

621.771

Н 632

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

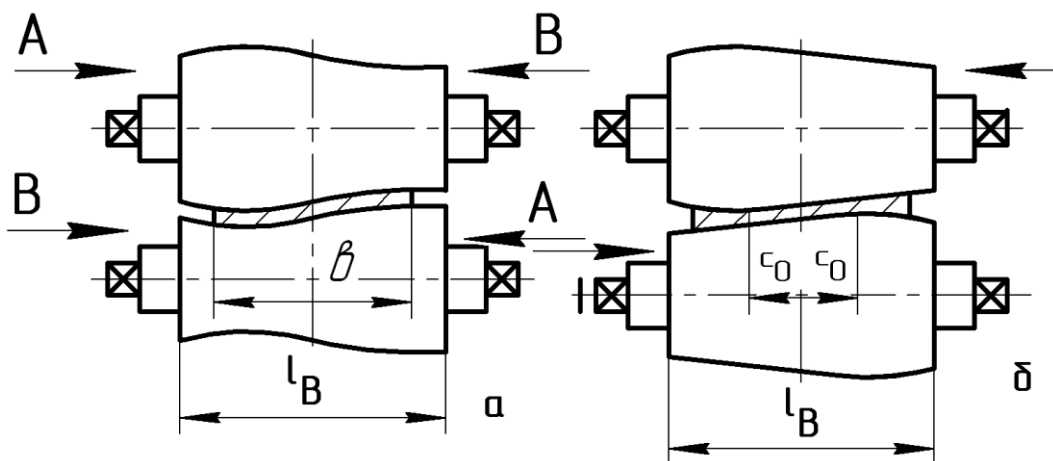


В. О. Ніколаєв

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ТОЧНОЇ ПРОКАТКИ ШТАБ

Навчальний посібник

*для студентів ЗДІА
металургійних спеціальностей
денної та заочної форм навчання*



Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

*Затверджено до друку
рішенням вченої ради ЗДІА
протокол № 15 від 20.12.2016р.*

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ТОЧНОЇ ПРОКАТКИ ШТАБ

Навчальний посібник

*для студентів ЗДІА
металургійних спеціальностей
денної та заочної форм навчання*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ОМТ,
протокол № 1 від 29.08.2016р.*

Запоріжжя
ЗДІА
2017
1

УДК 621.771
Н 632

В. О. Ніколаєв, д.т.н., професор

Відповідальний за випуск: *в.о. зав. кафедри ОМТ,
доцент В. М. Проценко*

Рецензенти:

В. В. Чигиринський, д.т.н., професор Запорізького національного технічного університету;

І. Ю. Приходько, д.т.н., Національна академія наук України;

М. Г. Прищип, к.т.н., професор Запорізької державної інженерної академії.

Ніколаєв В.О.

Н 632 Теорія і технологія точної прокатки штаб: навчальний посібник для студентів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форм навчання / Ніколаєв В. О.; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – 100 с.

У навчальному посібнику представлені зведення про вплив сили розтягування на пружні деформації прокатної кліті, визначення модулів жорсткості кліті штаби, яку прокатають. Розглянуті причини появи поперечної і подовжньої різнововщинності штаби при гарячому проектуванні і шляхи зменшення її до раціональних величин. Виконано аналіз причин появи неплоскостності штаб і методи впливу на її параметри. Приведені описи різних способів регулювання міжвалкового зазору в кліті кварто.

Відмічено, що одним із способів впливу на міжвалковий зазор є раціональне профілювання опорних і робочих валків. У зв'язку з цим в навчальному посібнику приведені необхідні данні і формули для розрахунку погонних сил на міжвалковому контакті і на контакті штаби з робочим валком, а також для розрахунку прогинів і величини профілювання валків. Наведені приклади раціонального профілювання валків.

Навчальний посібник рекомендується для студентів - магістрів, що вивчають дисципліни за освітньою програмою «Прокатне і волочильне виробництво» (спеціальність «Металургія») «Теорія і технологія точної прокатки штаб» і «Профілювання валків штабових станів».

© Ніколаєв В.О., 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПОПЕРЕЧНА РІЗНОТОВЩИННІСТЬ ШТАБ.....	5
1.1 Визначення товщини штаби (листа) при прокатуванні.....	5
1.2 Поперечна різнотовщинність штаб (листів).....	8
1.3 Формування поперечної різнотовщинності штаб.....	9
<u>1.4 Вигин та профілювання валків.....</u>	<u>11</u>
1.5 Зношення валків і поперечна різнотовщинність штаб.....	14
1.6 Підвищення експлуатаційної стійкості валків.....	16
1.7 Спеціальне профілювання робочих валків для зменшення поперечної різнотовщинності штаб.....	20
1.8 Площинність штаб.....	21
1.9 Спосіб регулювання обтиснення по ширині штаби.....	25
2 ПОДОВЖНЯ РІЗНОТОВЩИННІСТЬ ШТАБИ.....	29
2.1 Метод розрахунку параметрів подовжньої різнотовщинності штаби.....	29
2.2 Деякі відмінності сучасної і традиційної технологій гарячої прокатки штаб.....	32
2.3 Формування подовжньої різнотовщинності штаби.....	35
2.4 Способи впливу на подовжню різнотовщинність штаби.....	40
2.5 Нова технологія виробництва точної гарячекатаної штаби.....	47
2.6.Особливості холодної прокатки штаб на неперервних станах.....	51
2.7 Подовжня різнотовщинність штаб при холодному прокатуванні.....	53
3. ПОГОННІ СИЛИ ТА ПРОГІБ ВАЛКІВ КЛІТІ КВАРТО.....	58
3.1 Погонні сили на міжвалковому контактї.....	58
3.2 Погонні сили на контактї робочих валків зі штабою.....	64
3.3 Експериментальні дослідження коефіцієнта нерівномірності n_1	66
3.4 Теоретичне визначення нерівномірності погонних сил по ширині штаби.....	67
3.5 Формули для розрахунку прогинів валків.....	73
3.6 Вплив деяких чинників на профілювання робочих валків.....	75
4 ПРОФІЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ.....	78
4.1 Тепловий профіль і зношення робочих валків.....	78
4.2 Верстатне профілювання валків клітей кварто.....	84
4.3 Ефективність раціонального профілювання валків кліті кварто.....	86
4.4 Геометричні параметри і матеріал валків для прокатки штаб.....	90
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	94

ВСТУП

За останні роки відбулися суттєві зміни в технології та обладнанні листопрокатного виробництва, спрямовані головним чином на скорочення витрат металу, підвищення якості продукції. В галузі виробництва слябів практично повністю відмовляються від виробництва їх на слябінгах і блюмінгах-слябінгах, а застосовують машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Проектують та створюють великі товстолистові стани із довжиною бочки 3600...5500 мм при виробництві листів для багатотоннажного флоту і труб великого діаметру.

Для прокатки тонколистової сталі у гарячому стані застосовують стани з новими конструкціями клітей, які забезпечують безпрограмний процес виробництва штаб, пристрої та системи контролю і регулювання точності поперечного та поздовжнього профілів перерізів. Експлуатують литейно - прокатні агрегати (ЛПА) для отримання тонкої штаби із тонких слябів та рідкого металу.

Подальший розвиток отримало виробництво холоднокатаних штаб. З'явилися принципово нові рішення забезпечення прокатки високоточних і планшетних штаб на станах порулонної і безперервної прокатки. Впроваджуються суміщені лінії: травлення – прокатка, відпал – дресирування – обробка та інші. У сучасному цеху увесь процес від початку і до кінця керується обчислювальними машинами (КОМ), у які включені локальні системи керування окремими операціями.

Споживання листової продукції тим вище, чим значніший рівень індустріалізації та економічного розвитку країни. Наприклад, у США, Японії, ФРН доля листової продукції у загальному об'ємі виробництва прокату складає 55...67%. Найбільш висока доля споживання листового металу в електротехнічній промисловості, машинобудуванні для легкої та харчової промисловості, у автомобілебудуванні і у сільгосп-машинобудуванні і у суднобудуванні.

Товсті листи прокатують із зливків і слябів у гарячому стані на реверсивних станах з послідовним розташуванням 2-3-х клітей. Довжина бочок валків таких станів - $L = 2000...5500$ мм. На цих же станах прокатують і плити товщиною $h = 50...200$ мм. Товстолистову сталь з товщиною $h = 4...16$ мм і шириною до 2300 мм прокатують із слябів на станах з послідовним розташуванням клітей; на неперервних станах при температурах гарячої деформації ($1200...850^{\circ}\text{C}$). Тонколистову сталь з товщиною $h = 1,2...3,9$ мм у гарячому стані прокатують на неперервних широкоштабових станах, на реверсивних станах з пічними моталками і на планетарних станах. Тонколистову маловуглецеву сталь з $h = 0,5...2$ мм прокатують у холодному стані із гарячекатаних штаб у рулонах на неперервних (безперервних) і реверсивних станах з чотирьохвалковими клітями. Штаби із легованої сталі – на реверсивних багатовалкових станах.

В різних галузях промисловості розширилось застосування тонких листів із спеціальними покриттями для виготовлення корозійностійких деталей

(оцинковані, освинцьовані, алюмінієвані листи), листову сталь з покриттям із полівінілхлориду, поліетилену та інш. органічних матеріалів. Із листової сталі в широких масштабах виготовляють зварні труби, гнуті профілі, предмети побутової техніки. Листову і штабову сталь отримують на станах гарячої та холодної прокатки, розмір яких характеризує довжина бочки валків. При цьому максимальна ширина листів (штаб) складає 0,85...0,9 від довжини бочки валків. Умовно листову продукцію розподіляють за товщиною (мм) на декілька груп: плити - > 50 ; товсті листи (штаби) - $4...50$; тонколистова сталь - $0,5...3,9$; жерсть - $0,08...0,36$; фольга - $< 0,07$.

Підвищення експлуатаційної стійкості прокатних валків і якості поперечного профілю штаб забезпечується застосуванням нових матеріалів для їх виготовлення, новими типами профілювань їх бочок і новими системами (способами) регулювання міжвалкового зазору.

1 ПОПЕРЕЧНА РІЗНОТОВЩИННІСТЬ ШТАБ

1.1 Визначення товщини штаби (листа) при прокатуванні

Прокатку плоского прокату (штаб, листів) здійснюють в основному в клітках кварто, що містять опорні і робочі валки. Для зниження сили прокатки діаметр робочих валків завжди в 2...3 разу менше діаметру опорних валків. Для отримання необхідної товщини штаби заздалегідь перед початком прокатки між робочими валками встановлюють відповідний початковий зазор. Початковий зазор завжди менше фактичної товщини штаби на величину пружини (пружній деформації) кліті.

Дійсно, під дією сили прокатки деталі прокатної кліті пружно деформуються (стійки піддаються розтягуванню, подушки, підшипники, натискні гвинти, гайки - стискаються), усуваються зазори в системі натискний гвинт-подушки. Розмір і форма зазору між робочими валками змінюються в порівнянні з початковими, а отримана штаба придбаває відповідні товщину і поперечну різнотовщинність.

Визначення товщини штаби на виході з кліті виконують з використанням роботи [1]. 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 силу при прокатуванні серії штаб. Побудувавши залежність $P = f(\delta_{кл})$ можна визначити жорсткість кліті (рис. 1.1) (де $\delta_{кл}$ - пружна деформація кліті). Величина початкового зазору спільно з величиною пружної деформації кліті визначають товщину кінцевої штаби h

$$h = S_0 + S_1 + P/M_{кл} , \quad (1.1)$$

де S_0 - початковий зазор між валками в ненавантаженому стані кліті; S_1 - сума початкових зазорів в 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.1.1) пружній лінії робочої кліті і визначається з лінійного рівняння с використанням експериментальних даних P і $\Delta\delta_{кл}$ (МН/мм)

$$M_{кл} = \operatorname{tg}\alpha = \Delta P / \Delta\delta_{кл} = P / \delta_{кл}, \quad (1.2)$$

де $\Delta\delta_{кл}$ - приріст пружної деформації кліті при зміні сили на величину

$$\Delta P = P - P_0.$$

Модуль жорсткості кліті з формули (1.2) відповідає повній величині пружної деформації кліті при дії сили

$$\delta_{кл} = P / M_{кл}, \quad (1.3),$$

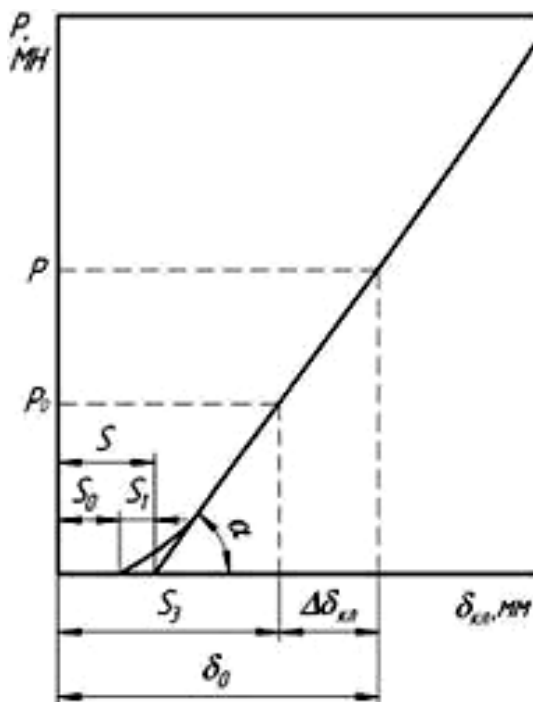
де P - сила, діюча на кліть; P_0 - деяке менше значення сили; $\delta_{кл}$ - повна пружна деформація кліті..

