https://orcid.org/0000-0003-4657-9006
https://orcid.org/0000-0002-9364-9495
https://orcid.org/0000-0003-1190-0314

УДК 658.52.011.56:621.771.23-413

Г.Г. ГРАБОВСЬКИЙ[*], М.Г. ІЄВЛЄВ[**], С.Є. МОЙСЕЄНКО[**]

УПРАВЛІННЯ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЛИСТІВ НА ПРОКАТНИХ СТАНАХ

[*]ДНВК «Київський інститут автоматики», м. Київ, Україна
[**]Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. *Основне завдання прокатного виробництва полягає у забезпеченні необхідної якості прокату. До найважливіших параметрів відносяться площинність і профіль листів, що прокатуються. Управління профілем та площинністю смуги є комплексною проблемою, для вирішення якої використовуються як засоби автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів, так і різні виконавчі органи, якими оснащуються прокатні стани. В даний час на листопрокатних станах широко застосовуються гідравлічні натискні пристрої як елементи швидкодіючих систем автоматичного регулювання товщини смуги (САРТ), а також систем керування профілем та площинністю. Застосовуються також системи фігурних валків зі своїм осьовим зміщенням у протилежних напрямах. Застосування на листопрокатних станах описаних вище спеціальних органів і систем управління формою і площинністю листа, що прокатується, забезпечує відповідність цих параметрів заданим вимогам. У статті досліджені фактори, що впливають на площинність та профіль листів, а також описані спеціальні органи та системи управління формою і площинністю листів стосовно автоматизованих систем управління технологічними процесами листових станів. У САРТ на товстолистових станах (ТЛС) і широкосмугових станах гарячої прокатки як основний застосовується принцип підтримки сталості міжвалкового зазору. САРТ може будуватися за принципами відносного або абсолютного регулювання товщини смуги, які описані у статті. Пошуки достатньо універсального методу впливу на форму міжвалкового зазору призвели до створення системи фігурних валків з їх осьовим зміщенням у протилежних напрямах (безступінчасто регульований профіль валків). Така система забезпечує симетричну зміну профілю міжвалкового зазору, що легко пристосовується до будь-яких програм прокатки.*
Ключові слова: *форма та площинність листів, гідравлічні натискні пристрої, автоматичне регулювання товщини, системи фігурних валків, АСУ ТП.*

Abstract. *The main task of rolling production is to provide rolled products of sufficient quality. Among the primary parameters of metal sheets to be rolled there are their flatness and section. Managing the section and flatness of the strip is a complex problem, and for its solution, there are used not only the tools for automatic control and technical parameters adjustment but also various implementing bodies with which rolling mills are equipped. Nowadays, hydraulic pressure devices are widely used in sheet-rolling mills as elements of fast-acting systems of automatic strip thickness adjustment (SAST), as well as systems of section and flatness control. Systems of shaped rolls with their axial deflection in opposite directions are also applied. Using in the sheet-rolling mills the above-mentioned special bodies and systems of control of section and flatness of sheet to be rolled provides the compliance of these parameters with the specified requirements. The paper investigates the factors influencing section and flatness of sheets, as well as the described special bodies and systems of control of sheet section and flatness regarding the automated systems of managing technological processes of sheet-rolling mills. In SAST, on heavy-plate mills (HPM) and broadband mills for hot rolling, the principle of maintaining the constancy of the inter-roll gap is used as the main one. SAST can be built based on the principles of relative or absolute adjustment of the strip width described in the paper. The search for a universal enough method of influencing the inter-roll gap shape has led to the creation of a system of shaped rolls with their axial deflection in opposite direc-*

© Грабовський Г.Г., Ієвлєв М.Г., Мойсеєнко С.Є., 2022

ISSN 1028-9763. Математичні машини і системи. 2022. № 4

tions (continuously adjustable rolling section). Such a system provides a symmetrical change in the section of the inter-roll gap, which is easily adjusted to any rolling apps.
Keywords: *sheet shape and flatness, hydraulic pressure devices, automatic adjustment of thickness, system of shaped rolls, APCS.*

DOI: 10.34121/1028-9763-2022-4-75-84

1. Вступ

Підвищення вимог до точності розмірів та форми гарячекатаних смуг та листів продиктовано тим, що все більша частина продукції таких галузей промисловості, як машинобудування, виготовлення будматеріалів та труб, проводиться на автоматичних потокових лініях, нормальне функціонування яких залежить від дотримання вимог до точності профілю та площинності металу, що поставляється. Таким чином, найважливішими якісними показниками прокату є профіль та площинність готових листів.

