

5. ТОЧНІСТЬ І ПЛОЩИННІСТЬ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

5.1 Пружна деформація прокатної кліті

Внаслідок дії сили прокатки деталі прокатної кліті пружно деформуються (стійки піддаються розтягуванню, поперечина і валки прогинаються, подушки, підшипники, натискні гвинти, гайки – стискаються), усуваються зазори в системі натискний гвинт - подушки. Розмір і форма зазора між робочими валками змінюються в порівнянні з початковими, а штаба одержує відповідні товщину, поперечну різновтовщинність і площинність. Визначення товщини штаби на виході з кліті виконують з використанням робот [32, 42, 80]. Сумарна пружна деформація (пружина) робочої кліті пропорційна величині сили прокатки, і може бути визначена дослідним або теоретичним шляхом.

При дослідному визначенні пружини кліті вимірюють початковий зазор між валками, товщину штаби після прокатки і зусилля прокатки, серії штаб. Побудувавши залежність $P = f(\delta_{кл})$, (де $\delta_{кл}$ – пружна деформація кліті) можна визначити жорсткість кліті (рис. 5.1). Величина пружної деформації кліті визначає товщину штаби

$$h = S_0 + S_1 + P/M_{кл}, \quad (5.1)$$

де S_0 – установочний зазор між валками у ненавантаженому стані; S_1 – сума зазорів у контактах системи робочий валок – натискний гвинт; P – сила прокатки; $M_{кл}$ – модуль жорсткості кліті.

Сума $[S_1 + (P/M_{кл})]$ називається пружиною кліті. Модуль жорсткості кліті $M_{кл}$ є тангенс кута α (рис. 5.1) і визначається за виразом

$$M_{кл} = \operatorname{tg} \alpha = \Delta P / \Delta \delta_{кл}, \quad (5.2)$$

де $\Delta \delta_{кл}$ – приріст пружної деформації кліті при зміні сили на величину $\Delta P = P - P_0$.

Приймаючи $S = S_0 + S_1$, запишемо

$$h = S + P/M_{кл}. \quad (5.3)$$

Це рівняння носить назву Симса-Головина. Дослідженнями та теоретично встановлені часткові складові пружної деформації (%):

валкова система	- 50...70
станина	- 15...20
натискний вузол	- 10...15
підшипники	- 10...15
інші деталі	- до 10.

Як видно із даних, найбільшу деформацію одержують валки у зв'язку з прогином і сплюсненням на міжвалковому контакті, просіданням опорних валків. Установочний зазор S може мати такі величини: $S = 0$; $S > 0$; $S < 0$. Співвідношення $S > 0$ дійсне під час прокатки товстих та середніх за товщиною штаб, а інші - під час прокатки тонких штаб. Так, в умовах холодної прокатки, як правило, $S < 0$. У цьому випадку, під дією натискних гвинтів валковий вузол при їхньому холостому оберті натискають "у забій" і тоді (рис. 5.1):

$$h = \Delta\delta_{кл} = \delta_0 - S_3, \quad (5.4)$$

де S_3 - попередній "забій" валків; δ_0 - сумарна деформація кліті.

Ураховавши вираз (5.2), одержимо

$$h = \Delta\delta_{кл} = (P - P_0)/M_{кл}; \quad (5.5)$$

Рівняння (5.3) включає в себе два невідомих (h і S) і тому для його рішення необхідне друге вираження, яке зв'яже зміну товщини штаби та сили прокатки. Якісна залежність сили прокатки від товщини штаби показана на рис. 5.2 (крива 2). Крива 2 називається кривою пластичної деформації штаби (H - початкова товщина штаби). Із рис. 5.2 маємо, що із зменшенням товщини штаби (за рахунок збільшення обтиснення) сила P зростає, а інтенсивність підвищення сили P зумовлена інтенсивністю зміцнення штаби. Точка "0" перетину кривих, відповідає товщині, яку одержали під час прокатки

штаби. В точці "0" внутрешня сила з боку штаби, дорівнює зовнішній силі Р.

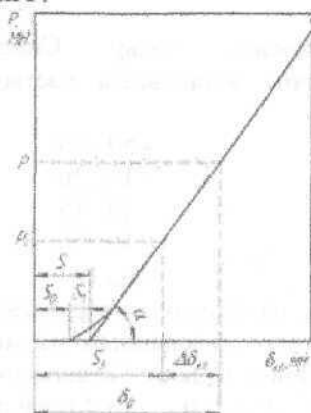


Рис. 5.1. Залежність пружини кліті від сили прокатки.

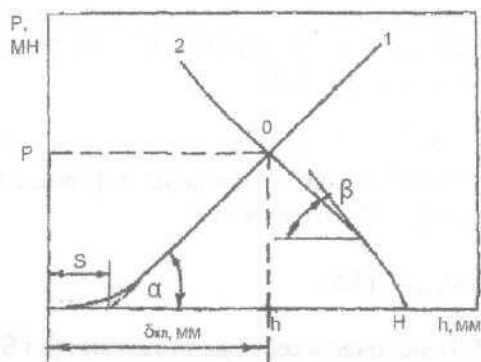


Рис. 5.2. Суміщення пружної лінії кліті (1) і кривої пластичної деформації штаби (2).

Перемінний кут β характеризує модуль жорсткості штаби:

$$M_{\pi} = \operatorname{tg} \beta = \partial P / \partial h. \quad (5.6)$$

Модуль жорсткості штаби відображає ступінь зміни сили прокатки при зміні на 1 мм кінцевої товщини штаби.