Позначимо загальний проміжок в системі робочі валяння - натискний гвинт $S = S_0 + S_1$ і запишемо лінійну залежність між P і h (з урахуванням формули (1.1)) у виді

$$h = S + \delta_{кл} = S + P / M_{кл}. \quad (1.4)$$

Це рівняння носить назву рівняння Сімса – Головіна і дозволяє визначити можливу товщину штаби після прокатки..

Так, наприклад, при силі прокатки $P=10$ МН, модулі жорсткості кліті 4МН (паспортні дані), зазорі $S=0$ і повній пружній деформації кліті з формули (1.3) $\delta_{кл}=2,5$ мм в даному випадку можна отримати штабу з мінімальною товщиною $h=2,5$ мм. Якщо збільшимо зазор до $S=+1$ мм, отримаємо штабу завтовшки $h>2,5$ мм, а якщо зменшимо зазор на $S=-1,0$ мм, то отримаємо штабу завтовшки менше 2,5мм (валки стислі в «забій»).



Експериментально і теоретично встановлені питомі складові пружній деформації кліті (%):

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

Рисунок 1.1 - Залежність між силою P і пружиною кліті

Як впливає з рис.1.1 в початковий період навантаження кліті при початковому зазорі відбувається вибірка зазорів S в деталях кліті при нелінійній зміні нормальної сили. Надалі, збільшення сили P викликає лінійне

зростання пружної деформації кліті ($\delta_{кл}$). Як впливає з дослідних даних, найбільшу деформацію отримують валки внаслідок прогину і сплюснення на міжвалковим контакті, просідання опорних валків (переміщення у вертикальній площині). Установочний (початковий) зазор S може мати наступні величини: $S = 0$; $S > 0$; $S < 0$. Співвідношення $S > 0$ дійсно при прокатуванні товстих і середніх по товщині штаб, коли товщина штаби більше величини пружної деформації кліті, а інші співвідношення ($S=0$ і $S<0$) – при прокатуванні тонких штаб.

Так, в умовах холодної прокатки, як правило, $S < 0$. В цьому випадку, під дією натискних гвинтів (плунжера гідропристрою) валки при їх обертанні стискаються «в забій» і тоді маємо (рис.1.1)

$$\Delta\delta_{кл} = \delta_0 - S_3 = \frac{P}{M_{кл}} - \frac{P_0}{M_{кл}} = \frac{P - P_0}{M_{кл}}. \quad (1.7)$$

де S_3 - попередній «забій» валків; δ_0 - сумарна деформація кліті; P_3 - сила при стискуванні валків.

Ця формула і визначає товщину після прокатки в задалегідь стислих валках

$$h = \Delta\delta_{кл} = \frac{P - P_0}{M_{кл}}. \quad (1.8)$$

Формули (1.4) і (1.8) дають можливість визначити товщину штаби за наявності експериментальних даних S , P і P_0 (при відомому значенні $M_{кл}$). Модуль жорсткості кліті залежить від розмірів стана і ширини штаби і за даними різних досліджень для клітей неперервних станів гарячої прокатки рівний ($M_{кл}$, МН/мм)[31]:

- стан 1700 - КарМК - 3,6 ... 3,9;
- стан 2000 - НЛМК - 5,5 ... 6,0;
- стан 1680 - ЗМК - 3,06 ... 3,62.

Модулі жорсткості клітей неперервних станів холодної прокатки дорівнюють ($M_{кл}$, МН/мм) [31]:

- стан 1700 КарМК - 4,2;
- стан 1200 НЛМК - 4,2 . 4,5;
- стан 1680 ЗМК - 3,06 . 3,16;
- стан 1700 (проект)- 5,18 . 5,8;

Примітка: КарМК - Карагандинський меткомбінат; НЛМК - Новолипецький меткомбінат; ЗМК - меткомбінат "Запоріжсталь".

Більші значення $M_{кл}$ відповідають максимальній ширині штаби для цього стана. Чим більше величина модуля жорсткості кліті, тим менше вертикальна пружна деформація кліті і зміна міжвалкового зазору.

1.2 Поперечна різнотовщинність штаб (листів)

Готову продукцію у вигляді штаб завтовшки $h=0,4...16\text{мм}$ випускають в рулонах на неперервних і реверсивних станах, а листи завтовшки $h=4...60\text{мм}$ і довжиною $L=10...60\text{м}$. У гарячому стані прокатують штаби завтовшки $h=1...16\text{мм}$ на широкоштабових станах гарячої прокатки (ШСГП), працюючих самостійно або в складі з ливарно-прокатними агрегатами (ЛПА)) [3,4]. Штаби прокатують в клітках кварто в робочих валках діаметром $620...800\text{мм}$ (в чистових групах) і з опорними валками діаметром $1200...1600\text{мм}$.

Робочі валки виготовляють з легованого чавуну з вибіленим шаром і твердістю до 80 HSD (по Шору) (чистова група) або із спеціальних сталей (чорнова група), а опорні - з легової сталі [4-6].

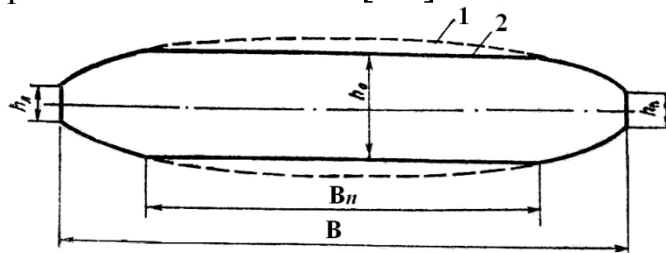


Рисунок 1.2- Від поперечної різнотовщинності штаби при гарячому 1 та холодному 2 прокатуванні

При прокатуванні в кожній клітці форма поперечного перерізу штаби відрізняється від прямокутної. Як правило штаба отримує опуклий поперечний переріз (рис.1.2), але при порушенні налаштування валків можливе отримання і клиновидної форми штаби. Проте останній варіант не є характерним.

Поперечна різнотовщинність штаби формується при гарячому прокатуванні штаб (листів) і величина її визначається, при різній товщині кромки, таким чином

$$\delta h_{\Pi} = h_c - 0,5(h_l + h_p), \quad (1.9)$$

де h_c - товщина штаби по вісі; h_l і h_p - товщина левої і правої кромки відповідно на відстані 40 мм від кромки.

У загальному випадку величина поперечної різнотовщинності δh_{Π} не повинна перевищувати плюсовий допуск по товщині тонкої штаби (листа) (до 5...8% від її товщини). Для листів завтовшки 5,5...12мм плюсовий допуск складає 4,5...2,5%, а мінусовий - 11,5...6,5%. Під плюсовим допуском розуміють величину відхилення від заданої (номінальної) товщини штаби (листа) при прокатуванні у бік її збільшення

$$h = h_n \pm \Delta,$$

де h_n - номінальна товщина штаби (листа); Δ - допуск по товщині: (+) - позитивний допуск, (-) - мінусовий допуск.

У практичних умовах на ШСГП переважно прокатують штаби з товщиною по мінусовому допуску при збереженні обмеженої її поперечної різнотовщинності. Позитивною стороною прокатки штаб на мінус являється забезпечення в подальшому зниження маси машин і побутових виробів, які

виготовляються з них, . Проте при прокатуванні штаб на мінус збільшується час прокатки за рахунок збільшення довжини готової штаби, а отже, знижується продуктивність стана.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при гарячому прокатуванні тонких штаб (2...4мм) поперечна різнотовщинність знаходиться в межах 0,02...0,08мм, але штаби, що йдуть на подальшу холодну прокатку, в усіх випадках повинні мати поперечну різнотовщинність не вище $\delta_{\text{П}}=0,03...0,05\text{мм}$, що забезпечує сприятливі умови отримання холодно-катаних штаб.

1.3 Формування поперечної різнотовщинності штаб

Вище відмічали, що гарячу і холодну прокатку штаб виконують, як правило, в чотиривалкових клітях (клітях кварто) з опорними і робочими валками. При прокатуванні штаб в робочих валках відбуваються зменшення товщини штаби, вигин опорних валків і пружні деформації робочих валків. Пружні деформації робочих валків включають прогин спільно з опорним валком і власний прогин - пружну деформацію у контакті із штабою.

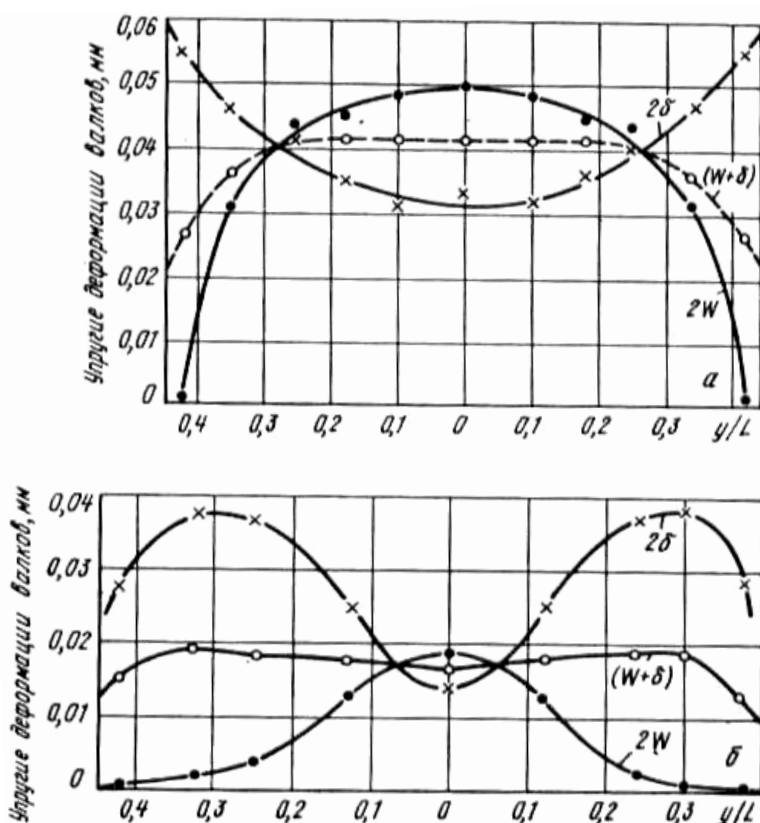


Рисунок 1.3 - Пружні деформації валків при прокатуванні штаб: а- $H=1,5\text{мм}$ (дресирувальний двохвалковий стан 1700, діаметр валків 900мм, ширина штаби $B=1250\text{мм}$, матеріал штаб сталь марки 08кп); б- $H=1,88\text{мм}$ (двохвалкова кліть 350, діаметр валків 250мм, ширина штаби $B=200\text{мм}$, довжина 350мм, матеріал штаб дюралюміній марки Д16)

На рис.1.3,а представлени результати досліджень параметрів пружних деформацій валків дресирувальній кліті 1700 ПАО

«Запоріжсталь», отриманих при прокатуванні сталевих листів з дюралюмінієвими вставками (кінцева товщина штаби $h=1,43...1,46\text{мм}$, відносне обтиснення $\varepsilon=2,3...4,5\%$) і двохвалковій кліті 350 при прокатуванні листів з дюралюмінію (кінцева товщина $h=1,37...1,41\text{мм}$, $\varepsilon=25...27\%$) з м'якими свинцевими вставками [7-10]. Характеристики пружних деформацій

представлені залежно від відносної ширини штаби y/V .

Дослідження дозволили встановити фактичний характер пружних деформацій валків безпосередньо у контакті зі штабою (рис.1.3). Як впливає з отриманих даних, в обох випадках максимальне значення прогину двох валків $2W$ відповідає середині ширини B штаби і складає $2W \approx 0,05$ мм. у першому випадку ($B/L=0,74$) і $2W \approx 0,02$ мм ($B/L=0,57$) в другому випадку. Наявність прогину призводить до збільшення міжвалкового зазору і поперечної різнотовщинності штаби. .

Одночасно з прогином відбувається радіальне пружне стискування 2δ двох валків, яке порівняно з величиною прогинів, і нерівномірно по ширині штаби (рис.1.3). Ця нерівномірність обумовлена характером розподілу по ширині штаби відносного (абсолютного) обтиснення і отже, середнього нормального контактного напруження, а також погонних сил на контакті (МН/см)

$$P_i = \frac{P_i}{B_i}, \quad (1.10)$$

де P_i - сила на невеликій ділянці шириною B_i контакту штаби з валком.

При деформації широкої штаби ($B/L=0,74$) (рис.1.3,а) пружне стискування валків максимальне на крайових ділянках листа, що обумовлено затисканням їх при прогині валків і, разом з цим, збільшенням обтиснення кромки при одночасному підвищенні нормального контактного напруження (погонних сил).

Мінімальні обтиснення, погонні сили і пружні деформації валків мають місце в середині ширини листа, де параметр 2δ дорівнює всього $2\delta \approx 0,03$ мм, що істотно менше його власного прогину ($2W=0,05$ мм). Активна твірна валків на контакті з листом, що формує поперечну різнотовщинність листа, визначається по формулі (для одного валка)(мм)

$$\delta_{Ai} = W_i + \delta_i, \text{ мм.}$$

З рис.1.3,а видно, що контур поперечного перерізу листа відповідає параболі вищого порядку (рис.1.3, крива 2), а поперечна різнотовщинність листа складає $\delta h_{II} = 2\delta_A \approx 0,02 \cdot 2 = 0,04$ мм.