Метою даної роботи є дослідження факторів, що впливають на площинність та профіль листів, а також опис спеціальних органів та систем управління формою та площинністю листів стосовно автоматизованих систем управління технологічними процесами листових станів.

2. Фактори, що впливають на площинність та профіль листа

При прокатуванні листів найважливішими параметрами є площинність (відсутність хвилястості) та профіль (сталість заданої різнотовщинності по ширині вздовж усієї довжини листа).

Механізм виникнення неплощинності прокату, як відомо, пояснюється нерівномірністю його витяжок у різних поздовжніх перерізах по ширині смуги, що призводить до появи додаткових напруг. У зонах підвищеного обтиснення виникають напруги стиснення, а в менш обтиснутих частинах смуги – напруги розтягування. Якщо згадані додаткові напруги перевищують деяку критичну величину, то відбувається короблення листа, при цьому напруги суттєво зменшуються або зникають зовсім.

У [1, 2] детально досліджено питання забезпечення умов прокатки площинного листа. Проведено теоретичний аналіз та ідентифікацію за експериментальними даними математичних моделей, що описують параметри деформації листа (форму та довжину хвилі, поперечний профіль смуги) та умови виникнення короблення, наведені у роботах із прокатки з натягом або з теорії стійкості пластин. Встановлено застосовність (у деяких випадках із коригуванням) цих моделей для умов прокатки товстого листа.

Профіль міжвалкового зазору, який впливає на профіль і площинність листа, що прокатується, визначається вихідними профілями робочих і опорних валків чотиривалкової кліті, а також вигином цих валків, пружним сплющуванням і температурним розширенням робочих і опорних валків.

Управління профілем і формою смуги є комплексною проблемою, для вирішення якої використовуються як засоби автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів, так і різні виконавчі органи, якими оснащується прокатний стан. За наявності таких органів задача АСУ ТП полягає у належній реалізації відповідних впливів на величину та форму зазору навантажених валків стану. На товстолистових станах (ТЛС), де проблема отримання плоского листа є актуальною, в АСУ ТП при прокатуванні особливо тонких (5–7 мм) та широких (> 3 м) листів не завжди вдається обмежитися лише автоматичним керуванням профілем та формою листа, доводиться передбачати втручання оператора, який візуально оцінює появу хвилястості листа і вносить корекцію в роботу автоматики.

Формування поперечного профілю і площинності смуги, що прокатується, тісно взаємопов'язане. Вплив на профіль досить товстих листів (>8 мм) практично не викликає

спотворення їхньої площинності. При менших товщинах смуги регулювання профілю тягне у себе порушення площинності.

У системі регулювання профілю та площинності листа, побудованої на базі ЕОМ, повинні компенсуватися пружна деформація валкової системи в залежності від ширини листа, питомого зусилля прокатки від листа до листа, а також нерівномірність термічної деформації та зношування валків. Як зворотний зв'язок у системі регулювання профілю та площинності зазвичай використовуються сигнали безпосереднього безконтактного вимірювання цих параметрів.

Пружна деформація робочих валків визначається основним зусиллям прокатки, зусиллям противигину валків та контактним тиском між робочими та опорними валками. Крім того, профіль листа залежить від точності встановлення розчину валків, профілю міжвалкового зазору. Всі ці фактори повинні враховуватись математичними моделями [3].

2. Модель теплового розширення ненавантаженого робочого валка

Форма валка при тепловому розширенні:

$$U(x,t+\Delta t)=U(x,t)+\left\{1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{П}}\right)\right\}\{U_0(x)-U(x,t)\}. \tag{1}$$

Функції теплового впливу на форму профілю
по осьовій лінії листа:

$$U_0(x)=U_s\left\{1-2k\cosh\left(\frac{|x+s|}{\lambda_{1`}}\right)\right\}; \tag{2}$$

по краях листа:

$$U_0(x)=U_s\frac{\lambda_2}{\lambda_1}2\sinh\frac{B}{2\lambda_1}k\exp\left\{-\frac{|x-s|-\frac{B}{2}}{\lambda_2}\right\}, \tag{3}$$

де $$\lambda_1=\sqrt{\frac{kR}{2\alpha_1}};\lambda_2=\sqrt{\frac{kR}{2\alpha_2}};\frac{1}{k}=2\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\left[2\sinh\left(\frac{B}{2\lambda_1}\right)+2\cosh\left(\frac{B}{2\lambda_1}\right)\right],$$

R – радіус робочого валка, s – позиція горизонтального зсуву валка, t – час, Δt – приріст часу, U – теплова опуклість валка, U_s – вихідна форма валка, B – ширина листа, x – відстань по ширині листа, α_1,α_2 – коефіцієнти нагріву відповідно по центру і краях листа, k – теплопровідність робочого валка, τ_n – постійна часу, λ_1,λ_2 – параметри нерівномірності нагрівання листа.