Формула (5.6) представлена у частних похідних, так як $\operatorname{tg} \beta$ величина перемінна, і передбачає у собі вплив на силу прокатки усіх інших факторів. Рівняння (5.3) і (5.6) дають змогу визначити зміни товщини штаби за її довжиною в залежності від зміни умов прокатки (сили P).

5.2. Розрахунок поздовжньої різнотовщинності штаби

Процес поздовжньої прокатки нестабільний за довжиною штаби внаслідок періодичної зміни початкових товщини, напруження течії, натягування, коефіцієнта тертя, биття валків і т.п. Відповідно із зміною указаних факторів змінюється сила прокатки, пружні деформації кліті (міжвалковий зазор) і, звідси, товщина штаби. Кількісні зміни товщини штаби за її довжиною визначаються із використання вираження (5.3) після його диференцювання:

$$dh = dS + dP/M_{кл} - (P/M_{кл}) \cdot (dM_{кл}/M_{кл}). \quad (5.7)$$

Приймаючи незмінним модуль жорсткості кліті $[(P/M_{кл}) \cdot (dM_{кл}/M_{кл}) = 0]$, дістанемо

$$dh = dS + dP/M_{кл}. \quad (5.8)$$

Фізичний зміст рівняння відображає величину зміни товщини штаби при зміні сили прокатки (dP) та зазора між валками (dS). Збільшення dS і dP за яких-небудь причин призводить до відповідного збільшення товщини штаби. Повний диференціал dS дорівнює:

$$dS = dA - 2dD_p - dD_{оп}, \quad (5.9)$$

де A – відстань між осями опорних валків; D_p – діаметр робочого валка; $D_{оп}$ – діаметр опорного валка.

Диференціали рівняння (5.9) враховують зміни указаних параметрів у процесі прокатки. Сила прокатки залежить від зміни геометричних, кінематичних параметрів осередку деформації, напруження течії металу і т.п.

$$P = \Phi(H, h, D_p, \sigma_T, f, \sigma_{II}, \sigma_3), \quad (5.10)$$

де σ_T – напруження течії металу; σ_{II} і σ_3 – напруження переднього і заднього натягування.

З урахуванням модулів жорсткості робочої кліти і штаби у роботах [42, 80] надано головне рівняння поздовжньої різнотовщинності штаби:

$$\begin{aligned} dh = & \frac{1}{M_{кл} - \partial P / \partial h} (M_{кл} \cdot dS + \frac{\partial P}{\partial H} dH + \frac{\partial P}{\partial B} dB + \frac{\partial P}{\partial R_p} dR_p + \\ & + \frac{\partial P}{\partial \sigma_T} d\sigma_T + \frac{\partial P}{\partial f} df + \frac{\partial P}{\partial \sigma_{II}} d\sigma_{II} + \frac{\partial P}{\partial \sigma_3} d\sigma_3). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Диференціали ($\partial P / \partial H$, $\partial P / \partial B$ і т.д.) у рівнянні (5.11) показують міру зміни сили прокатки при зміні перемінного параметра на величину рівну dH , dB і т.д., і називаються передаточними коефіцієнтами. Оскільки другий співмножник у дужках відображає зміну сили прокатки в залежності від незалежних перемінних, рівняння (5.11) представляють у вигляді:

$$dh = dP / (M_{кл} - \partial P / \partial h). \quad (5.12)$$

З урахуванням виразу (5.6) і протилежного, по відношенню до кута α , кута β нахилу кривої пластичної деформації дістанемо з формули

$$dh = dP / (M_{кл} + M_{II}) \quad (5.13)$$

або у кінцевих різницях:

$$\delta h = \delta P / (M_{кл} + M_{II}); \quad (5.14)$$

$$M_{II} = \delta P / \delta h.$$

тобто, зміна сили прокатки на величину δP призведе до зміни кінцевої товщини штаби на величину δh .

Приймаючи у рівнянні (5.11) усі параметри у другому співмножнику, крім першого, рівними нулю (незмінними за довжиною) одержимо

$$\delta h = \frac{M_{кл} dS}{M_{кл} + M_{II}} \quad (5.15)$$

Ця формула дає змогу визначити вплив зміни зазора між валками на поздовжню товщину штаби, а відношення $k_S = dS/dh$ називається передаточним коефіцієнтом:

$$k_S = \frac{M_{кл} + M_{II}}{M_{кл}} = 1 + \frac{M_{II}}{M_{кл}} \quad (5.16)$$

Передаточний коефіцієнт $k_S > 1$, тобто величина переміщення натискних гвинтів за продуктиметром завжди більша, ніж зміна товщини штаби ($dS > dh$). Збільшення модуля жорсткості штаби викликає збільшення коефіцієнта k_S , а модуля жорсткості кліті – зменшення коефіцієнта k_S . В абсолютно жорсткій кліті коефіцієнт $k_S \rightarrow 1$ ($dS \approx dh$).

На рис. 5.3 наданий характер зміни температури по довжині проміжного розкату при гарячій прокатки штаби

За наявності експериментальних величин сил прокатки поздовжню різновтовщинність готової штаби в точках 1,3,4 в порівнянні з мінімальною товщиною в точці 2 (з максимальною температурою) расчитивають по формулі:

$$\delta h_i = (P_i - P_2) / M_{кл}, \quad (5.17)$$

де P_2 і P_i - сили прокатки в точці 2 і в будь-якій іншій точці; $M_{кл}$ - модуль жорсткості кліті.