Інші закономірності зміни досліджуваних параметрів мають місце при деформації листа шириною $B=200$ мм ($B/L=0,57$) (рис.1.3,б). По-перше, пружне сплющення (2δ) змінюється по опукло-увігнутій кривій з максимумом при $y/B=0,6$. На середній ділянці ширини листа ($y/B < 0,6$) параметр 2δ зменшується у зв'язку зі зменшенням обтиснення і погонних сил, як і на рис.1.3,а. Максимум параметра 2δ обумовлений підвищенням нормальних контактних напружені внаслідок затискання металу валками і збільшення обтиснення.

Зниження параметра 2δ на ділянці $y/B > 0,6$ обумовлено зменшенням погонних сил внаслідок появи поперечної течії металу, зменшення

коефіцієнту витягання i , отже, появи напружень розтягування на кромках листа, що призводить до зменшення нормальних контактних напружень [11]. Увігнута крива прогину валка ($2W$), на наш погляд обумовлена високою жорсткістю опорного вузла в цій кліті, коли кінцеві ділянки валків практично не переміщуються. Активна твірна валка ($\delta_A < 0,01 \text{ мм}$) має форму, близьку до параболи вищого порядку, і формує поперечну різнотовщинність листа в межах $\delta h_{\text{П}} \approx 0,015 \text{ мм}$.

Таким чином, поперечна різнотовщинність штаби в осередку деформації формується нерівномірністю розподілу обтиснень по її ширині, що викликає нерівномірний розподіл по ширині середнього нормального напруження і погонних сил, що визначають параметри активної твірної і поперечну різнотовщинність штаби. У свою чергу нерівномірність розподілу обтиснень по ширині штаби залежить в основному від наступних чинників:

- величини сили прокатки;
- діаметром і довжиною бочки валків, тобто від величини прогину валків;
- мірою вироблення валків;
- величиною і формою профілювання валків;
- поперечній різнотовщиною штаби до прокатки;
- нерівномірністю розподілу температури по ширині штаби.

1.4 Вигин та профілювання валків

Вище відмічали, що поперечна різнотовщинність штаби (листа) формується при гарячій прокатки. Одним з основних чинників, що впливають на поперечну різнотовщинність штаб **являються величини прогинів опорного і робочого валків** [4,12,13], які визначається наступними параметрами (рис.1.4):

- опорний валок: P, E, G, J, L, D, B ;
- робочий валок: $P, E, G, J, L, D, B, n, n_1$,

де E, G, J - відповідно модулі пружності, зрушення і інерції валків; L, D, B - відповідно довжина, діаметр валка і ширина штаби; n - коефіцієнт нерівномірності розподілу погонних сил на міжвалковому контакті (МВК); n_1 - коефіцієнт нерівномірності розподілу погонних сил на контакті штаби і валків (на пружно - пластичному контакті: ППК). Нерівномірність розподілу погонних сил на контактах валків кліті кварто оцінимо коефіцієнтами n (МВК) і n_1 (ППК):

$$n = q_1/q_0; \quad n_1 = p_1/p_0, \quad (1.11)$$

де q_1 і q_0 - відповідно погонні сили на краю і в середині міжвалкового контакту; p_1 і p_0 - відповідно погонні сили на краю і в середині пружно - пластичного контакту (рис.1.4).

Математичні формули для розрахунку прогинів валків і їх аналіз дано в роботах [4,12,13]. Тут відмітимо, що із збільшенням прогинів валків поперечна різнотовщинність штаб збільшується. Отже, усі чинники, які визначають

збільшення прогинів валків, збільшують поперечну різнотов-щинність штаб. Для опорного і робочого валків до таких чинників відносяться сила прокатки P і довжина бочки валка L . Збільшення ширини штаби B , коефіцієнтів n і n_1 , а також і інших параметрів (D, E, G, J) сприяють зменшенню прогинів валків, а отже, і поперечній різнотовщинності штаби..

Для компенсації прогинів валків на станах холодної прокатки застосовують, як правило, **робочі валки із задалегідь виготовленою початковою опуклістю** в межах $f_p=0,05...0,4\text{мм}$. На станах гарячої прокатки робочі валки в початковому (холодному) стані шліфують на угнутість $f_p=(0,05...0,15\text{мм}$, але на початку прокатки середина їх бочок розігрівається до $65...75^\circ\text{C}$ і профіль твірної набирає опуклого вигляду до $f_p=0,05...0,3\text{мм}$, необхідною для компенсації прогину валків (на деяких станах перед завалкою середню частину довжини робочих валків спеціально підігрівають на індукційних установках для отримання опуклого профілю).

Нижче приведено формули для попереднього визначення необхідної опуклості робочого валка [12].

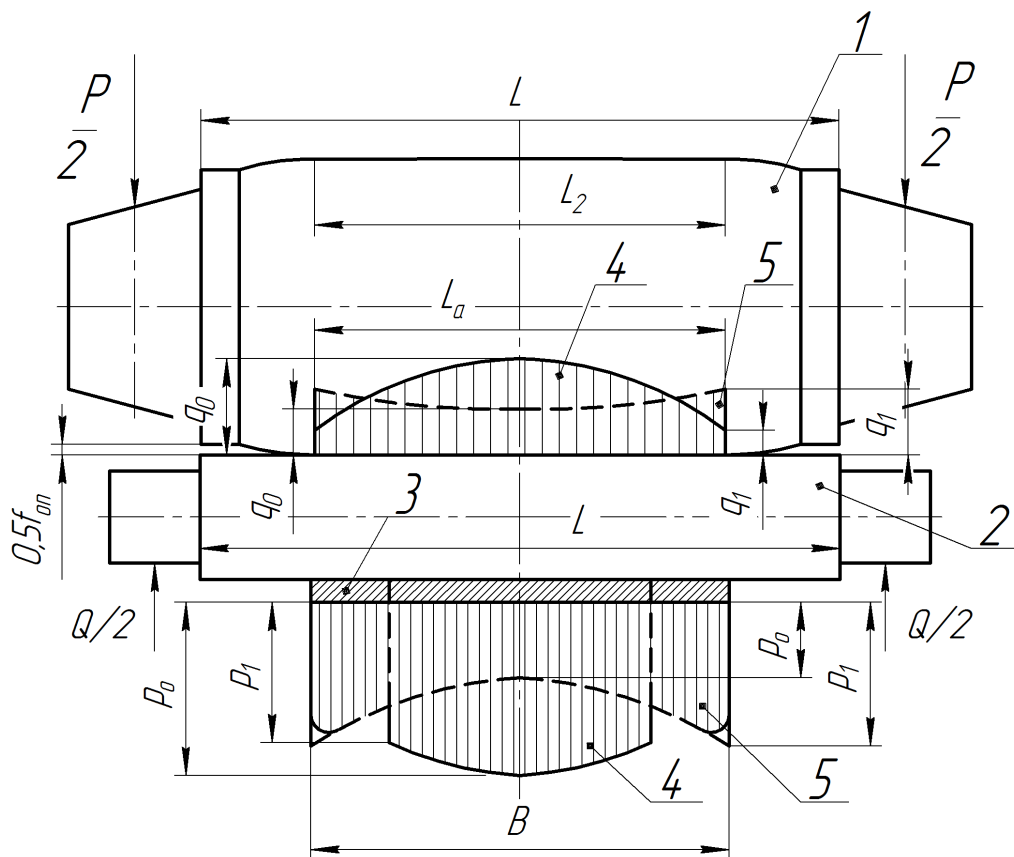


Рисунок 1.4- - Нерівномірний розподіл погонних сил $q(y)$ між новими циліндричними опорним і робочим валками, а також робочим валком і штабою $p(y)$: 1 - опорний валок; 2 - робочий валок; 3 - штаба; 4 - епюри $p(y)$ і $q(y)$ при прокатуванні вузьких штаб; 5 - теж при прокатуванні широких штаб (B -ширина штаби; L - довжина бочки валка; L_2 - активна довжина бочки без скосів; L_a - змінна довжина міжвалкового контакту; Q - сила протипрогину робочих валків; $f_{оп}$ - опуклість опорного валка)

$$f_p = \left[W_1 + W_2 - \frac{\delta h_{\Pi}}{2} \left(\frac{L_a}{B} \right)^2 \right] \left(\frac{L}{L_a} \right)^2 - \frac{1}{2} f_{OP} - \delta_B - f_T, \quad (1.12)$$

де W_1, W_2 - прогини відповідно робочого і опорного валків (мм); δh_{Π} - поперечна різнотовщинність штаби, що допускається, в цій кліті (мм); f_T - теплова опуклість на довжині валка (робочого або опорного); δ_B - зношення опорного валка по осі на діаметр (середня між двома валками).

Параметри W_1, W_2, f_T визначаються розрахунком [4,12,13] (інші параметри входять до числа початкових. Як впливає з формули (1.12), усі складові з позитивним знаком змушують збільшувати компенсуючу опуклість робочого валка, а з негативним знаком - її зменшувати. Так, наприклад, при збільшенні поперечної різнотовщинності δh_{Π} , що допускається, величину опуклості робочого валка f_p слід зменшувати. У практичних умовах величина початкової опуклості при постійних параметрах кліті і нових опорних валках обумовлена, головним чином, шириною штаби.

На нових опорних валках в першу чергу необхідно прокатувати широкі штаби ($B/L=0,75\dots0,85$), потім вузькі штаби (з $B/L=0,55\dots0,65$). Це зменшує нерівномірність зношення робочих і опорних валків. У міру зносу робочих валків на протязі зміни їх профіль коригують шляхом збільшення теплової опуклості f_T (зменшення подання води або мастильно-охолоджувальній рідині емульсії на середню ділянку бочки робочого валка). Теплове регулювання профілю робочих валків застосовують також і у разі невідповідності початкового їх профілювання умовам отримання необхідного (якісного) поперечного профілю штаби (листа).

Дослідження [12] показують, що застосування робочих валків з опуклою формою твірної у вигляді квадратичної параболи викликає підвищене зношення на середній ділянці довжини бочки опорного валка внаслідок появи більших нормальних контактних напружень. Одночасно зношується і сама опуклість робочого валка, що змінює форму і розміри зазору між робочими валками, обумовлюючи необхідність постійного регулювання його параметрів.

Наявність опуклості, и відповідно, робочого валка обумовлює нерівномірність окружних швидкостей, що негативно позначається на площинності штаб. Таким чином, необхідно зменшувати розрахункову опуклість робочого валка шляхом, наприклад, перенесення частини її на опорний валок, а твірну опорного валка виконувати у вигляді параболи вищого порядку (рис.1.5, в). Як впливає з рис.1.5,а, при циліндричному профілюванні опорного і робочого валків первинний контакт відбувається по усій довжині їх бочок, що обумовлює порівняно рівномірний розподіл погонних сил і зношення їх поверхонь контакту

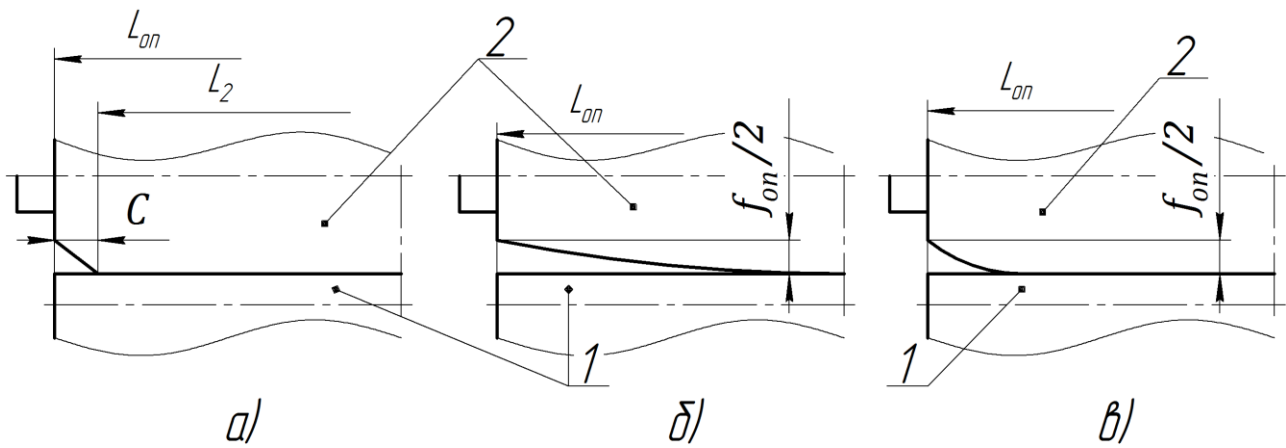


Рисунок 1.5 - Варіанти профілювання бочки опорного валка : а - циліндричний профіль з крайовим скосом C ; б - опуклий параболічний профіль ($m=2$); в - параболічний профіль з $m=4-8$; 1 - робочий валок з циліндричним профілем твірної ; 2 - опорний валок; C - довжина крайового скосу (урізу) (m - показник міри опуклого профілю валка)

Проте таке профілювання не може компенсувати прогин валків. Профілювання на рис.1.5, б здатне компенсувати прогин валків, але опуклість одного з валків обумовлює на середній ділянці бочок концентрацію нормальних напружені, що викликає підвищений знос контактної поверхневого шару валків. Параболічний профіль опорного валка з $m=4-8$ (рис.1.5, в) і зі змінною кривизною по довжині бочки забезпечує компенсацію прогинів валків і зменшує нерівномірність їх зносу.