Константи α_1,α_2,τ_n і U_s визначаються експериментально на діючому стані. Модель контуру зносу робочого валка визначається експериментально. Вона має вигляд

$$U_p=a_0+a_1E_aK_n+a_2\frac{D_{ф}}{D_u}, \tag{4}$$

де U_p – зношування валків, E_a – витрати активної енергії на прокатку в чистовій кліті, МДж, K_n – коефіцієнт, що враховує витрату електроенергії на реверсування валків і холо-

стий хід, a_0, a_1, a_2 – константи, D_ϕ і D_u – діаметри робочих валків фактичний (після шліфування) та вихідний.

3. Модель деформації робочого валка з урахуванням сплющування та вигину

Сплющування валка розраховується з урахуванням основного зусилля прокатки, а вигин валка – з урахуванням основного зусилля прокатки, зусилля противигина та контактного тиску між робочим та опорним валками. Сплющення розраховується за рівнянням

$$\Omega(x) = \frac{1-\nu^2}{\pi E} q \log \left[\frac{\sqrt{(x^-)^2 + \left(\frac{l_d}{2}\right)^2} - (x^-)}{\sqrt{(x^+)^2 + \left(\frac{l_d}{2}\right)^2} - (x^+)} \cdot \frac{\sqrt{(x^+)^2 + \left(\frac{l_d}{2}\right)^2} - (x^+)}{\sqrt{(x^-)^2 + \left(\frac{l_d}{2}\right)^2} - (x^-)} \right], \tag{5}$$

де E – модуль Юнга для робочого валка, l_d – довжина дуги захвату, q – основне зусилля прокатки на одиницю ширини листа, $\Omega(x)$ – сплющування робочого валка, ν – коефіцієнт Пуассона для робочого валка, x^+ – відстань на ділянці сплющеного валка від кута захвату до нейтрального перерізу, x^- – відстань на ділянці сплющеного валка від нейтрального перерізу до виходу з валків.

Вигин робочого валка розраховується з урахуванням згинального моменту та зусилля зрізу. Повний вигин робочого валка може бути представлений рівнянням

$$\delta(x) = \delta_p(x)P + \delta_f(x)F + \delta_s(x), \tag{6}$$

де $\delta(x)$ – повний вигин, $\delta_p(x)$ – складова вигину від основного зусилля прокатки, $\delta_f(x)$ – складова вигину за рахунок зусилля противигину, $\delta_s(x)$ – складова вигину, що враховує профіль робочого валка, P – загальне зусилля прокатки, F – зусилля противигину.

У роботі [4] проблема регулювання профілю та форми листа розглянута у припущенні, що розподіл контактних зусиль між опорними та робочими валками описується біквадратним рівнянням

$$f(x) = \alpha x^4 + \beta x^2 + \gamma, \tag{7}$$

і коефіцієнти α, β, γ відповідають ситуації, коли робочий та опорний валки входять у контакт принаймні у двох точках бочки робочого валка.

Але отримані загальні рівняння виявилися дуже складними. Тому японською фірмою «Sumitomo Metal Industries, Ltd» запропонована та випробувана стосовно конкретного стану спрощена формула:

$$C_R = \alpha_p P - \alpha_c R_{CB} - \alpha_{CW} R_{CW} - \alpha_B P_B, \tag{8}$$

де R_{CB}, R_{CW} – профілі бочки робочого та опорного валків, P_B – згинальне зусилля валка, C_R – профіль, тобто потовщення листа посередині ширини, $\alpha_p, \alpha_C, \alpha_{CW}, \alpha_B$ – константи, що відносяться до зусилля прокатки, радіусів робочого та опорного валків та ширини листа.

4. Спеціальні органи та системи управління формою та площинністю листа, що прокатується

4.1. Гідравлічні натискні пристрої

У даний час на листопрокатних станах широко застосовуються гідравлічні натискні пристрої (ГНП) як елементи швидкодіючих систем автоматичного регулювання товщини смуги (САРТ), а також систем керування профілем та площинністю. Порівняно з електромеханічними натискними пристроями (ЕМНП) ГНП, що характеризуються високим прискоренням, точністю установки та гарною відтворюваністю, виключають гістерезис та запізнювання спрацьовування [3].

На рис. 1 для порівняння наведені динамічні характеристики натискних пристроїв з електромеханічним *1* і гідравлічним *2* приводами. Час зміни розчину валків на величину h =100 мкм становить, мс: для ГНП – 43, для ЕМНП – 458. При цьому співвідношення часу зміни розчину валків становить φ=458/43=10,65. Максимальні прискорення, мм/с^2: для ГНП – $\beta_Г = \pm 500$ при швидкості 4 мм/с; для ЕМНП – $\beta_{ЕМ} = \pm 2$ при швидкості $v_{ЕМ} = 0{,}45$ мм/с. Час запізнення $t_з$, мс: для ГНП – 10; для ЕМНП – 50.