При теоретичному розрахунку поздовжньої різновтовщинності штаби необхідно враховувати, що по довжині штаби змінюються одночасно із зусиллям прокатки товщина,

обчислення, модуль жорсткості штаби в порівнянні з точкою 2 з мінімальною товщиною штаби. У зв'язку з цим величини відхилення товщини в точках 1,3,4 в порівнянні з базовою товщиною необхідно визначити з урахуванням змінних значень модуля жорсткості штаби в порівнянні з модулем жорсткості штаби в точці 2.

Передній кінець штаби (точка 1) може мати дещо меншу температуру, ніж на сусідній ділянці 2. Ділянка 2-3 характеризується зниженням температури (температурний клин) перед входом в кліть, а на ділянці 3-4 може мати місце інтенсивніше зниження температури внаслідок більшої втрати тепла кінцевою ділянкою розкату. Підвищення сили P на ділянці 2-3 обумовлено зниженням температури металу, а на ділянках 2-1 і 3-4- зниженням температури і відсутністю натягання кінців розкату.

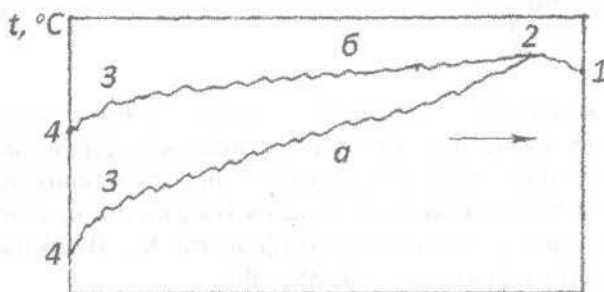


Рис. 5.3. Зміна температури по довжині проміжного розкату: а – за традиційною технологією; б – за наявності койлбокса.

Положення точок 1-4 по довжині розкату (штаби) залишається постійним на всьому протязі чистової групи ШСПП. На ділянці 2 розкат прокатують за наявності високої температури і наявності переднього і заднього натягання. Товщина розкату (штаби) в точці 2 буде мінімальна і приймається як базова. Наприклад, якщо $h_2 = 2$ мм, то у всій решті точок $h_i > 2$, тобто

$$h_i = h_2 + \delta h_i, \quad (5.18)$$

де δh_1 - приріст товщини розкату (штаби) (в точках 1,3,4) в результаті вказаних фактів ($t_1, \sigma_{ш}$, відмінність механічних властивостей і биття валків).

У загальному випадку приріст товщини розкату в точках 1,3,4 визначається рівнянням [48]:

$$\delta h_1 = (P_1 - P_2) / (M_k + \delta M_{II}), \quad (5.19)$$

де P_1 і P_2 - сили прокатки в і-х точках і мінімальна в точці 2; $M_{кл}$ - модуль жорсткості кліті; M_{II} - модуль жорсткості штаби.

Відмінність δM_{II} між сусідніми розрахунковими даними визначається з виразу:

$$\delta M_{II} = M_{III} - M_{II2}, \quad (5.20)$$

де M_{II2} і M_{III} - модулі жорсткості штаби в точці 2 і в будь-якій іншій точці довжини штаби.

У теоретичному розрахунку P_1 і P_2 параметр δh_1 визначається шляхом ітерировання рівняння (5.19) по модулю жорсткості штаби M_{II} . При цьому модуль жорсткості M_{II} визначають з роботи [80]:

$$M_{III} = \varphi_1 P_1 / \Delta h_1; \quad M_{II2} = \varphi_2 \cdot P_2 / \Delta h_2, \quad (5.21)$$

Для горячої прокатки маємо (по даним [80])

$$\varphi_i = (0,57 + 0,62\varepsilon)[1 + 0,023(R/H)^{0,5}], \quad (5.22)$$

де φ_i - коефіцієнт; Δh_1 і Δh_2 - абсолютне обтиснення в і-ой точці і в точці 2; R - радіус валків; H - початкова товщина штаби в кліті.

У першій ітерації за даними першого розрахунку параметрів P_1 і P_2 , M_{III} , визначають величину δh_1 . Потім визначають Δh_1 , і Δh_2 , решту параметрів, у тому числі і P_i'' по яких розраховують значення $\delta h_i''$ в другій ітерації. Розрахунок δh_1 по формулі (5.24) виконують доти поки різниця між сусідніми значеннями δh_1 складає $\Delta = 0,003$ мм. При

$\Delta = 0$ система осередок деформації – сила прокатки приходить в рівновагу, а при $\Delta = 0,003 \text{ мм}$ система близька до рівноваги.

Для умов холодної прокатки штаб коефіцієнт φ для розрахунку модуля $M_{\text{ш}}$ визначають по даним [80]

$$\varphi = [0,53 + 1,15(\varepsilon_1 - 0,1)^2] \cdot (0,9 + 2f \cdot \sqrt{R/H})(0,78 + 2,2\varepsilon_1), \quad (5.23)$$

де f – коефіцієнт тертя.

Точка 2 на профілограмі поздовжній різнотовщинності штаби при холодному прокатуванні є мінімальна товщина штаби при максимальній швидкості прокатки.

5.3. Поздовжня різнотовщинність листів і штаб

Поздовжня різнотовщинність листів (штаб) завжди зумовлена пружними деформаціями кліті і чим вони більше змінюються у процесі прокатки, тим більші відбуваються зміни і у товщині штаби по її довжині. У відповідності із рівнянням Сімса-Головіна товщина штаби у кліті може бути визначена рівнянням (5.3)

$$h = S + \frac{P}{M_{\text{кл}}},$$

де S – початковий міжвалковий зазор, мм; $M_{\text{кл}}$ – коефіцієнт жорсткості кліті, який характеризує величину пружної деформації кліті під дією навантаження ($M_{\text{кл}} = 3,5 \dots 8 \text{ МН/мм}$).