1.5 Зношення валків і поперечна різнотовщинність штаб

Опорні і, особливо, робочі валки широкоштабових станів працюють при значних температурних і контактних напруженнях, інтенсивному відносному ковзанні на контактних поверхнях, значній нерівномірності зношення валків по довжині бочок.

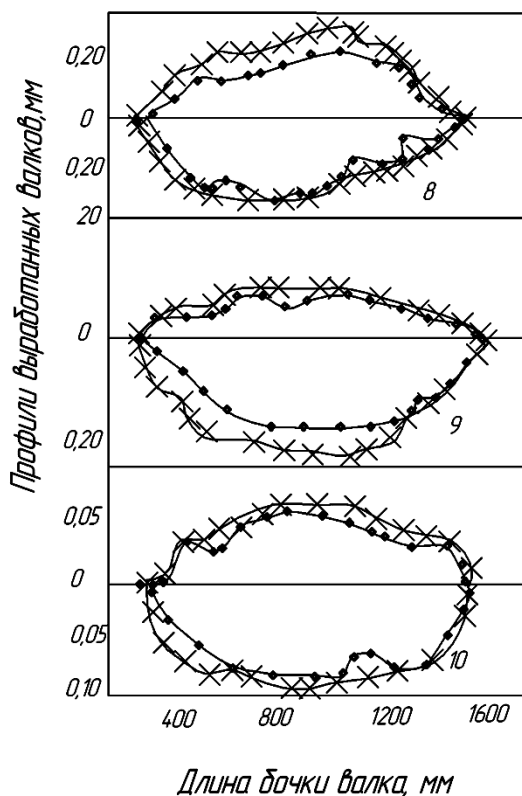


Рисунок 1.6 - Профілі зношених робочих чавунних валків з вибіленим шаром (ЛПХН, д -63...72) в холодному стані (кліті №№ 8-10). Початкові (холодні) профілі в клітях № 8, 10 - $f_p=0/0$; у кліті № 9 - $f_p=-0,1/0$. Об'єм прокату $G = 2100 - 2400$ т (ШСГП 1680, ПАО «Запоріж-сталь»)[5]

По конструктивних або з технологічних причин виникають несиметричні висотні деформації по ширині штаби що роблять свій вплив на стабільність служби валків і умов прокатки. Зносостійкість робочих і опорних валків значною мірою впливає на поперечну різнотовщинність штабовий сталі. Як видно з рис.1.6, робочі валки в клітях №№8-10 в процесі експлуатації отримують максимальне зношення в середній частині довжини бочок. Однією з причин появи такого зношення є напруження розтягування в контактних шарах валків, що з'являються при їх вигині, і що знижують міцність поверхневого шару. На краях штаби менше прогин валка, менше напруження розтягування в шарах валків і менше знос валка.

При цьому, чим більше сила прокатки і прогин валків, тим більше їх зношення. Саме тому в кліті №8, де сила прокатки більше, зношення істотно більше ($\delta_p = 0,2...0,28\text{мм}$), чим в клітях №9,10 ($\delta_p = 0,07...0,09\text{мм}$). В усіх клітях (рис.1.6), особливо в клітях №№9,10 зношення нижніх валків істотно більше, ніж верхніх валків, що, очевидно, пов'язано з гіршими умовами охолодження та мащення нижніх валків.

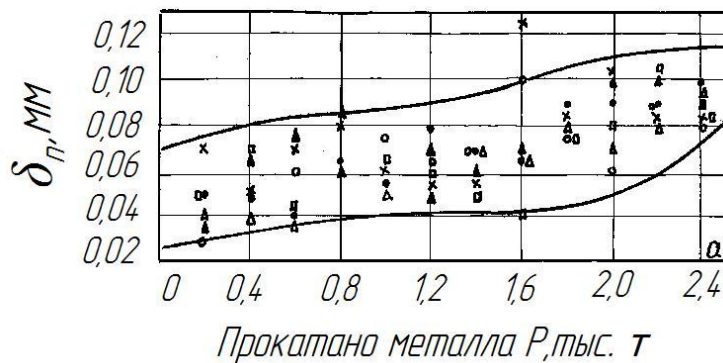
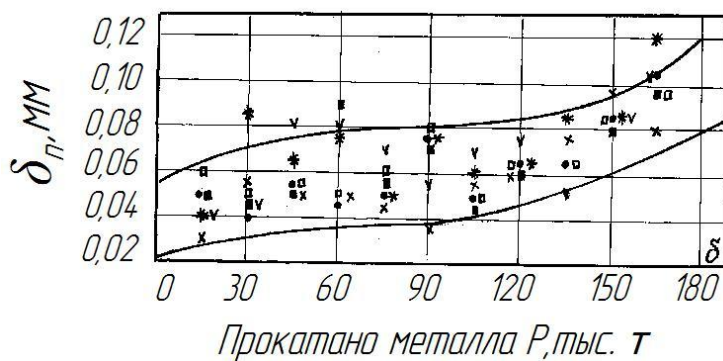


Рисунок 1.7-Зміна середній попе-речній різнотовщинності штаб із сталей марок 1пс, 08пс, 2пс, 20кп, 3 пс, 1пс, 10пс, 3пс, 20пс при зношенні: а-робочих валків; б - опорних валків (ШСГП 1680)



Зношення опорних і робочих валків робить істотний вплив на поперечну різнотовщинність штаб. З рис.1.7,а видно, що в процесі експлуатації робочих валків на ШСГП 1680 з діаметрами

$D_1=585...620$ мм, поперечна різнотовщинність штаб на протязі зміни (нові опорні валки) зростає з $\delta h_p = 0,02 ...0,07$ мм до $\delta h_p = 0,07...0,11$ мм. Тобто і на початку і у кінці їх роботи в кліті на цих валках прокатують штаби з поперечною різнотовщинністю, яка перевищує $\delta h_p > 0,05$ мм.

З даних рис.1.7 також витікає, що має місце значний розкид дослідних значень δh_p при $G = \text{const}$. Це свідчить про нерівномірності твердості робочих валків в різний період роботи стану, про нерівномірність розподілу по ширині смуги температури, механічних властивостей металу і погонних сил.

Аналогічна картина спостерігається і в процесі експлуатації опорних валків (9X2, 9X2МФ, $D_{оп} = 1170...1240$ мм) (рис. 1.7, б) [5]. При цьому відмітимо, що вже після прокатки на опорних валках 30000 т металу (2,5 доби роботи з

15 суток по графіку) поперечна різнотовщинність штаб знаходиться в межах 0,04...0,08мм, що вже помітно перевищує рекомендовані раціональні величини $\delta h_{\Pi} = 0,03...0,05$ мм. Після прокатки 120000т металу спостерігаються ознаки початку катастрофічного зносу поверхні опорних валків.

Для поліпшення поперечного профілю штаби нині перевалку опорних валків виконують через кожні 10 діб роботи. Дані рис.1.7,б отримані при вимірі товщини штаб, прокатаних на нових робочих валках. Компенсація поступового зносу робочих валків і деяке зниження поперечної різнотовщинності забезпечують тепловим профілюванням і протипрогином робочих валків в останніх клітях стана. Вказана на рис.1.7 поперечна різнотовщинність штаб характерна і іншим станам, не обладнаними ефективними системами регулювання міжвалкового зазору [14].

Для отримання раціональної поперечної різнотовщинності штаб в межах $\delta h_{\Pi} = 0,03...0,05$ мм необхідно :

- зменшити поперечну різнотовщинність сляб;
- встановити між чорною та чистою групами клітей підігрівальні пічі, окрім койлбоксу;
- в чорних і чистих клітях слід застосовувати робочі валки з високою твердістю, а кліті чистих груп ШСГП обладнати системами з декількома каналами регулювання міжвалкового зазору:
- використовувати багатосекційні колектори подання охолодження на робочі валки (5- 10 секцій);
- використовувати системи осевого зсуву робочих валків клетей кварто з використанням профілювання робочих валків типу SVC.

Застосування вказаних систем регулювання міжвалкового зазору не виключає необхідності вдосконалення технології прокатки, створення нових матеріалів для валків, підвищення їх експлуатаційних властивостей іншими шляхами.

1.6 Підвищення експлуатаційної стійкості валків

До прокатних валків пред'являються наступні вимоги: забезпечення вузьких допусків розмірів по товщині та площинності (планшетності) прокату; висока якість поверхні; рівномірність структури; економічність використання валків; висока надійність валків; виправдана їх вартість. Важливим для отримання якісного профілю готової штаби є не лише умови роботи валків в чистовій групі, але також і в чорновій групі клітей [5, 15-17].

Якість профілю готової штаби закладається в основному в чорновій групі клітей, тому щонайменше поліпшення геометрії осередку деформації в чорнових клітях робить істотний вплив на профіль готової продукції. Наявні дефекти можуть бути лише трохи поліпшені в чистових клітях, тоді як нерівності по центру або краям штаби можуть бути причиною аварій. Навіть при використанні SVC - профілювання валків або системи протипрогину

готовий прокат матиме майже такий же профіль в перерізі, яким він був закладений при прокатуванні в чорновій групі клітей.

Наступним важливим завданням чорнової групи є забезпечення температурного режиму прокатки. Втрати тепла мають бути добре контрольовані і зведені до мінімуму. Отже, на виконання усіх операцій в чорнових клітях відводиться строго обмежений час.

Основним завданням в процесі експлуатації є досягнення найкращого співвідношення витрат і ефективності роботи стана. Для цього необхідно домагатися високої продуктивності при раціональній швидкості прокатки і мінімумі проходів з максимальними обтисненнями в кожному з них. При цьому потрібна досить велика тривалість кампанії роботи валків, оскільки перевалка всіх валків займає за сумою декілька годин і, отже, збільшуються простой стана. Проте збільшення цієї тривалості повинне забезпечити хорошу поверхню і стабільність профілю штаби. Важкі умови експлуатації валків в чорновій групі клітей вимагають забезпечення їх високої експлуатаційної надійності для отримання якісного прокату і виключення аварій.

У зв'язку з вказаними умовами роботи валків в чорнових групах клітей посилюються вимоги до здатності валків до захвату розкату і підвищення величини обтиснення, яка визначається величиною коефіцієнта тертя. Підвищуються вимоги:

- до зносостійкості, термоусталостної міцності і корозійної стійкості, які сприяють низькому і рівномірному зносу валків;
- до жароміцності і стійкості до утворення тріщин розпалу, що забезпечують їх рівномірну дрібну сітку;
- збереженню якості поверхні валків при тривалих кампаніях роботи без відшаровувань і викрошки;
- до запобігання ушкодженням валків при великих термічних і механічних навантаженнях, порушеннях технологічного процесу, аваріях та ін.

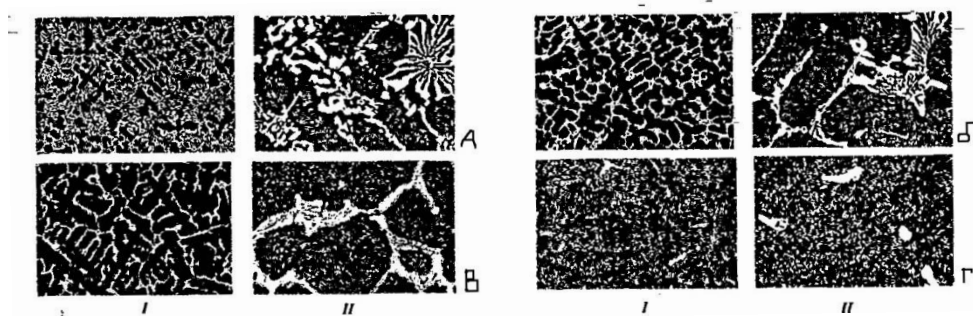


Рисунок 1.8 - Мікроструктура матеріалів валків чорнових клітей : I - $\times 100$; II - $\times 500$; а - високохромистий чавун; б – високовуглецева хромиста сталь; в - маловуглецева хромиста сталь; г-спеціальна швидкорізальна сталь

У чорнових клітях використовується велика кількість валків з чавуну і сталі різних марок (рис.1.8). Хімічний склад і інтервали твердості для найбільш поширених матеріалів робочих валків приведені в таблицю.1.1, а в таблиці.1.2 - їх порівняльні експлуатаційні характеристики в чорнових групах клітей. Нині широко використовують двошарові валки з хромистої сталі з віссю з

високоміцного чавуну, які значною мірою відповідають експлуатаційним вимогам, що пред'являються до робочих валків чорнових клітей. Проте зростаючі вимоги до ефективності роботи станів визначають необхідність розробки ще ефективніших матеріалів робочих валків.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад і твердість робочих валків чорнових клітей

Матеріал валків	C, %	Cr, %	Mo, %	HSC \approx
Кована сталь	0,4-0,8	<0,5	<0,2	28-38
Сталеве литво	0,5-0,9	<0,5	<0,2	32-42
ICDP	3,2-3,4	1,2-1,8	0,2-0,4	60-70
Чавун ВЧ	3,0-3,4	<1,1	0,1-0,6	50-70
Адаміт	1,2-1,7	1,4-1,7	0,1-0,4	40-55
Напівсталь	1,5-1,9	0,7-1,5	0,1-0,5	35-55
Високохромистий чавун	2,5-2,8	16-18	1,1-1,5	65-78
Хромиста сталь	1,3-2,0	10-12	1-4	68-78
Спеціальна швидкорізальна сталь	0,6-1,0	6,5-8,5	2-5	70-90

До таких матеріалів відноситься швидкорізальна сталь, валкі з якої мають ряд істотних переваг. Поліпшені механічні властивості при підвищених температурах, запобігання формуванню закритої сітки первинних карбідів валків зі швидкорізальної сталі гарантує підвищення опору зрізу і відсутність мікро- викрошіваній. Комбінація поліпшених умов захвату і зносостійкості дозволяє значно збільшити експлуатаційну стійкість валків. Результати експлуатації таких валків на напівнеперервних ШСГП показали, що число проходів може бути зменшене з семи до п'яти, дозволяє підвищити продуктивність стана приблизно на 20 % в порівнянні з валками з хромистої сталі.

