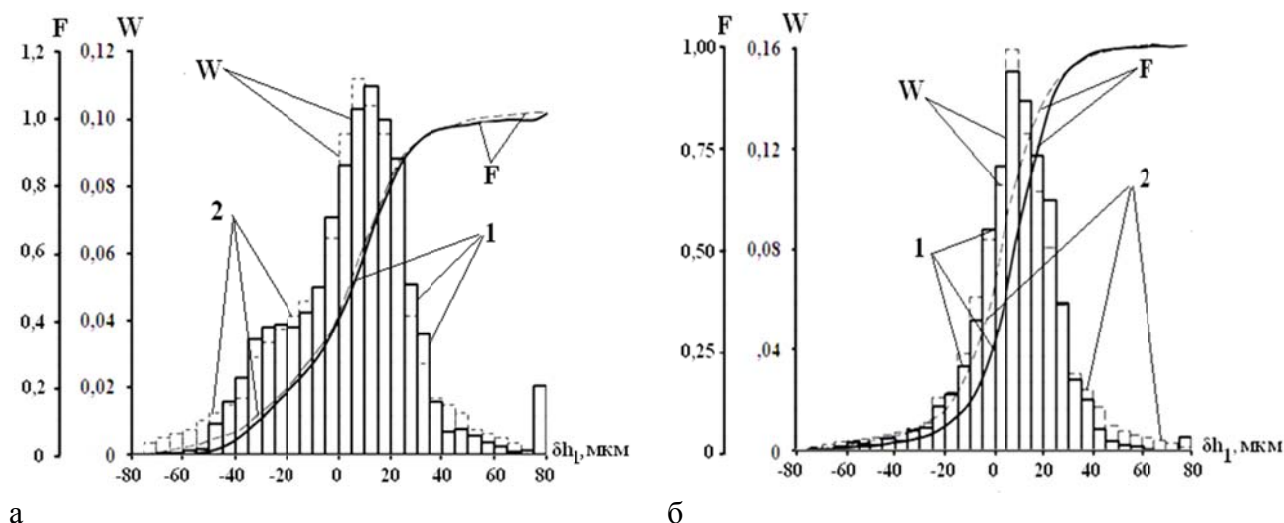


Рис. 2. Результати зіставлення гістограм та функцій розподілів емпіричних (1) і розрахункових (2) значень поздовжньої різновтовщинності δh_1 холоднокатаних штаб зі сталі 08кп: а – з перетином $0,9 \times 1275$ мм; б – з перетином $0,6 \times 1020$ мм (б)

Аналіз отриманих результатів підтвердив відповідність розподілу поздовжньої різновтовщинності холоднокатаних штаб нормальним законом, при цьому критеріальна оцінка ступеня відповідності розрахункових і емпіричних розподілів, виконана відповідно до критерію Смирнова і критерія Уїлкоксона [6] показала на приналежність обох вибірок однієї генеральної сукупності. Зазначене підтверджує достатній ступінь достовірності отриманих теоретичних рішень.

ВИСНОВКИ

Представлена математична модель може бути основою для вирішення задач, пов'язаних з аналізом, автоматизованим проектуванням і вдосконаленням технологічних режимів роботи та устаткування безперервних і реверсивних станів холодної прокатки, а також розробки алгоритму роботи систем автоматичного регулювання. Відмінною особливістю математичної моделі є можливість розрахунку сили прокатки з урахуванням реального розподілу по довжині осередку деформації його геометричних параметрів, механічних властивостей деформованого матеріалу і умов зовнішнього контактного тертя, а також прогнозування розподілу товщини по довжині штаб, що прокатують. Виконана стосовно до промислових умов оцінка достовірності розробленої математичної моделі підтвердила доцільність її використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов – М. : Теплотехник, 2008. – 669 с.
2. Гарбер Э. А. Производство проката: справочное издание. Том I. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование) / Э. А. Гарбер – М. : Теплотехник, 2007. – 368 с.
3. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос: монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с.
4. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента / В. Н. Ковшов – Киев-Донецк: Вища школа, 1982. – 120 с.
5. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния тонких полос при прокатке / А. В. Сатонин, С. С. Настоящая, В. А. Переходченко, А. Г. Присяжный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. : Машиностроение, материаловедение: сб. научн. трудов. Пермь : Из-во «ПНИПУ». 2012. – Том 14. – № 4. – С. 15–23.
6. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2015 р.