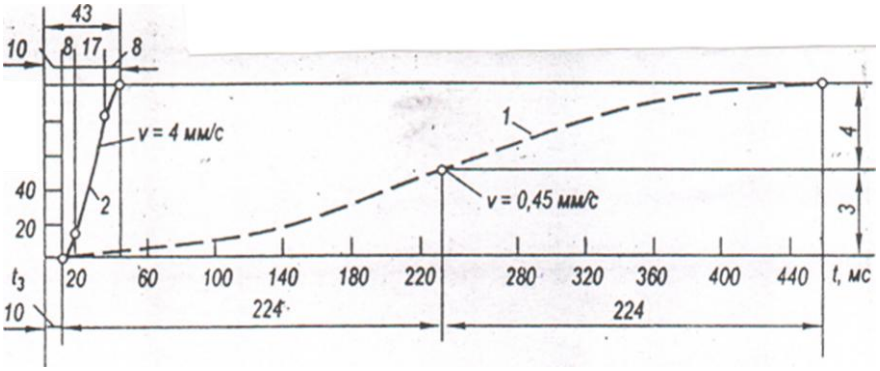

Рисунок 1 – Динамічні характеристики електромеханічного та гідравлічного натискних пристроїв

Через низьку швидкодію ЕМНП час зміни розчину валків на 100 мкм складається лише з ділянок прискорення *3* і уповільнення *4*. У ГНП 40% становить час руху зі швидкістю, що встановилася, а на повне переміщення потрібно близько 43 мс.

ГНП зазвичай входить до складу систем автоматичного керування натискними механізмами, утворюючи єдину систему СУГНП. Система має високу точність регулювання (1 мкм) при смузі пропускання частот 15–35 Гц залежно від динамічних характеристик маслопроводів і всієї гідросистеми.

Виконавчими органами ГНП є два силові гідроциліндри прямого ходу. Кожен гідроциліндр управляється блоком, встановленим під маслозбірником і в якому компактно розміщені необхідні системи та елементи з урахуванням високої динаміки: сервоклапани, гідроакумулятори, вимірювальні датчики положення, запобіжні клапани та ін. З метою підвищення надійності роботи ГНП гідроциліндр забезпечується зазвичай двома паралельно включеними сервоклапанами, дія яких контролюється електронним блоком. Кожен сервоклапан розрахований на половину необхідної пропускної спроможності. Сервоклапани запускаються послідовно. При малих неузгодженостях між заданим переміщенням ГНП та його фактичним положенням спочатку відкривається лише перший клапан. Якщо сигнал запуску перевищує пропускну здатність першого клапана, підключається другий. Двоклапанна система завдяки малим габаритним розмірам клапанів має високі динамічні характеристики.

Якість функціонування системи значною мірою визначається чистотою робочої рідини. Тонке очищення виконується в окремому циркуляційному контурі охолодження, зворотних трубопроводах, напірному трубопроводі, розташованому за насосом високого тиску, і в блоках управління безпосередньо перед сервоклапанами. Фільтр тонкої фільтрації (3 мкм) розташовується на стороні низького тиску, а загороджувальний фільтр із тонкістю фільтрації 25 мкм – на стороні високого тиску. Цим забезпечується необхідна чистота циркулюючої олії. Робочий тиск рідини в гідроциліндрах зазвичай приймається рівним 32 МПа.

Структурну схему системи СУГНП представлено на рис. 2. Система ГНП, що входить до неї, складається із двох гідроциліндрів *17 а, 17 б* з датчиками вимірювання ходу поршнів *19 а, 19 б* та сервоклапанами гідроциліндрів *16 а, 16 б*, а також підсилювачів потужності для управління сервоклапанами *15*.