При цьому один тільки показник зносу валків цієї нової марки може бути поліпшений на 150-300 % (рис.1.9). Застосування нових валків, як правило, дозволяє збільшити тривалість кампаній удвічі в порівнянні з валками з хромистої сталі без виходу за межі допусків геометрії осередку деформації.

Нині проводять випробування валків, виготовлених з нових матеріалів, проте це не виключає розвиток інших методів підвищення експлуатаційних властивостей опорних і робочих валків, виготовлених з традиційних матеріалів.

Одним із способів підвищення експлуатаційної стійкості є зміцнення поверхневого шару валків.

Таблиця 1.2 – Порівняння поведінки валків різних марок в чорновій групі клітей

Матеріал валків	Захват	Зносо-стійкість	Стійкість до розпалу	Якість поверхні	Тривалість кампанії	Надійність к експлу-атації
Кована сталь	О	П	П	П	П	У
Сталево литво	О	НУ	П	П	П	У
ICDP	Х	П	Х	У	П	Х
Чавун ВЧ	П	НУ	НУ	У	НУ	НУ
Адаміт	Х	НУ	НУ	НУ	НУ	У
Напівсталь	У	НУ	У	У	НУ	У
Високохро мистий чавун	У	У	НУ	У	У	Х
Хромиста сталь	Х	Х	У	Х	Х	Х
Спеціальна швидкоріза льна сталь	О	О	О	О	О	Х

О - відмінно; Х - добре; У - задовільно; НУ- незадовільно; П - погано..

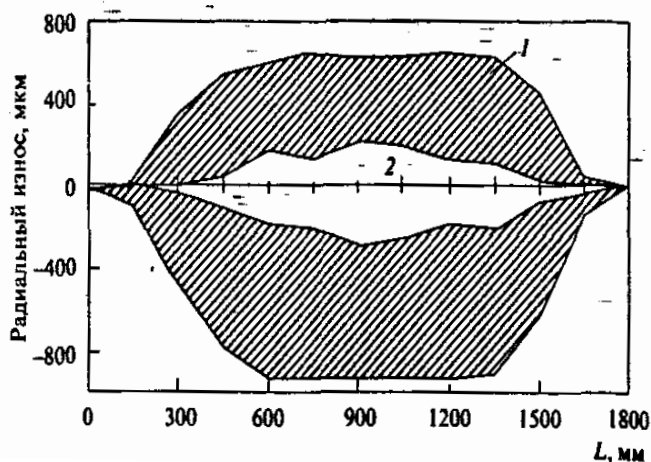


Рисунок 1.9 - Профіль зносу по довжині (L) робочих валків після прокатки 56 тис.т металу в чорновій реверс-ивній кліті: 1 - з хромистої сталі; 2 - з швидкорізальна сталь

1.7 Спеціальне профілювання робочих валків для зменшення поперечної різнотовщинності штаб

На початку 1980-х років у ФРН запропонований новий тип профілювання твірної бочок робочих валків двовалкових і чотиривалкових клітей з S - образною формою бочки (валки CVC) (Continuously Variable Crown - безступінчаста регульована бочкоподібність), яка дозволяє управляти міжвалковим зазором в процесі прокатки [5,14,15] (рис.1.10).

У початковому положенні рисунка міжвалковий зазор має постійну висоту по ширині штаби. При зрушенні валків по стрілці А усувається поперечна різнотовщинність штаби. При зрушенні валків по стрілці В збільшується поперечна різнотовщинність штаби. Різниця діаметрів по довжині бочки S - образних валків складає 0,3...0,8мм. Максимальне осьове переміщення валків $C=\pm 100$ мм.

На підставі досліджень на промисловому ШСГП 2230 встановлено що систему CVC слід застосовувати в перших клітях чистової групи спільно з системою вигину валків. У інших клітях монтується система гідровигину робочих валків для усунення неплоскостності штаби. Таким чином, в перших клітях чистової групи створюється необхідний поперечний профіль, а в подальших регулюється площинність штаби [14].

Серйозним недоліком системи CVC є велика різниця діаметрів робочого валка по довжині бочки ($f=0,3...0,8$ мм) при циліндричному опорному валку. Внаслідок різниці діаметрів робочого валка, а отже, і різних окружних швидкостях, при постійній середній окружній швидкості опорного валка, на їх межвалковом контакті виникає інтенсивне ковзання, що викликає інтенсивний знос, нерівномірний по довжині бочок валків [18]. Це знижує довговічність їх роботи і погіршує умови отримання планшетних штаб.

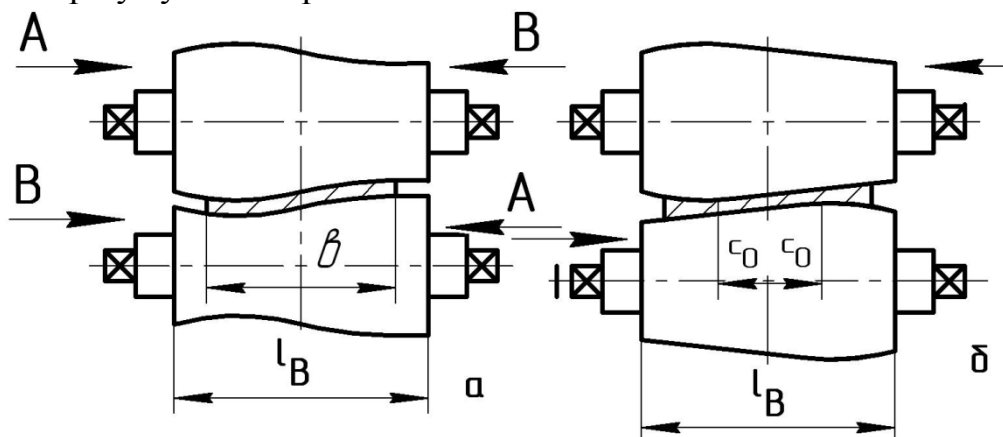


Рисунок 1.10 - Профілі валків типу CVC (а) і із опуклос-тямі(б).А,В-напрямок зсуву валків

На думку [14] профілювання CVC придатна для усунення поперечної різнотовщинності і являється занадто грубій для регулювання форми площинності штаби. Дійсно, при $f=0,3$ мм і зсуву валків на кожні 20мм середня

частина штаби обтиснюється приблизно на 0,03мм, що істотно більше величини обтиснення для регулювання форми штаби (див. нижче).

У роботі [12] розглянуто несиметричне профілювання зі зміщеними вершинами опуклостей твірної бочок валків (ПСВВ) (1983г) (рис.1.10, б). Величина зміщення опуклостей твірної валків складає $C_0 = (0,05..0,2) L$ і достатня для зменшення поперечної різнотовщинності штаб до мінімальної величини. Для зменшення товщини штаби в середній частині ширини (зменшення поперечної різнотовщинності) досить зробити зрушення двох валків у напрямі «А». Для конкретного стана встановлюють необхідні значення «С₀» і величину опуклості f_p . У відмінності від системи СВС, профілювання за типом ПСВВ опуклість валків забезпечує компенсацію прогинів валків, а осьовий зсув валків дозволяє додатково зменшити поперечну різнотовщинність штаби. Розділення функцій компенсації прогину і регулювання площинності дозволяє зменшити зношення робочих і опорних валків. Системи ПСВВ можна встановлювати в одній або декількох клітках ШСП і НСХП. Величину обтиснення середньої частини ширини штаби при осьовому зрушенні валків можна оцінити по формулі (для двох валків)

$$\Delta h_C = f_p \cdot (C/L)^n, \quad (1.13)$$

де Δh_C - величина додаткового обтиснення при зсуві опуклостей в перерізі, що відповідає осі валків; С- величина зсуву для двох валків; f_p - діаметральна опуклість валків; n - показник степені (1,5...3).

Чим більше параметр «С» і менше показник степені n, тим більше величина абсолютного Δh_C і відносного обтиснення ε в середній частині ширини штаби.

1.8 Площинність штаб

Лист є плоским (планшетним) якщо він усіма точками поверхні стикається з абсолютно плоскою плитою. Проте подібні листи в практиці прокатки якщо зустрічаються, то дуже рідко. Плоскі листи потрібні для отримання якісних виробів при холодному листовому штампуванні (деталі автомобілів, сільськогосподарських машин, побутової техніки). При штампуванні деталей з неплоского листа виникають розриви внаслідок різних коефіцієнтів витягань по площині листа.

Як правило готові листи, вирізані з прокатоної штаби, мають деяку неплоскостність. Неплоскостність листової сталі оцінюється амплітудою А відхилення від плоскої плити на базі 1м довжини листа. Листи і штаби в рулонах шириною більше 500 мм підрозділяються на групи: особливо високій (ПО), високій (ПВ), поліпшеній (ПУ) і нормальній (ПН) площинності. Відхилення (А) від плоскої форми холоднокатаної листової сталі з границей міцності до 700 Н/мм² не повинні перевищувати відповідно наступних значень (ширина штаб 1000 - 1500 мм) (мм) :

ПО - 5; ПВ - 8; ПУ - 12; ПН - 15.

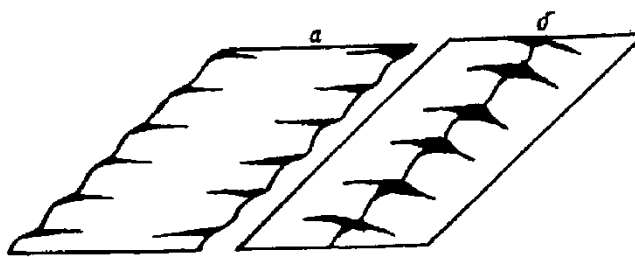


Рисунок 1.11-Схеми хвилястості (а) і коробоватості (б) штаби (листа)

При прокатуванні штаб на сучасних станах неплоскість готових листів не перевищує $A < 4$ мм. Розрізняють неплоскість в основному двох видів: хвилястість і коробоватість (рис.1.11). Хвилястість виникає внаслідок більшого, ніж це необхідно, обтиснення по кромці штаби, а коробоватість- в середині ширини штаби. .

Плоскість (планшетність) штаби є однією з характеристик точності геометрії листової сталі і одним з головних показників її технологічної придатності для подальшої обробки. Неплоскість (рис.1.11) і серповидність гарячекатаних штаб призводять до погіршення якості зварних швів, травмуванню штаб при змотуванні її в рулон і розмотуванні на стані холодної прокатки.

При холодному прокатуванні неплоскість служить причиною обривів і утворення складок на штабі, травмує валки, що підвищує витрату валків і знижує продуктивність станів. .

Вихід з ладу робочих валків із-за ушкоджень в процесі холодного прокатування складає 60... 90% від загального числа ушкоджених валків, а простої стана з цієї причини доходять до 30% від загального часу простоїв.

При змотуванні неплоскої штаби виходить рулон з різною щільністю, що сприяє зварюванню витків при відпалі і утворенню зламів при дресируванні [19,20]. Відсортовування по дефектах форми в сучасних цехах холодного прокатування складає 0,17...0,5% від загальної кількості прокату (і це при амплітуді неплоскостності $A > 5$ мм). Поліпшення планшетності штаб досягається шляхом застосування раціональних початкових профілювань валків, теплового регулювання профілю робочих валків з секціонуванням колекторів подання (охолоджувача) на кожні 100... 200 мм довжини валків (штаби), використанням в останніх клітках гідровигину робочих валків.

Необхідним для отримання плоскої форми штаб є дотримання умови яке можна представити у виді

$$\frac{\delta_{ПГ}}{H} = \frac{\delta_{ПХ}}{h} , \quad (1.14)$$

де $\delta_{ПГ}$ і $\delta_{ПХ}$ - поперечна різновтовщинність відповідно до гарячекатаної і холоднокатаної штаб.

Вказана умова передбачає однакову міру зменшення товщини штаби і поперечної різновтовщинності. Але умова (1.14) є недостатньою, оскільки штаба нерівномірно деформується в профільованих робочих валках і тому окружна

швидкість по довжині їх бочок буде різною. Тому додатковою умовою отримання планшетних (плоских) штаб буде рівність швидкостей подовжніх течій по ширині штаби :

$$v_{II} = v_i (1 + S_i) = const, \quad (1.15)$$

де v_i - окружна швидкість валка в i -му поперечному перерізі довжини бочки на ширині штаби; S_i - випередження в i -ом перерізі по ширині штаби.