Із формули випливає, що збільшення сили прокатки при $M_{\text{кл}} = \text{const}$ підвищує товщину штаби. Таким чином, усі фактори, які сприяють збільшенню сили P у процесі прокатки однієї штаби, зумовлюють збільшення S , $\delta_{\text{кл}}$ і її товщини. Характерний поздовжній профіль гарячекатаного листа зображений на рис. 5.4 [13]. Основною причиною зміни товщини листа у середній частині довжини розкату є так звані “глісажні мітки”, тобто місця з пониженою температурою від контакту сляба з глісажними трубами нагрівальних печей, які охолоджують водою. Різнотовщинність δh , яка визвана ними,

складає 0,08...0,15 мм. Різновтовщинність на кінцевих ділянках δh_k досягає -0,44 мм і являється наслідком меншої швидкості прокатки при захваті і викиді металу валками (15...45 об/хв.) проти 70...90 об/хв. на основній довжині листа. Зменшення товщини листа на кінцевих ділянках зумовлено зниженням швидкості деформації, і, відповідно, опору металу деформації, середнього тиску, сили прокатки і пружних деформацій кліті. Під час прокатки листів з постійною швидкістю поздовжня різновтовщинність знижується у 2...2,5 рази, а нагрів слябів у печах з крокуючими балками практично усуває "глісажні мітки" і поздовжню різновтовщинність листів у середній частині його довжини.

Під час гарячої прокатки на неперервних станах поздовжня різновтовщинність штаб, головним чином, формується у чистовій групі клітей у результаті дії в основному двох факторів: зниження температури за довжиною розкату перед групою клітей і відсутністю натягання під час прокатки кінців (переднього натягання - на передньому кінці, заднього натягання на задньому кінці штаби). Внаслідок відсутності натягання - на передньому та задньому кінцях штаби зростають середнє нормальне контактне напруження в осередку деформації, сила прокатки, пружні деформації робочих клітей і, отже, міжвалкові зазори і товщина штаби на кінцевих ділянках (рис. 5.5). На рис. 5.5 маємо: δh_m - максимальна різновтовщинність; δh_z - різновтовщинність, яка з'являється внаслідок відсутності натягання на задньому кінці штаби; δh_r - різновтовщинність, яка з'являється внаслідок відсутності натягання на передньому кінці штаби.

Складові і максимальні поздовжні різновтовщинності зумовлені довжиною сляба, товщиною штаби, швидкістю прокатки, складом устаткування стана. За даними [49] для різноманітних станів гарячої прокатки, діапазон змінення поздовжньої різновтовщинності складає (мм) (дані до 1972р.):

$$\delta h_m = 0,09 \dots 0,30;$$

$$\delta h_r = 0,02 \dots 0,10;$$

$$\delta h_z = 0,05 \dots 0,27;$$

$$\delta h_t = 0,02 \dots 0,08.$$

Відомо різні ефективні методи зниження або ліквідування складових поздовжньої різнотовщинності. Наприклад, практично ліквідується вплив температурного клина (δh_T) шляхом застосування проміжного перемотувального пристрою (ППП)(койл-бокса), прискорення обертання валків клітей чистової групи у процесі прокатки штаби ($v_{ГР} = 0,05 \dots 0,1 \text{ м/с}^2$), зменшення міжвалкового зазора до заднього кінця штаби

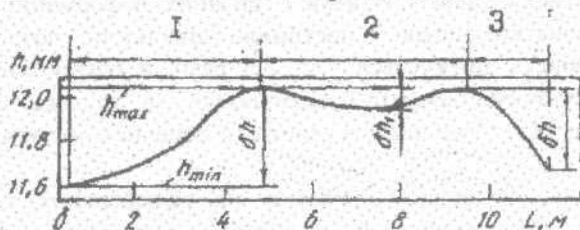


Рис. 5.4. Поздовжній профіль листа 12x1570 мм (ТЛС 2800): 1- передній кінець; 2-середина; 3-задній кінець.

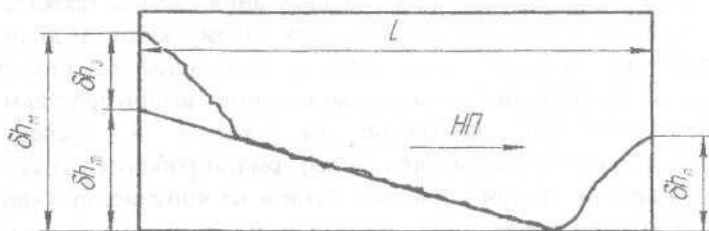


Рис. 5.5. Складові поздовжньої різнотовщинності штаби після гарячої прокатки (н.п. – напрям прокатки)

за допомогою натискних пристроїв або гідророзпіра кліті з використанням систем автоматичного регулювання товщини (САРТ) штаби. При регулюванні натискними гвинтами зменшують зазор між валками одночасно у 2–5 клітях пропорційно зменшенню температури штаби і втрачання заднього натягування штаби.