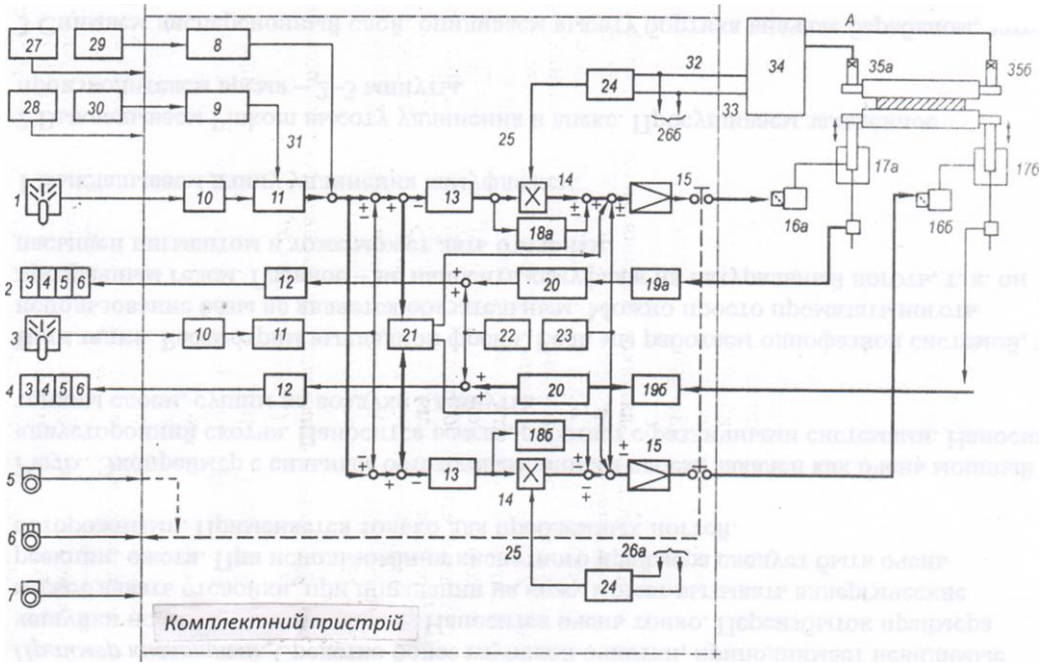

Рисунок 2 – Структурна схема СУГНП

Датчики положення валків встановлюють або по одному на кожен циліндр і розміщують у середині поршня гідроциліндра, або кріплять по два на зовнішніх сторонах гідроциліндрів і захищають від механічних пошкоджень міцними металевими корпусами. Двосторонній контроль положення підвищує точність вимірів при перекосах циліндрів. Як фактичне положення валків у систему позиціонування СУГНП у цьому випадку подається середнє значення показань обох датчиків.

У систему СУГНП входять контролер завдання розчину валків *1*, табло фактичного положення валків *2* і *4* відповідно з боку *А* і *Б*, задатчик симетрування положення валків *3*, органи включення СУГНП у роботу *5–7*.

Комплектний пристрій СУГНП містить аналого-цифровий перетворювач *8*, пристрій прийому сигналу від САРТ *9*, імпульсні перетворювачі завдання *10*, реверсивні лічильники завдання *11*, двійково-десяткові перетворювачі положення валків *12*, аналого-цифрові перетворювачі сигналів *13*, мультиплексори *14*, блоки компенсації витоку робочої рідини гідроциліндра *18а* і *18б* відповідно з боку *А* і *Б*, лічильники імпульсів датчиків переміщення поршнів ГНП *20*, блок порівняння і вирівнювання швидкостей переміщення *21* циліндрів *А* і Б ГНП, клапан установки на нуль розбалансу швидкостей *22*, додатковий псевдовипадковий сигнал *23*, виведений для зменшення впливу перешкод у процесі кван-

тування частоти 1 кГц, блок вирівнювання різниці зусиль із датчиків тиску (месдоз) *24*, сигнали управління в замкнутому контурі положення ГНП *25*, сигнал зусилля з боку *А* стану в канал *Б* для компенсації різниці тисків *26а, 26б* – те ж, з боку *Б* в канал *А*, контролер управління в системі САРТ *27*, контролер управління, який формує вихідні дані для сигналів автоматичного управління ГНП *28*, блок формування вхідного аналогового сигналу САРТ у систему ГНП *29*, сигнали вихідних даних *30*, передача сигналу даних *31*, сигнал загального тиску на валки по двох гідроциліндрах *32*, різниця тисків металу по каналах *А* і *Б 33*, контролер обробки сигналів із датчиків тиску металу на валки *34*, датчики зусиль тиску металу на валки *35а, 35б* відповідно з боку *А* та *Б*.

4.2. Система автоматичного регулювання товщини САРТ на базі СУГНП

У САРТ на ТЛС і широкосмугових станах гарячої прокатки (ШСГП) як основний застосовується принцип підтримки сталості міжвалкового зазору. Відповідна структурна схема представлена на рис. 3, у ній, крім характеристик ГНП, враховуються енергосилові та технологічні параметри ланок натискного механізму, розтягнення кліті, обтискання металу, міжвалкового зазору. Контур позиціонування з датчиком положення *ДП* в СУГНП є підлеглим по відношенню до зовнішнього контуру регулювання товщини датчиком зусилля прокатки *ДУ*. У системі регулювання, як це випливає з рис. 2, діють два аналогічні контури на сторонах *А* і *В* прокатної кліті.