У зв'язку з цим в процесі прокатки впливають на форму штаби шляхом зміни профілювання робочих валків в процесі роботи різними способами. Основними видами неплоскості листа є хвилястість і коробоватість (рис.1.11). Хвилястість штаби виникає у разі, якщо деформація (ϵ) і коефіцієнт витягу (μ) на кромках штаби більші, ніж в середині ширини, а коробоватість - при великих значеннях ϵ і μ в середині ширини штаби. Причому, неплоскості виникає при невеликій різниці в значеннях μ (ϵ) на кромці і в середині штаби.

Так, при прокатуванні штаб шириною 1250 мм неплоскості величиною $A = 8\text{мм}$ виходить при відносній різниці витягань по ширині рівної всього $\Delta\mu/\mu = 0,0004$ (де $\Delta\mu$ - різниця в коефіцієнтах витягань на кромці і в середині ширини; μ - середній коефіцієнт витягання по ширині штаби). Відмінність деформацій по ширині штаби (в пружній області деформацій) викликає відмінність подовжньої напруженні розтягування по ширині. При цьому в штабі, що прокатується з коробоватістю, максимальне напруження розтягування діє на кромках, а якщо з хвилястістю, то в середині ширини. На цих особливостях засновані сучасні методи виміру неплоскості штаби.. У відповідність із законом Гуку залежність між деформаціями і напруженням в кожному поперечному перерізі штаби має наступний вид

$$\Delta\sigma_x = a \cdot E \cdot \Delta\mu/\mu \quad (1.16)$$

де a - коефіцієнт впливу суміжних шарів штаби ($a = 1,1...1,2$); E - модуль пружності матеріалу штаби $\Delta\sigma_x$ - різниця напружень розтягувань по ширині штаби.

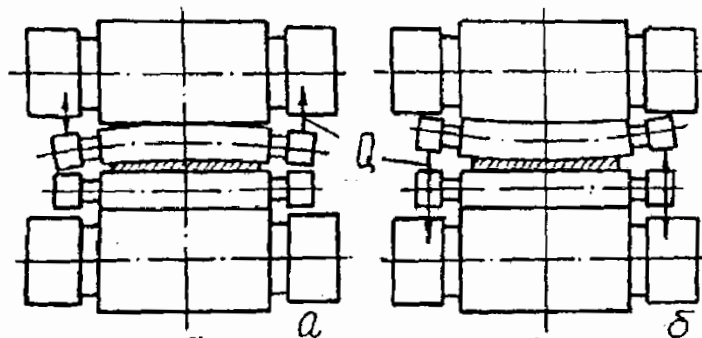


Рисунок 1.12 - Схема гідравлічного регулювання міжвалкового зозору: а – додатковий вигин; б-проти-вовигин (Q-сила проти-вигину)

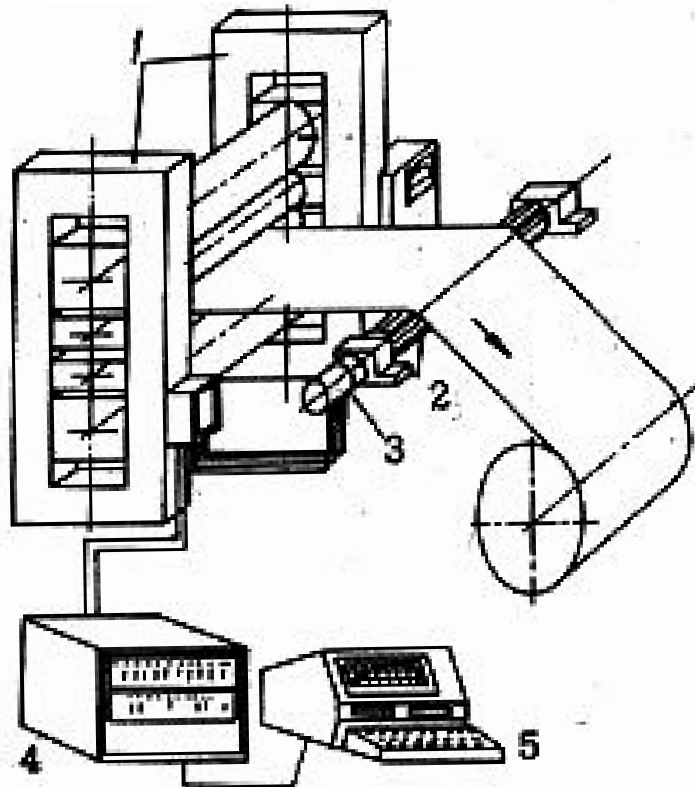


Рисунок 1.13 - Схема механічного профіледетектора (стресометра) 1 - кліть; 2 - стресометр; 3 - струмознімач; 4 - електронний перетворювач; 5 - табло.

Незначна відмінність в коефіцієнтах витягування по ширині штаби призводить до помітної різниці напружень розтягувань, а отже, СНКН і товщина штаби на окремих ділянках. Так, при $\Delta\mu/\mu = 0,0001$, $E=220000\text{Н/мм}^2$, $\alpha=1,1$ з формули (1,16) отримаємо $\Delta\sigma_x=24,1\text{Н/мм}^2$.

На існуючих станах (прокатних і дресирувальних) зменшення неплоскостності досягається гідровигином робочих валків (рис.1.12). Ці пристрої працюють в системі автоматичного регулювання профілю і форми (САРПФ) штаб, яка включає також блок температурного регулювання профілю валків за наявності місцевої неплоскостності штаб. Система працює спільно з профіледетектором (стресометром), що вимірює форму штаби через нерівномірність розподілу по ширині подовжнього напруження розтягування (рис.1.13). Дані стресометра 2 передаються для візуального спостереження на табло 5 і блоки управління 4 формою штаби.

Дослідження, виконані на стані 2130 фірм Алкан (Канада), показують, що до установки САРПФ планшетність 58-ї% штаб виходила за межі допусків і тільки 3% штаб були плоскими. Застосування гідровигину робочих валків з ручним управлінням дозволило в 62% випадків отримувати плоску штабу і тільки 10% штаб виходили за межі допусків, т. е. брак зменшився майже в 6 разів. В результаті впровадження автоматичного управління гідровигину і теплового регулювання профілю валків з використанням сигналів від стресометра забезпечений випуск плоских штаб в $\sim 100\%$ випадків.

Впровадження системи дозволило на 25% зменшити мінімальну товщину штаби і на таку ж величину зростає їх максимальна ширина. Аналогічні системи працюють в чистових клітках ШСПГ гарячого прокатування, тільки вимір поперечного профілю штаби робиться безконтактними рентгенівськими або ізотопними товщиномірами в різних точках ширини штаби.

1.9 Спосіб регулювання обтиснення по ширині штаби

Нині з метою зменшення неплоскостності штаб при гарячому і холодному прокатуванні установку і формування міжвалкового зазору в клітках кварто виконують по декількох каналах, у тому числі зі застосуванням секційного охолодження робочих валків водою або мастильно-охолоджувальною рідиною (емульсією)[21,22]. Проте ефективність цього способу обмежена інерційністю в межах 20...30хв. для виходу на необхідні параметри міжвалкового зазору.

Ефективнішим може бути спосіб, в якому диференційоване подання охолоджувача (емульсії) при холодному прокатуванні роблять не на робочі валки, а на локальні ділянки по ширині, розігрітій під час прокатки до температури 150...250⁰С, штаби перед входом її в робочі валки або на виході з валків (рис.1.14)[23].

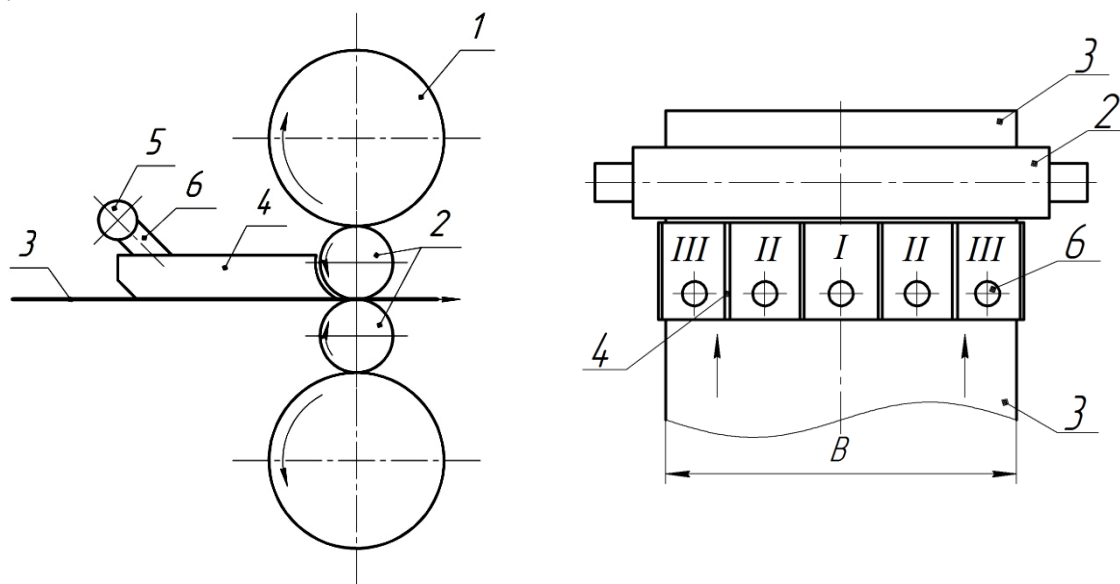


Рисунок 1.14-Схема пристрою для диференційованого подання охолоджувача на штабу: 1 - опорний валок; 2 - робочі валки; 3 - штаба; 4 –перегородки ; 5 - колектор; 6 – трубка для подачі охолоджувача

Для охолодження штаби використовують робочу емульсію з температурою 35...45⁰С. У цьому варіанті подання охолоджувача на локальну ділянку осередку деформації, відбувається одночасне охолодження і штаби, до вступу її у валки, і самих валків

Процес прокатки виконують таким чином. Секційний пристрій 4-6, встановлене перед валками і має, наприклад, п'ять секцій I - III, розділених

перегородками зі взаємним кріпленням. Довжина перегородок 1,5...2,0 м і встановлено їх над поверхнею штаби. На нижній поверхні сталевих перегородок закріплені пластини з м'якого матеріалу, що запобігають контакту зі штабою. Над кожною секцією пристрою 4 встановлені трубки - форсунки 6, в які охолоджувач подається з колектора 5.

Сигнал на включення подання охолоджувача (емульсії) на ту або іншу секцію передається через систему обробки результатів від секційного тензометричного ролика для виміру нерівномірності напружень (неплощинності) по ширині штаби. Якщо штаба прокатується з жолобленням на середній ділянці ширини штаби, то поступає сигнал на подання певної кількості охолоджувача на ділянку I штаби. При недостатній кількості охолоджувача з трубки 5, додатково включаються подання охолоджувача на секцію II. У разі прокатки штаби з хвилястістю кромek - охолоджувач подається з трубок на секцію III.

Можливість дії на параметри холодної прокатки зміною температури штаби підтверджується результатами експериментів [24,25], в яких полоси із сталі 08кп з товщиною $H \approx 2,5$ мм прокатували з різними початковими температурами на стані з діаметром валків $D = 256$ мм і твердістю поверхні 94 HSD..

Початкова температура полос перед прокаткою складала в середньому 25, 60, 160 і 260 °С. В якості мастила використали індустріальне масло И-12А, якою покривали полос, для запобігання окисленню при нагріві, і валки перед кожним проходом.

Температура валків в дослідях дорівнювала 40...50°C, обтиснення полос $\epsilon \approx 10...50\%$. Кожну партію полос прокатували при одній установці валків, але з різними температурами. В процесі дослідів вимірювали силу прокатки і випередження по кернових відмітках з урахуванням коефіцієнта лінійного розширення. По цим даним розрахунковим шляхом визначали середнє нормальне контактне напруження і коефіцієнт зовнішнього тертя з урахуванням пружних деформацій валків і штаби.

Результати досліджень свідчать про ті, що зменшення початкової температури полос приводить до збільшення сили плющення і зменшення відносного обтиснення полос. Наприклад, з даних [24,25]. слідує, що при зменшенні температури полоси усього з 125°C до 100°C (при усіх значеннях обтиснення) СНКН збільшується в середньому на 3,8%, а відносне обтиснення ϵ зменшується в середньому на 2,2%. Тобто при зменшенні температури полоси на $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ відносне обтискання зменшується на $((=0,022/25=0,0009$. За даними Ю.Д.Железнова [26] при такій зміні відносного обтиснення можна зменшити дефект форми штаби (амплітуду відхилення від рівної форми) на величину до 4-х мм. При $\Delta t > 1^\circ\text{C}$ можуть бути усунені і більші дефекти форми.

Фізична суть впливу зменшення температури, і збільшення внаслідок цього СНКН, на величину обтиснення і товщину штаби полягає у збільшенні пружного радіального сплющення валків, вигину робочих валків та між валкового зазору. Тобто відбувається зменшення обтиснення і збільшення

товщини штаби, що відповідним чином визначає характер неплоскості штаби.

Для наближеного розрахунку зміни обтиснення для даного випадку подовжньої прокатки штаб використали модель, запропоновану в роботі [27] (для постійного модулю жорсткості штаби) :

$$\delta h_{\Pi} = \frac{P_i - P_1}{M_{\text{КЛ}}}, \quad (1.17)$$

де P_i і P_1 - сила прокатки в i -му режимі і у базовому режимі ; $M_{\text{КЛ}}$ - модуль жорсткості кліті.