Сутність регулювання міжвалкового зазору за допомогою гідророзпіру полягає у наступному (рис. 5.6). Перед задачею штаби 7 у кліть під дією гідродомкратів 4, відбувається

ліквідація зазорів у системі подушки опорних валків – натискні гвинти, попередній тиск відповідних деталей і розтягування стійок станин із силою ΣP_d (тиск масла у системі складає близько 30 МПа). Сутність дії початкового розтягування кліті полягає у тому, що при вході у валки стовщеної ділянки штаби сила ΣP_d автоматично знижується і, за рахунок зменшення пружної деформації стійок станини, відбувається зменшення міжвалкового зазору і збільшення обтиску штаби, при якому ліквідується різниця товщин штаби на сусідніх ділянках довжини.

Таким чином, за рахунок дії натискних обладнань і гідродомкратів відбувається вирівнювання товщини штаби за довжиною. Для максимального вирівнювання товщини система автоматичного регулювання повинна працювати із урахуванням рівняння товщини

$$K_b = (1 + M_{кл}/M_d)(1 - \varepsilon)/v, \quad (5.24)$$

де K_b – коефіцієнт вирівнювання товщини штаби; ε – відносний обтиск (долі); v – коефіцієнт ($v = 0,6 \dots 1$).

Для отримання мінімальної поздовжньої різнотовщинності штаб коефіцієнт K_b повинен бути як можна вищим, у всякому разі необхідно мати $K_b > 1$.

Одним із ефективних методів зниження поздовжньої різнотовщинності є метод прискорення стана у процесі прокатки штаби (після захвату переднього кінця штаби моталкою) на величину $0,05 \dots 0,1$ м/с². Підвищення швидкостей штаби під кінець прокатки призводить до збільшення температури металу і ліквідує не тільки температурний клин, але й компенсує відсутність натягування на задньому кінці штаби (рис. 5.7). Основною системою, яка дає змогу одержати гарячекатані штаби з мінімальними коливаннями товщини за довжиною являються системи автоматичного регулювання товщини (САРТ) штаби, які працюють на існуючих ШСПІ у залежності від зміни сили прокатки, натягування штаби і положення натискних гвинтів. За даними [12] маємо, що при роботі САРТ на стані 2000 НЛМК (Росія) різнотовщинність штаби на

основній ділянці знижується у 1,2...1,6 рази, а на задньому кінці – у 1,5...2 рази.

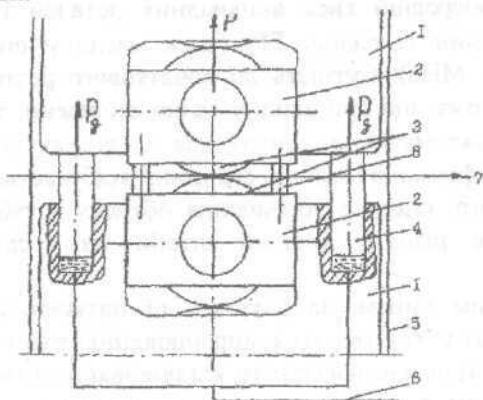


Рис. 5.6. Схема попереднього розтягування кліті гідродомкратами: 1 – подушки опорних валків; 2 – подушки робочих валків; 3 – робочі валки; 4 – гідродомкрати; 5 – стійки станини; 6 – магістраль подачі масла; 7 – штаба; 8 – плунжери урівноваження верхнього робочого валка

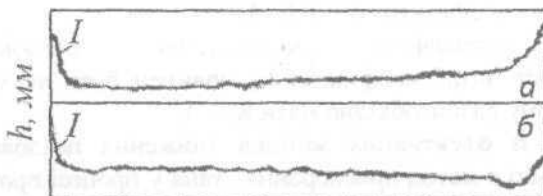


Рис. 5.7 Зміна товщини штаби при гарячому прокатуванні на сучасних ШСГП без прискорення (а) і з прискоренням обертання валків (б) чистої групи (1 – передній кінець) (рулонна прокатка).

Під час холодної прокатки поздовжню різнотовщинність штаби зумовлено початковою різнотовщинністю гарячекатаного підкату і власними особливостями процесу: відсутністю натягувань кінцевих ділянок штаби і наявністю ділянок зварних швів. Потовщення ділянок зварних швів зумовлено прокаткою їх при швидкості $v_i < 5$ м/с (v_i – швидкість у чистої кліті), коли має місце суттєве збільшення коефіцієнта зовнішнього тертя,

сили прокатки і міжвалкового зазора порівняно зі сталим процесом. При випуску заднього кінця на невеликій швидкості і із збільшенням сили прокатки додається ще і відсутність заднього натягування, що також сприяє збільшенню сили прокатки і міжвалкового зазора. У результаті впливу зазначених факторів поздовжній профіль штаби, навіть при додатковому обтиску у клітках 1 і 2 на $\Sigma S_{ш} = 0,7 \dots 0,8$ мм (ділянка шва) і $\Sigma S_3 = 1,4 \dots 1,5$ мм (ділянка заднього кінця), має потовщення $\delta h_{ш} = 0,07 \dots 0,1$ мм (ділянка шва) і $\delta h_3 = 0,35 \dots 0,50$ мм (задній кінець) (рис. 5.8,а). Застосування додаткового обтиску у всіх клітках стану ШСХП 1680 у межах $\Sigma S_{ш} = 1,2 \dots 1,4$ мм і $\Sigma S_3 = 2 \dots 2,2$ мм практично ліквідує потовщення зазначених ділянок (рис. 5.8, б).

Кардинальним рішенням задачі зменшення (ліквідації) поздовжньої різнотовщинності холоднокатаних штаб є застосування безперервного процесу (рис. 4.10) і прокатки ділянок з'єднання окремих штаб (швів) на швидкості у чистовій клітці $v \geq 5$ м/с при одночасному регулюванні міжклітьового натягування і міжвалкового зазора. При такому процесі 97...98% довжини штаби рулону укладаються у допущені межі зміни товщини.