Уставка на входах обох контурів позиціонування *А* та *Б* формується регулятором товщини *РТ* по різниці на його вході між заданою $H_з$ та фактичною $H_ф$ товщиною. Товщина $H_ф$ обчислюється на підставі рівняння Сімса за вимірюваним положенням електромеханічного натискного пристрою $S_ф$, тиском $P_ф$ ГНП та пружною деформацією кліті $g_ф$. Підсумовування вихідної товщини H_1 (зі знаком «плюс»), заданого положення ЕМНП $S_з$ та положення ГНП (зі знаком «мінус») дає на виході величину g пружної деформації кліті. Величина обтискання ΔH визначається зусиллям прокатки *Р* з урахуванням пружної деформації кліті (блоки *ПУ1, ПУ2*). Зусилля *Р*, що вимірюється месдозами

ДУ (*35а, 35б* на рис. 2), у блоці *ПУ3* з характеристикою $g = f(P)$ перетворюється на величину фактичної деформації кліті $g_ф$ (рис. 3).

Фактичні положення електромеханічного та гідравлічного натискних пристроїв визначаються відповідними датчиками. Зазначимо, що тиск робочої рідини в гідроциліндрах може використовуватися для формування сигналу зусилля прокатки, але це вимагає особливої ретельності в мінімізації зусиль тертя і підтримки сталості всіх зусиль балансування конструкції.

Залежно від характеру обробки у відповідних буферах ЗУ виміряних сигналів про становище електромеханічних, гідравлічних натискних пристроїв і деформації кліті може будуватися система відносного або абсолютного регулювання товщини смуги. При відносному регулюванні товщини ЗУ після кожного пропуска встановлюється на нуль. Потім при захваті металу валками і включенні системи регулювання на виходах ЗУ утворюються прирости відповідних вимірюваних величин по відношенню до початкових на момент включення. Протягом цього пропуску система підтримує початкові значення постійними. При абсолютному регулюванні товщини в САРТ обробляються абсолютні значення виміряних величин. Обробка вмісту пам'яті *ЗУ* між пропусками здійснюється в різних формах, виходячи з того, щоб прогнозувати завдання необхідного міжвалкового зазору ще до входу металу в ненавантажені валки. Включення САРТ відбувається у момент захвату металу валками.