Товщина штаби і зміна відносного обтиснення $\Delta \epsilon_t$ на виході з осередку деформації в i -му режимі на i -ій ділянці локального охолодження будуть рівні :

$$h_i = h + \delta h_{\Pi}; \quad \Delta \epsilon_t = \delta h_{\Pi} / H, \quad (1.18)$$

де h - базова товщина штаби; H - початкова товщина штаби.

З формули (1.17) виходить, що усі зміни в i -му процесі прокатки, що викликають збільшення сили P_i , призводять до збільшення (при $P_i > P_1$) і зменшення (при $P_i < P_1$) кінцевої товщини штаби.

Нижче приведені результати теоретичних досліджень зміни параметрів деформації штаби залежно від зміни її температури в межах $\Delta t = 1 \dots 20^{\circ}\text{C}$. Розрахунки виконані для умов прокатки на стані 1700(діаметр валків 500мм, товщина і ширина штаби до і після прокатки 1,1-0,9х1250мм, ст. марки 08пс, $M_{\text{КЛ}}=4,5\text{МН/мм}$, емульсія мінерального масла, шорсткість валків 3мкм R_a швидкість валків 15м/с, напруження натягнення переднє -40Н/мм^2 , заднє -120Н/мм^2). Середнє нормальне контактне напруження і інші параметри оередку деформації визначали по формулах з робіт [28,29].

Таблиця 1.3. Вплив Δt на параметри прокатки для товщини штаби $h=0,9\text{мм}$ ($B=1250\text{мм}$)

$\Delta t, ^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\text{T1}}, \text{Н/мм}^2$	$\sigma_{\text{Ф}}, \text{Н/мм}^2$	$P_{\text{ср}}, \text{Н/мм}^2$	$\delta h_{\Pi}, \text{мм}$	$\Delta \epsilon_t$
0	395,44	400,35	563,10	0	0
2	395,82	400,65	563,62	0,001820	0,0017
4	396,22	400,95	564,14	0,003664	0,0033
6	396,62	401,26	564,67	0,005535	0,0050
8	397,02	401,57	565,21	0,00743	0,0068
10	397,43	401,89	565,75	0,009352	0,0085
12	397,85	402,21	566,30	0,011298	0,0103
14	398,26	402,53	566,85	0,013271	0,0121
16	398,69	402,86	567,42	0,015268	0,0139
17	399,12	403,19	567,99	0,017292	0,0157
18	399,56	403,53	568,57	0,019341	0,0176

Як видно з розрахункових даних, зменшення температури штаби на 10°C призводить до невеликого збільшення СНКН (всього на $2,65 \text{ Н/мм}^2$), але воно виявляється достатнім для зменшення відносного обтиснення на $\Delta\varepsilon_t=0,85\%$ і, отже, зміні амплітуди неплоскості більш ніж на $4,0\text{мм}$ [26]. Зміна товщини штаби в діапазоні $0,7\dots 1,2\text{мм}$ впливає на параметр $\Delta\varepsilon_t$ в 2-4 знаках після коми. На рис.1.15 представлені дані зміни $\Delta\varepsilon_t$ і Δt_i на усій ширині штаби.

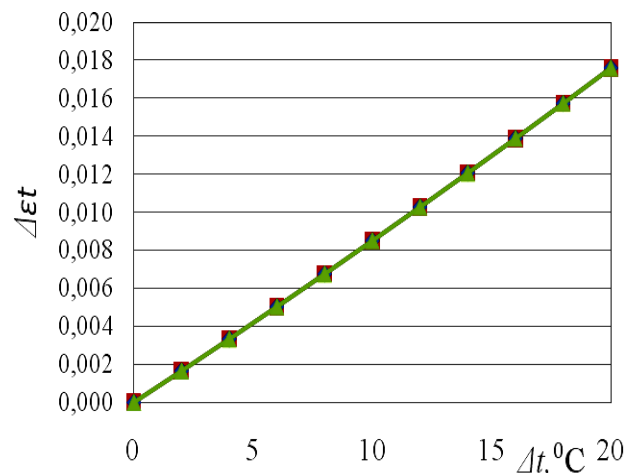


Рисунок 1.15 - Зменшення відносного обтиснення штаби внаслідок її охолодження

Для визначення $\Delta\varepsilon_t$ на локальній ділянці ширини штаби в першому наближенні використовуємо формулу наступного виду

$$\delta h_{\Pi} = \frac{\delta P_i - \delta P_1}{M_{\text{КЛ}}} = \frac{P_i - P_1}{M_{\text{КЛ}}} \cdot \frac{B_{\text{Л}}}{B}, \quad (1.19)$$

де B і $B_{\text{Л}}$ - ширина штаби і ширина локальної ділянки охолодження ; δP_1 і δP_i - доля величини сили на ділянці шириною $B_{\text{Л}}$ у базовому варіанті і після охолодження (при допущенні про рівномірний розподіл погонних сил по ширині штаби).

Таким чином, при $(B_{\text{Л}}/B)<1$ параметри δh_{Π} і $\Delta\varepsilon_t$, які вказані в таблиці.1.3 і на рис.1.15, будуть у $B_{\text{Л}}/B$ раз менше. Так, наприклад, при $(B_{\text{Л}}/B)=0,2$ і $\Delta t_i = 4^{\circ}\text{C}$ зменшення відносного обтиснення складе $\Delta\varepsilon_t=0,00066$, що також досить для дії на неплоскості штаби.

Перевагою пропонованого способу регулювання міжвалкового зазору шляхом подання охолоджувача на локальні ділянки штаби являється наступне.

1.Забезпечується інтенсивне охолодження заданої ділянки штаби внаслідок значної різниці температури штаби перед кліттю ($100\dots 200^{\circ}\text{C}$) і охолоджувача ($35\dots 45^{\circ}\text{C}$).

2.Значною мірою виключається інерційність в процесі регулювання розмірів штаби на локальній ділянці.

3. Штаба потрапляючи у валки сама додатково їх охолоджує, що підвищує міру дії на міжвалковий зазор.

2 ПОДОВЖНЯ РІЗНОТОВЩИННІСТЬ ШТАБИ

2.1 Метод розрахунку параметрів подовжньої різнотовщинності штаби

У розділі 1 отримані формули (1.3) і (1.6), що дозволяють визначити фактичну товщину штаби в цій клітві експериментальним шляхом при відомих значеннях сили прокатки P і модулі жорсткості клітві $M_{кл}$. В цьому випадку автоматично враховуються механічні властивості штаби, що деформується, які обумовлюють величину міжвалкового зазору. Дійсно, при деформації з $P=const$ сталевій штаби міжвалковий зазор (і товщина штаби) буде більше, ніж при деформації, наприклад, мідної штаби, оскільки напруження течії цього металу менша, ніж сталевій штаби. Вплив жорсткості металу штаби, що деформується, пояснюється схемою на рис.2.1.

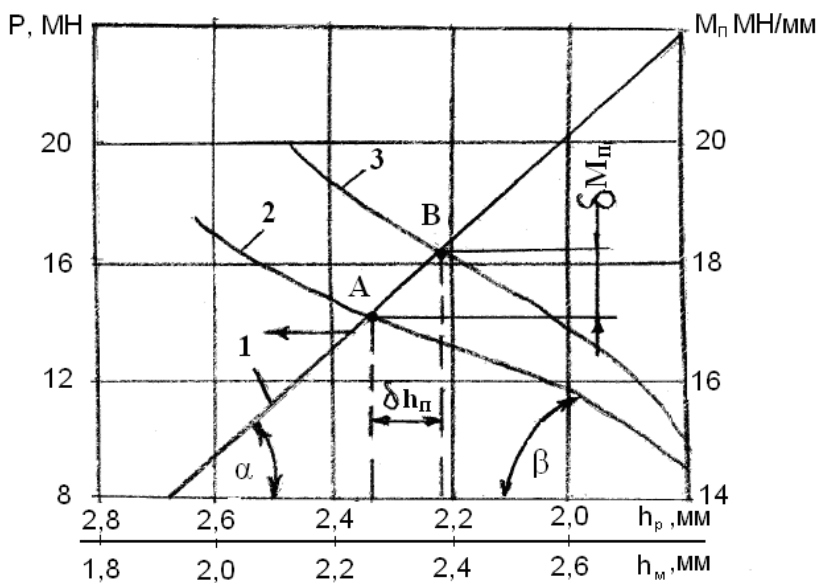


Рисунок 2.1 - Графічне рішення пошуку фактичної товщини штаби по розрахункових величинах P і $M_{п}$: 1 - зміна сили прокатки; 2 - зміна модуля жорсткості штаби; 3 - зміна модуля жорсткості штаби при збільшенні, наприклад, коефіцієнта тертя.

На рис.2.1 крива 1 показує зміну функції $P=F(h_p)$ (де h_p - величина зазору між валками, або товщина отриманої штаби при цьому значенні сили P) (див. розділ 1). Дані рис.2.1 отримано розрахунком при прокатуванні з наступними параметрами: $D_p = 500$ мм, $B = 1250$ мм, $H = 3$ мм, ст.08кп, $v = 2$ м/с; $\sigma_3 = 20$ Н/мм², $\sigma_{п} = 150$ Н/мм²; $M_{кл} = 4,3$ МН/мм) (D_p - діаметр робочих валків; B - ширина штаби; H - товщина штаби; v - швидкість прокатки; σ_3 і $\sigma_{п}$ - напруження натягнення відповідно заднє і переднє). Криві 2 і 3 відбивають зміну модуля жорсткості смуги $M_{п}=F(h_m)$.

Модуль жорсткості штаби визначено по формулах, які представлено вище. Крива 2 називається кривій пластичній деформації штаби. З рис. 2.1 слідує, що зі зменшенням товщини штаби (наприклад, при збільшенні обтиснення) сила P зростає, а інтенсивність підвищення сили P (кут нахилу кривої 1) при цьому обумовлена інтенсивністю зміцнення металу штаби. Модуль жорсткості штаби збільшується у міру зменшення товщини штаби і в зв'язку зі збільшенням напруження течії металу.

Точки «А», «В» перетину кривих 1 і 2 відповідають товщині, отримуваної при прокатуванні штаби. Так, для кривої 1 вихідна товщина h_M рівна $h_M \approx 2,27$ мм, а при збільшенні, наприклад, коефіцієнта тертя маємо $h_M \approx 2,38$ мм.

Приріст товщини штаби, в даному випадку, рівний $\delta h_{II} = 0,11$ мм, в загальному випадку, може бути визначено з диференціального рівняння [1]

$$dh = \frac{1}{M_{кл} - \partial P / \partial h} \left(M_{кл} \cdot dS + \frac{\partial P}{\partial H} dH + \frac{\partial P}{\partial B} dB + \frac{\partial P}{\partial R_p} dR_p + \frac{\partial P}{\partial \sigma_T} d\sigma_T + \frac{\partial P}{\partial f} df + \frac{\partial P}{\partial \sigma_{II}} d\sigma_{II} + \frac{\partial P}{\partial \sigma_0} d\sigma_0 \right), \quad (2.1)$$

Перша складова в дужках показує зміну сили P при зміні величини «забою» валків. Диференціали $(\partial P / \partial H, \partial P / \partial B, \text{и т. д.})$ у рівнянні (2.1) показують степе́нь зміни сили прокатки при зміні змінних параметрів на величину рівну dH, dB і т. д., і їх називають передатними коефіцієнтами. Оскільки друга складова відбиває зміну сили прокатки від незалежних змінних, тобто від початкових параметрів, то рівняння (2.1) представляють у виді

$$dh = \frac{\partial P}{M_{кл} - \frac{\partial P}{\partial h}}. \quad (2.2)$$

Друга складова в знаменнику є ні що інше, як приріст модуля жорсткості штаби при зміні того або іншого параметра прокатки. З урахуванням формули (2.2) і негативного, по відношенню до кута α , кута β нахилу кривої пластичної деформації, отримаємо

$$dh = \frac{dP}{M_{кл} + \delta M_{II}} \quad (2.3)$$

или в конечних разностях

$$\delta h = \frac{\delta P}{M_{кл} + \delta M_{II}}, \quad (2.4)$$

тобто зміна сили прокатки на величину δP призводить до зміни кінцевої товщини штаби на величину δh_{II} .

Приймаючи у формулі (2.1) усі параметри в другому співмножнику, окрім першого, рівними нулю (що не змінюються або мало змінюються по довжині) отримаємо

$$dh = \frac{M_{кл} \cdot dS}{M_{кл} + \delta M_{II}}. \quad (2.5)$$

Ця формула дає можливість визначити вплив зміни зазору між валками на подовжню товщину штаби, а відношення $K_S = dS / dh$ називається передатним коефіцієнтом::

$$K_S = \frac{dS}{dh} = \frac{M_{KL} + M_{II}}{M_{KL}} = 1 + \frac{M_{II}}{M_{KL}}. \quad (2.6)$$

Передатний коефіцієнт $K_S > 1$, т. е. величина переміщення натискних гвинтів по продуктиметру 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 . У абсолютно жорсткій кліті ($M_{KL} = \infty$ або прокатка м'якого металу (свинець) коефіцієнт $K_S \rightarrow 1$ ($dS \approx dh$)).

Формула (2.4) дозволяє розрахувати подовжню різнотовщинність штаби при гарячому і холодному прокатуванні. Інженерне рішення задачі визначення подовжньої різнотовщинності штаби стосовно розрахунку величини приросту потовщеного кінця при випуску його із стана запропоноване в роботах [27,30,31]. Зменшення (усунення) різнотовщинності штаби забезпечується різними методами.