На стані холодної прокатки 2500 Магнітогорського металургійного комбінату (Росія) система регулювання товщини і натягування штаби має два контури регулювання: "грубе" регулювання товщини з допомогою натискних гвинтів клітці і стану за сигналом мікрометра і "тонке" регулювання зміною натягування між клітьями за сигналом мікрометра за чистовою кліттю.

Система має три канали регулювання:

- канал за швидкістю (змінює швидкість приводних електродвигунів попередніх клітей);
- канал за регулюванням положення валків (переміщує натискні гвинти наступних клітей);
- канал обмеження натягування (виробляє узгоджену зміну швидкості приводних електродвигунів усіх наступних або усіх попередніх клітей).

Комплекс САРТ дозволяє одержати холоднокатані штаби з відхиленням товщини від середнього значення не

більше 2% на 98% довжини штаби. На ділянках зварних з'єднань різновтовщинність штаби зменшується у 2...2,5 рази порівняно з прокаткою без застосування систем.

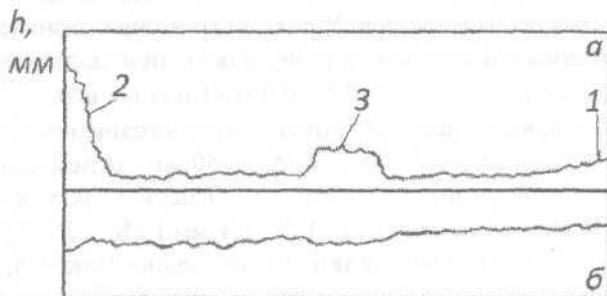


Рис. 5.8. Зміна поздовжньої різновтовщинності холоднокатаної штаби при регулюванні міжвалкових зазорів в клітях 1 і 2 (а) і у всіх клітях (б): 1 – передній кінець; 2 – задній кінець; 3 – ділянка зварного шва

5.4. Площинність штаб

Неплощинність листової сталі оцінюється амплітудою A на базі 1 м довжини штаби. Листи та штаби у рулонах шириною більше 500 мм підрозділяються на групи особливо високої (ПО), високої (ПВ), поліпшеної (ПП) і нормальної (ПН) площинності. Відхилення (A) від плоскої форми холоднокатаної листової сталі з межею міцності до 700 Н/мм^2 не повинні перевищувати таких значень (ширина штаб 1000...1500 мм) для (мм): ПО – 5; ПВ – 8; ПП – 12; ПН – 15.

Площинність штаби є однією із характеристик точності геометрії листової сталі і одним із головних показників технологічної придатності для обробки у неперервних агрегатах цехів холодної прокатки. Неплощинність та серпоподібність гарячекатаних штаб приводять до погіршення якості зварних швів, травмуванню штаби при змотуванні її у рулон і розмотуванні на стані холодної прокатки. Під час холодної прокатки неплощинність утруднює подачу штаби у стан і служить причиною обривів і утворення складок на штабі, що підвищує витрату валків і знижує продуктивність станів. Вихід

із строю робочих валків із-за нестійкості процесу холодної прокатки складає 60...90% від загальної кількості списаних валків, а простої стана по цій причині доходять до 30% від загального часу простоїв. При змотуванні неплоскої штаби одержується рулон з різною щільністю, що сприяє зварюванню витків при відпалі і утворенню зломів при дресируванні [32, 38]. Відсортування за дефектами форми у сучасних цехах холодної прокатки складає 0,17...0,5% від загальної кількості прокату. Поліпшення площинності гарячекатаних і холоднокатаних штаб досягається шляхом застосування раціональних початкових профілів бочок валків, теплового регулювання профілю робочих валків з секціонуванням на кожні 100...200 мм довжини валків, установленням на останніх клітках гідровигину робочих валків.

Необхідним для одержання плоскої форми штаб є додержання умови, яку можна представити у вигляді

$$\frac{\delta_{\text{по}}}{H} = \frac{\delta_{\text{п}}}{h}, \quad (5.25)$$

де $\delta_{\text{по}}$ і $\delta_{\text{п}}$ – поперечна різнотовщинність відповідно гарячекатаної і холоднокатаної штаб.

Зазначена умова відображає однакову ступінь зменшення товщини штаби і поперечної різнотовщинності. Але умова (5.25) являється недостатньою, так як штаба деформується у профільованих робочих валках і тому окружна швидкість за довжиною їх бочок буде різною. Тому додатковою умовою отримання планшетних (плоских) штаб буде рівність швидкостей поздовжніх перерізів за шириною штаби, тобто

$$v_{\text{ш}} = v_i(1 + S_i) = \text{const}, \quad (5.26)$$

де v_i – окружна швидкість валка в i -ому перерізі довжини бочки; S_i – випередження в i -ому перерізі штаби.

У зв'язку з цим у процесі прокатки впливають на умови формування форми штаби шляхом впливу на профілювання робочих валків з метою зміни співвідношення (5.25).