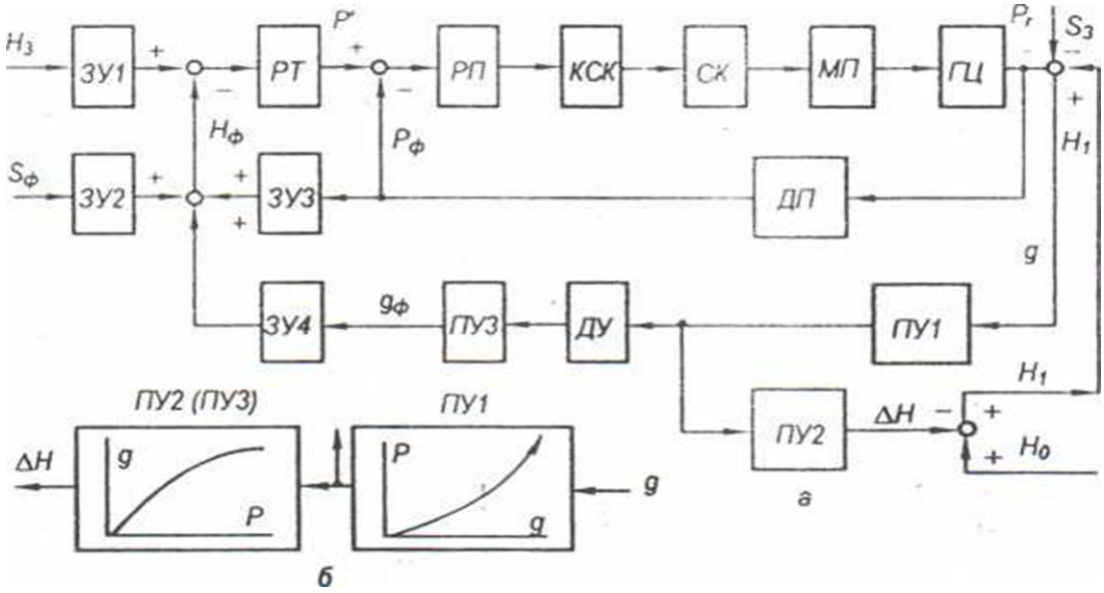

Рисунок 3 – Структурна схема САРТ на базі СУГНП (а) та характеристики перетворюючих блоків (б): *ЗУ1 – ЗУ4* – запам'ятовуючі блоки, *РТ* – регулятор товщини листа, *РП* – регулятор положення натискного механізму, *КСК* – котушка сервоклапана, *СК* – сервоклапан, *МП* – маслопровід, *ГЦ* – гідроциліндр, *ДП* – датчик положення ГНП, *ДУ* – датчик зусилля прокатки, *ПУ1 – ПУ3* – перетворюючі блоки, $S_з$ – задане положення ЕМНП, $S_ф$ – виміряне положення ЕМНП, $P_ф$ – тиск ГНП, $g_ф$ – виміряна величина пружної деформації кліті

Принцип відносного регулювання товщини може застосовуватися лише за наявності в САРТ товщиноміра для постійного виміру товщини і порівняння з завданням. Тому він отримав переважне застосування на ШСГП. У САРТ на ТЛС, як правило, використовується принцип абсолютного регулювання, оскільки порівняння заданого та фактичного значень товщини листа можливе лише в останніх пропусках, де виконуються такі виміри.

4.3. Система фігурних валків з осьовим зміщенням у протилежних напрямках

Для адаптації міжвалкового зазору до умов прокатки, що забезпечує високу якість смуги за її профілем та площинністю, отримали застосування різні прийоми:

– симетричне шліфування робочих валків з утворенням опуклості посередині;

– позитивний чи негативний вигин робочих або опорних валків;

– теплове регулювання бочкоподібності валків (зонне охолодження);

– облік нерівномірного зношування валків при змінах сортаментів по ширині та ін.

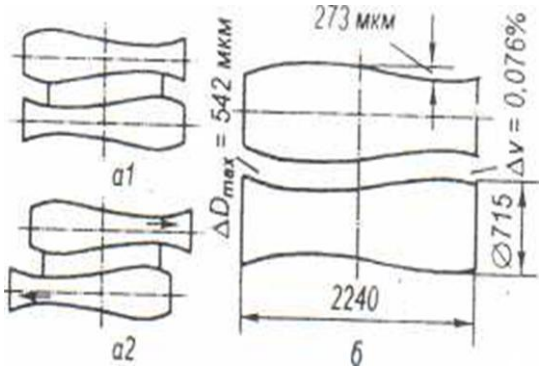

Рисунок 4 – Принцип дії системи фігурних валків з осьовим зміщенням

Так як пружна деформація валкової системи може змінюватись у залежності від ширини смуги та зусилля прокатки, симетричне шліфування форми валка може відповідати лише деякій середній із вимог, що виникають при реалізації різних програм прокатки. Певну компенсацію зазначеного недоліку симетричного шліфування вносить система вигину робочих валків. Але її максимально можливий діапазон впливів не перевищує 30% від найбільшої пружної деформації валкової системи.

Пошуки більш універсального методу впливу на форму міжвалкового зазору призвели до створення системи фігурних валків з їх осьовим зміщенням у протилежних напрямках (безступінчасто регульований профіль валків). Така система забезпечує симетричну зміну профілю міжвалкового зазору, що легко пристосовується до будь-яких програм прокатки. Принцип функціонування такої системи, запропонованої та розробленої німецькою фірмою «SMS – Schloemann Siemag», представлений на рис. 4 [5]. Обидва робочі валки можуть зміщуватися в осьовому напрямку цапфами в подушках або разом із подушками.

Фігурне профілювання верхнього та нижнього прокатних валків ідентичне. Вони розгорнуті по відношенню один до одного так, що між ними утворюється симетричний міжвалковий зазор. У положенні валків *a1* профільовані валки чинять на смугу таку ж дію, як і циліндричні валки. Ефективна опуклість дорівнює 0. Якщо верхній валок зміщений вправо, а нижній вліво на ту ж величину (*a2*), то міжвалковий зазор у середній частині смуги, що прокатується, буде менше, опуклість смуги буде меншою за нуль. У разі зсуву верхнього валка вліво, а нижнього вправо (*a3*) міжвалковий зазор у середній частині смуги збільшиться. Опуклість смуги буде більшою за нуль.

Таким чином, осьове зміщення валків плавно змінює форму міжвалкового зазору, активно впливаючи на профіль і площинність смуги, що прокатується. На рис. 4 *б* представлені як приклад кількісні параметри шліфування валків та межі їх осьового зміщення. При зміщенні валків на ± 100 мм може досягатися ефект, що відповідає шліфуванню циліндричних валків у діапазоні зміни діаметра кожного валка на 100–500 мкм при максимальному діаметрі валка 715 мм. Максимальна різниця окружних швидкостей верхнього та нижнього валків незначна (0,76%), яка становить приблизно одну соту частку від величини випередження гарячекатаної смуги.