Основними видами неплоскості листа є хвилястості і коробоватість (рис.5.9). Хвилястість штаби виникає у випадку, коли деформація (ε) і коефіцієнт витягування (μ) на кромках

штаби більший, ніж у середині ширини, а коробоватість при великих значеннях ε і μ у середині ширини штаби. Причому, неплосциність виникає при невеликій різниці у значеннях μ на кромці і у середині. Так, під час прокатки штаб шириною 1250 мм неплосциність величиною $A = 8$ мм дістається при відносній різниці витягувань $\Delta\mu/\mu \approx 0,0004$ (де $\Delta\mu$ - різниця у коефіцієнтах витягувань на кромці і у середині ширини; μ - середній коефіцієнт витягування за шириною штаби). Різниця деформацій за шириною штаби (у пружній області деформацій) викликає різницю поздовжніх розтягувальних напружень за шириною. При цьому у штабі, яку прокатують із коробоватістю максимальні розтягувальні напруження діють на кромках, а якщо з хвилястістю, то у середині ширини. На цих особливостях основані сучасні методи вимірювання неплосциності штаби.

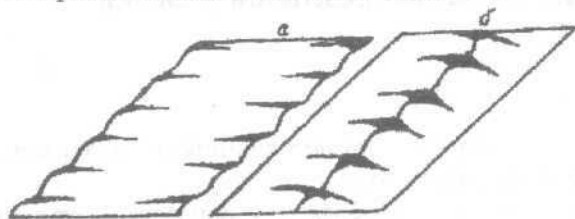


Рис. 5.9. Хвилястість (а) і коробоватість (б) штаби (листа)

Відповідно закону Гука залежність між деформаціями і напруженнями у кожному поздовжньому перерізі штаби має вигляд

$$\Delta\sigma_x = a \cdot E \cdot \Delta\mu/\mu,$$

де a – коефіцієнт ($a \approx 1,1 \dots 1,2$); E – модуль пружності матеріалу штаби; $\Delta\sigma_x$ – різниця напружень розтягнень за шириною штаби.

На існуючих станах (прокатних і дресирувальних) зменшення або ліквідація неплосциності досягається гідровигином робочих валків (рис. 5.10).

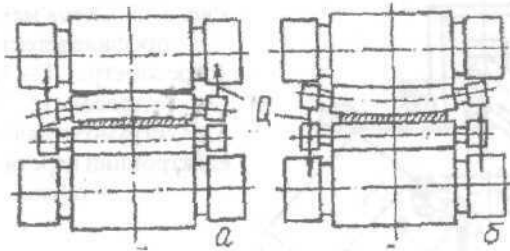


Рис. 5.10. Схема гідравлічного регулювання межвалкового зазора: а – додатковий вигин; б – противоізгиб

Ці пристрої працюють у системі автоматичного регулювання профілю і форми (САРПФ) штаби, яка включає в себе також блок теплового регулювання профілю валків при наявності місцевої неплоскостності штаби. Система працює спільно з профіледетектором (стресометром), який виміряє форму штаби через рівномірність розподілу за шириною поздовжніх розтягуючих напружень (5.11). Показання стресометру 2 передаються для візуального спостереження на табло 6 і блоки управління 5 формою штаби. Дослідження, які виконані на стані 2130 фірми Алкан (Канада), показують, що до встановлення САРПФ планшетність 58% штаб виходила за границі допусків і тільки 3% штаб були плоскими. Застосування обладнань гідровигину робочих валків з ручним управлінням дало змогу у 62% випадків одержати плоску штабу і тільки 10% штаб виходили за межі допусків, тобто брак зменшений майже у 6 раз. У результаті втілення автоматичного управління обладнаннями гідровигину і теплового регулювання профілю валків із використанням сигналів від стресометру забезпечено випуск плоскої штаби у ~ 100% випадків. Втілення системи дало змогу на 25% зменшити мінімальну товщину штаби і на таку ж саму величину зросла їх максимальна ширина. Подібні системи працюють у чистових клітках НШПС гарячої прокатки, тільки вимірювання поперечного профілю штаби здійснюються безконтактними рентгеновськими або ізотопними товщиномірами у різних точках ширини штаби.

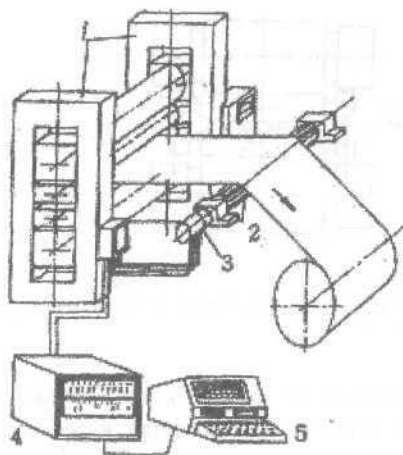


Рис. 5.11. Схема механічного профіледетектора (стрессометра): 1 – кліть; 2 – стрессометр; 3 – струмознімач; 4 – електронний перетворювач; 5 – табло.

5.5. Поперечна різнотовщинність штаби

Точність поперечного та поздовжнього перерізів листів (штаб) зумовлена відповідною різнотовщинністю, а форма штаби – її площинністю (планшетністю).

Поперечна різнотовщинність оцінюється різницею у товщинах між серединою і кромкою листа (рис. 4.27):

$$\delta_{\pi} = h_c - h_{\pi};$$

$$\delta_{\pi} = h_c - h_3.$$

де h_c – товщина у середині ширини штаби; h_{π} і h_3 – товщина кромки штаби відповідно збоку привода та завалки.

Звичайно поперечний профіль гарячекатаних листів (штаб) має випуклу форму, а мінімальна поперечна різнотовщинність зумовлена стійкістю штаби у валках проти зміщення на станину і можливістю прокатного стану. Часто $h_{\pi} \neq h_3$ і тоді штаба набуває випукло-клиновидний профіль поперечного перерізу. У цьому випадку має місце, наприклад, таке співвідношення товщин $h_c > h_3 > h_{\pi}$. Повністю клиновидному поперечному перерізу гарячекатаної штаби відповідає таке співвідношення $h_3 > h_c > h_{\pi}$.

У загальному випадку поперечна різнотовщинність штаби під час прокатки на нових валках визначається пружним прогином валків та їх початковим профілем бочок (випуклістю або угнутістю). На нових ("холодних") валках величина δ_n має більше значення порівняно із прокаткою на нагрітих валках з додатковою тепловою випуклістю. Усі фактори, які викликають збільшення сили прокатки, призводять до збільшення прогину валків і поперечної різнотовщинності штаб (наприклад, збільшення обтиску, шорсткості валків, зниження температури прокатки, підвищення початкової поперечної різнотовщинності штаби).

Збільшення ширини штаби при одній товщині (без зміни валків) завжди приводить до збільшення поперечної різнотовщинності. Так, при збільшенні ширини з 1500 до 2700 мм середня поперечна різнотовщинність листів збільшується з 0,144 до 0,244 мм (стан 3600 меткомбінату «Азовсталь», товщина листів 7,5...10 мм).

На неперервних широкоштабових станах гарячої прокатки на поперечний профіль листів діють ті ж самі причини, що і на товстолистових станах, однак разом із зменшенням товщини штаб до 1,5...6 мм зменшуються допустима і фактична поперечна різнотовщинність. Нормальною, яка забезпечує стійкість штаби у валках, є поперечна різнотовщинність у межах $\delta_n = 0,03...0,05$ мм. Однак внаслідок порушення технологічних вимог поперечна різнотовщинність у ряді випадків досягає $\delta_n \approx 0,1$ мм, особливо на кінцевих ділянках штаби. Головною причиною з'явлення такої різнотовщинності є прокатка широких штаб після прокатки вузьких, які зношують середину бочки робочих валків. У процесі прокатки часто відбувається зміщення штаби з осі стана, яка досягає 70...80 мм. У результаті цього товщини лівої (h_n) та правої (h_n) кромок виявляються різними. Різниця у товщині кромок штаб складає 0,02...0,08 мм (на станах старої конструкції). На товщину кромок також впливає клиновидності початкового сляба. Значні поперечна різнотовщинність та клиновидність перерізу штаби завжди приводять до збільшення ваги одного погонного метра листа, і відповідно, до витрат

металу. Для отримання необхідного поперечного профілю штаби у перших клітках чистової групи ШСГП використовують в основному профілювання валків. Виходячи із конкретних умов, на різних станах застосовують різні профілі бочок валкових вузлів (табл. 10.1). Угнутий профіль робочих валків компенсує теплову випуклість робочих валків, забезпечує стійкість штаби по осі стана і симетричний поперечний профіль.

Для отримання штаб з допустимою поперечною різнотовщинністю через кожні 2000...3000 т прокату металу виконують зміну зношених робочих валків чистової групи стана на нові, з необхідною величиною профілю бочок. У процесі зносу робочих валків їх профіль регулюють нерівномірною подачою води на поверхню із секційних колекторів (див. вище). На ділянки з великим зносом при цьому подають меншу кількість води, у результаті чого ця ділянка розігрівається і діаметр валка тут збільшується, компенсуючи учинений знос.

На ШСГП найбільш сучасним є регулювання міжвалкового зазору шляхом додаткового спрямованого вигину робочих або опорних валків. Найбільш часто застосовують гідравлічні пристрої вигину робочих валків у напрямку дії сили прокатки (рис. 5.10). У першому випадку додатковий вигин (а) збільшує зазор між валками у середині штаби і збільшує обтиск кромки, а у другому випадку – противовигин робочих валків (б) збільшує зазор на кромках та зменшує коефіцієнт витягування на кромках. Ефективним під час гарячої прокатки є регулювання поперечної різнотовщинності штаб шляхом осьового переміщення робочих валків. На сучасних ШСГП для отримання допустимої поперечної різнотовщинності одночасно використовують декілька каналів регулювання (станочне профілювання, теплове профілювання, вигин робочих валків).

Холодна прокатка штаб зменшує абсолютне значення поперечної різнотовщинності, але не повинно змінювати її відносну величину порівняно з гарячекатаним підкатом, тобто ступінь зменшення товщини штаби і різнотовщинності під час холодної прокатки однакові:

$$\frac{H_0}{h_0} = \frac{\delta_{ПО}}{\delta_{П}}$$

де H_0 і h_0 – товщина по осі відповідно початкового гарячекатаного підкату і штаби після холодної прокатки; $\delta_{ПО}$ і $\delta_{П}$ – поперечна різнотовщинність відповідно гарячекатаного підкату і холоднокатаної штаби.

Таблиця 5.1. Станочне профілювання валків клітей чистових груп ШСГП

Стан	Опорні валки		Робочі валки	
	верхні	нижні	верхні	нижні
1680 («Запоріжсталь»)	0...0,3	0	-0,15...0	0
1700 Маріупольський меткомбінат	0	0...0,2	-0,3...0	-0,2...0,05
1700 (Карагандинський меткомбінат)	0,2	0	-0,15... -0,85	0
2000 Череповецький меткомбінат	0,8...1,2	0,8...1,2	-0,3... -1,3	-0,3...-1,0

Недотримання умов приводить до одержання штаб неплоскої форми (коробоватих, хвилястих, серповидних).

Додатковий матеріал що до виробництва штаб, умов роботи валків, отримання точних штаб надано у бібліографічному списку.