Щодо математичного закону, за яким шліфуються фігурні валки, зазначимо таке. Традиційно (для станів холодної прокатки) впливом на профіль смуги, що прокатується, була симетрична опуклість бочки робочих валків, що відповідає математичній функції полінома другого порядку.

$$\Delta y(x) = a_0 x^2 + a_1 x + a_2 , \tag{9}$$

де x – поточна координата по довжині бочки валка.

Цим здійснюється з достатнім наближенням компенсація пружної деформації валкової системи для певної програми прокатки. Показана на рис. 4 система фігурних валків шліфується відповідно до математичної функції полінома третього ступеня:
для верхнього валка

$$\Delta y_B(x) = a_0 x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3; \tag{10}$$

для нижнього валка, повернутого щодо верхнього на 180°,

$$\Delta y_H(x) = a_0 (1-x)^3 + a_1 (1-x)^2 + a_2 (1-x) + a_3 \tag{11}$$

або, розкривши дужки, перепишемо поліном (11) у вигляді

$$\Delta y_H(x) = -a_0 x^3 + \alpha_1 x^2 - \alpha_2 x + \alpha_3 , \tag{11а}$$

де $\alpha_1 = 3a_0 + a_1; \alpha_2 = 3a_0 + 2a_1 + a_2; \alpha_3 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3$.

Величину міжвалкового зазору отримаємо з рівнянь (10) та (11а):

$$\Delta y(x) = \Delta y_B(x) + \Delta y_H(x)$$

або

$$\Delta y(x) = (a_1 + \alpha_1) x^2 + (a_2 - \alpha_2) x + (a_3 + \alpha_3) . \tag{11б}$$

Таким чином, при осьовому зміщенні фігурних валків у протилежні сторони форма міжвалкового зазору змінюється симетрично до осі кліті за законом полінома другого ступеня (11б), тобто форма зазору зберігається такою ж, як і при симетрично опуклих валках, але зі ступенем опуклості, що плавно змінюється. Стосовно кожного конкретного стану характеристики профілю валків розрізняються лише величинами коефіцієнтів полінома, що вибираються за необхідним діапазоном змін форми міжвалкового зазору.

Фігурні валки з осьовим зміщенням широко застосовуються на листових станах гарячої та холодної прокатки. При товщинах гарячих смуг понад 8 мм забезпечується хороша корекція профілю без порушення площинності. При прокатуванні тонших смуг система впливає як на профіль, так і на площинність.

Осьове зміщення валків для адаптації до конкретних умов прокатки може здійснюватися як під навантаженням у процесі прокатки, так і при початковому налаштуванні стану. Комбінація описаної системи з системою вигину валків розширює діапазон впливу на профіль і площинність смуги, що прокатується. При цьому зазвичай для кожної смуги встановлюється необхідний профіль міжвалкового зазору, а система вигину робочих валків здійснює лише компенсацію відхилень поточної формозміни комплекту валків, а також збурюючих впливів при прокатці.

5. Висновки

Основне завдання прокатного виробництва полягає у забезпеченні необхідної якості прокату. До найважливіших параметрів відносяться площинність і профіль листів, що прокатуються. Управління профілем та площинністю смуги є комплексною проблемою, для вирішення якої використовуються як засоби автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів, так і різні виконавчі органи, якими оснащуються прокатні стани.

У даний час на листопрокатних станах широко застосовуються гідравлічні натискні пристрої як елементи швидкодіючих систем автоматичного регулювання товщини смуги, а також систем керування профілем та площинністю. Застосовуються також системи фігурних валків зі своїм осьовим зміщенням у протилежних напрямках.

Застосування на листопрокатних станах описаних вище спеціальних органів і систем управління формою і площинністю листа, що прокатується, забезпечує відповідність цих параметрів заданим вимогам.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ієвлєв М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
2. Иевлев Н.Г. Математические модели плоскостности толстолистового проката применительно к АСУ ТП. *Математичні машини і системи*. 2018. № 1. С. 67–77.
3. Грабовский Г. Г. ИАСУ толстолистовыми прокатными станами. К.: Техніка, 2001. 448 с.
4. Kitahama M., Varita U., Hideo A., Awazuhara H. Profile control of hot rolled strip by work roll shifting mill. *Iron and Stell Engineer*. 1987. N 11. P. 34–43.
5. Bolte W. CVC technology. A new cold rolling process for the production of flat Steel strip. *Metallyrgical Plant and Technology*. 1986. N 6. P. 70–79.

Стаття надійшла до редакції 22.09.2022