На підставі викладеного теоретичного матеріалу нижче представлено метод розрахунку **приросту товщини по довжині штаби (подовжній різнотовщинності штаби)** в результаті дії різних технологічних параметрів [27,30,31]. Приріст товщини штаби з використанням формули (2.4) визначаємо по формулі (при $\delta P = P_i - P_M$).

$$\delta h_{II} = \frac{P_i - P_M}{M_{KL} + \delta M_{II}}, \quad (2.7)$$

де P_i і P_M - величини поточного і мінімального (на передньому кінці штаби) значень сил прокатки по довжині штаби.

З формули (2.7) виходить, будь-яка зміна сили P_i і модуля жорсткості штаби δM_{II} по довжині внаслідок, наприклад, температури металу, товщини штаби, натягнення, швидкості або інших параметрів викликає зміну приросту δh_{II} . Відмінність δM_{II} між сусідніми розрахунковими даними визначається з формули

$$\delta M_{II} = M_{Pi} - M_{PM}, \quad (2.8)$$

де M_{PM} і M_{Pi} - модулі жорсткості штаби мінімальний (на передньому кінці штаби) і у будь-якій іншій точці довжини штаби.

У теоретичному розрахунку P_i і P_M [28,29] (параметр δh_{II} визначається шляхом ітератування по формулі (2.7)). При цьому модуль жорсткості M_{Pi} визначають з роботи [27,30,31]:

$$M_{Pi} = \varphi_i P_i / \Delta h_i; M_{PM} = \varphi_M \cdot P_M / \Delta h_M. \quad (2.9)$$

Для гарячої прокатки

$$\varphi_i = (0,57 + 0,62\varepsilon)[1 + 0,023(R/H)^{0.5}] . \quad (2.10)$$

Для холодної прокатки

$$\varphi_i = [0,53 + 1,15(\varepsilon_i - 0,1)^2] \cdot (0,9 + 2f \cdot \sqrt{R/H})(0,78 + 2,2\varepsilon_i), \quad (2.11)$$

де φ_i - коефіцієнт пропорційності; Δh_i і Δh_M - абсолютне обтиснення в i -ій точці і в точці $M_{ПМ}$; R - радіус валків; H - початкова товщина штаби в кліті; f - коефіцієнт тертя..

У першій ітерації за даними першого розрахунку P_i , P_M і $M_{Пi}$, розраховують величину $\delta h_{Пi}$. Потім визначають Δh_i , Δh_M і інші параметри, у тому числі і P_i , по яких розраховують нове значення $\delta h_{Пi}$ в другій ітерації. Розрахунок параметрів P_M , $M_{ПМ}$ і Δh_M в другій і інших ітераціях не виконують. Розрахунок $\delta h_{Пi}$ за формулою (2.7) виконують до тих пір, поки різниця між сусідніми значеннями $\delta h_{Пi}$ складе $\Delta = 0 \dots 0,3\%$. При $\Delta = 0$ розрахункова система "геометричній осередок деформації - сила прокатки" приходять в рівновагу, а при $\Delta = 0,3\%$ система близька до рівноваги.

2.2 Деякі відмінності сучасної і традиційної технологій гарячої прокатки штаб

Нині широко використовується технологія прокатки штаб з тонких слябів товщиною $H = 50 \dots 100$ мм, які отримують з рідкого металу на ливарно-прокатних агрегатах (ЛПА) та на станах з валковим розливанням (ВЛПА) [15,32,33]. Неперервні широкоштабові стани гарячої прокатки (ШСГП), які встановлено на ЛПА, оснащуються вдосконаленими конструкціями робочих клітей, системами автоматичного регулювання товщини, площинності штаби і міжклітьового натягнення. Вдосконалення технологічних процесів виробництва тонкої гарячекатаної штаби ($h=1,0 \dots 2,0$ мм) забезпечує підвищення техніко-економічних показників, зниження подовжньої і поперечної різнотовщинності штаб, отримання їх високої планшетності (площинності).

На подібних станах в основному відсутній проблеми поперечної і подовжньої різнотовщинності ($\delta h_{П} < 0,03 \dots 0,05$ мм) штаб завдяки використанню нових технічних удосконалень :

- застосування безперервного литва металу в ливарно-прокатному агрегаті дозволило отримувати довгі проміжні розкати (до 300м) для чистової групи ШСГП;

- застосування печі, що підігріває розкат, безпосередньо перед чистовою групою клітей ШСГП, що виключає появи різниці температур по довжині проміжного розкату;

- застосування гідравлічних натискних пристроїв в усіх клітях чистової групи із швидкістю переміщення плунжерів в вертикальній площині і, отже, валків із швидкістю більше 2 мм/с, що дозволяє виконувати оперативне контрольоване регулювання товщини штаби в процесі прокатки;

- застосування SVC - профілювання (с S-образним профілем бочки) забезпечує оперативне регулювання поперечної різнотовщинності штаб в процесі прокатки.

Якість подовжнього профілю гарячекатаних і холоднокатаних штаб оцінюють величиною відхилень фактичної товщини штаби від мінімальної

товщини по її довжині, отриманій при мінімальній силі прокатки. Відхилення товщини по довжині штаби формують її подовжню різнотовщинність. У загальному випадку розрізняють високочастотну і низькочастотну різнотовщинності по довжині штаби.

Високочастотна різнотовщинність штаби утворюється в основному внаслідок биття бочок робочих і опорних валків відносно опорних шийок, а низькочастотна різнотовщинність по довжині штаби утворюється в результаті зміни механічних властивостей металу внаслідок, наприклад, зменшення температури, відсутності напруження натягнення кінцевих ділянок штаб, зміни окружних швидкостей валків при холодному прокатуванні кінцевих ділянок на неперервних станах порулонній прокатки.

У роботі [35] автори відмічають, що внаслідок різноманіття випадкових чинників, діючих в процесі прокатки формування різнотовщинності штаби можна розглядати як випадковий процес. Практика роботи сучасних ЛПА (ливарно-прокатних агрегатів)[36,37] свідчить про те, що при усуненні впливу випадкових чинників в процесі гарячої прокатки забезпечується подовжня точність в межах 1% (від товщини) на усьому сортаменті штаб. У підтвердженні цього в роботі [37] приведена профілограма зміни товщини штаби (2,3x1190мм), з якої виходить, що максимальне відхилення товщини на кінцевих ділянках складає всього 30 мкм (0,03мм). При цьому відсутній "температурний клин" зміни товщини по довжині штаби. Така точність по довжині штаби забезпечується високою мірою стабілізації процесу прокатки за рахунок:

- високій точності виготовлення валків (профілювання - шліфування в подушках з точністю обробки бочки до 0,003мм);

- виключення температурного перепаду по довжині розкату (литого сляба) шляхом підігрівання його до 1100...1150⁰С в тунельній печі завдовжки до 300м, встановленою перед станом;

- при використанні перед чистовою групою клітей ППУ (Coilbox) розкат підігрівають перед намотуванням в ППУ з тепловими екранами для вирівнювання температури по довжині розкату;

- застосування АСУТП (автоматична система управління технологічним процесом) в комплексі з гідравлічними натискними пристроями для оперативного регулювання міжвалкового зазору, наприклад, при прокатуванні кінцевих ділянок штаб.

Досі на багатьох металургійних підприємствах тонкі штаби (h=1,8...3,0мм) роблять з товстих слябів (H=160.300мм) на комплексах КМШС (МНЛЗ+ШСГП) і із зливків, що прокатуються на слябінгах. Заміна слябінгу в традиційній технології виробництва штаб на МНЛЗ забезпечив істотне скорочення витрати металу і енерговитрат на прокатку штаб. Процес КМШС застосовується як при створенні нових виробництв [32,33], так і при реконструкції існуючих ШСГП з традиційною технологією прокатки штаб. На КМШС власне прокатні стани мають практично подібну схему розташування робочих клітей як і на ШСГП з традиційною технологією прокатки (з

використанням зливків) : чорнова група (3-5 клітей з додаванням кліті для редукування сляба по ширині) і чистова група (5-7 клітей), але з якіснішими характеристиками устаткування, що дозволяють прокатувати штаби з товщиною $h=1,5\text{мм}$ при швидкостях $v > 20\text{м/с}$.

На існуючих КМШС технологічний процес власне на ШСГП має ряд недоліків [2,3, 33] :

а-великі відстані між сусідніми послідовно розташованими клітями (19-35м) в чорнових групах і між чорновий і чистовий групами (проміжний рольганг завдовжки 60-130м) приводять до зниження температури розкату на $180...200^{\circ}\text{C}$ (в порівнянні з початковою температурою сляба), що призводить до виникнення значних силових навантажень на валки і на головний привід, до підвищених енерговитрат;

б- зниження температури по довжині проміжного розкату в процесі прокатки його в клітях чистової групи обумовлює підвищення сили прокатки, пружних деформацій кліті і, отже, подовжньої різнотовщинності штаб (оскільки задній кінець розкату входить у валки кліті № 1 чистової групи на $30...100\text{с}$ пізніше за вхід в кліть переднього кінця розкату);

в- у неперервній групі клітей стана штабу (окрім кінцевих ділянок) прокатують з натягненням $15...25\text{Н/мм}^2$. Відсутність натягнення при прокатуванні кінцевих ділянок штаби обумовлює збільшення сили прокатки, пружних деформацій кліті, потовщення штаби і підвищення витрат металу в обрєзь;

г - на деяких станах для зниження подовжньої різнотовщинності при прокатуванні штаб застосовують прискорення обертання валків. Прискорюють обертання валків в усіх 6-7 клітях чистової групи, що призводить до значних енерговитрат [22, 34];

д- для поліпшення подовжнього профілю штаб на деяких ШСГП встановлені проміжні пристрої перемотувань проміжного розкату (ППУ-койлбокс) (Канада). Проте розташування ППУ перед клітями чистової групи (6,7 клітей) для змотування порівняно товстого проміжного розкату ($h=20...38\text{мм}$) не дозволяє використати повною мірою позитивні особливості застосування койлбоксу [31, 34].

Очевидно, що не дотримання вказаних вище умов прокатки на традиційному широкоштабовому стані гарячої прокатки (ШСГП) не дозволяє отримувати штаби з високою якістю подовжнього профілю. Це відноситься до ШСГП 1700 Маріупольського меткомбінату і ШСГП 1680 меткомбінату "Запоріжсталь", хоча і на цих станах останніми роками виконані удосконалення технологічного процесу і устаткування, підвищення технологічних показників, що забезпечують підвищення якості, у тому числі, і подовжнього профілю штаб. Так, на ШСГП 1700 для 94% загальної кількості готових штаб завтовшки $2...5\text{мм}$ на 95...96% довжини основної частини штаби (без кінцевих ділянок) максимальне відхилення товщини не перевищує $+0,05\text{мм}$ [38]. Застосування теплового екрану на проміжному рольганзі забезпечує підвищення температури заднього кінця розкатів на $10...15^{\circ}\text{C}$ і зниження

потовщення цієї ділянки готової штаби на 0,03...0,05мм. Реалізація, рекомендованого в роботі [38] варіанту реконструкції ШСГП 1700 з установкою другого теплового пристрою і ППУ у складі чистової групи клітей, може забезпечити істотне, крім усього іншого, зменшення відхилень товщини по довжині штаби [39,40].

Таким чином, при сучасній раціональній технології гарячого прокатування забезпечується отримання штабової сталі у повному обсязі з подовжньою різнотовщинністю в межах $\delta h_{\text{ДПР}} < 0,05\text{мм}$, яку не можливо отримати на станах з традиційною технологією без застосування спеціальних заходів.

2.3 Формування подовжньої різнотовщинності штаби

Проблеми усунення (зменшення) подовжньої різнотовщинності штаб, як було відмічено вище, існують на ШСГП з традиційним складом устаткування (чорнова і чистова група клітей). Зокрема, це в першу чергу відноситься до кінцевих потовщень, особливо на задньому кінці штаби, який у будь-якому випадку прокатують при меншій температурі і за відсутності заднього натягнення.

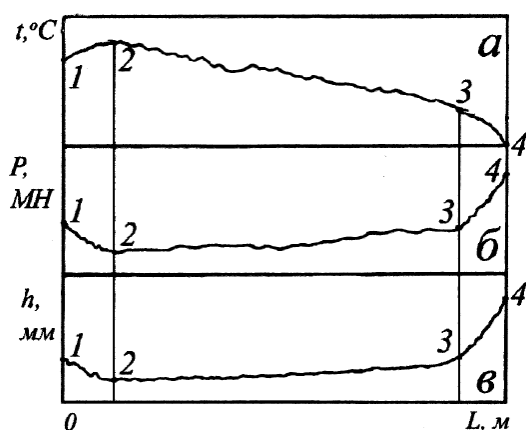


Рисунок 2.2- Схема зміни температури металу (t), сили прокатки (P) і товщини штаби (h) по її довжині: 1 - 4 - характерні ділянки довжини штаби (традиційна технологія)

Збільшення при цьому сили прокатки в порівнянні з силою на передньому кінці і обумовлює істотний приріст товщини штаби.

При гарячому прокатуванні штаб з транзитною передачею товстих слябів із слябінгу на ШСГП (без койлбокса) в чистовій групі неперервного стана усі технологічні і силові параметри змінюються від переднього кінця до заднього кінця штаби (рис. 2.2). Найбільша температура проміжного розкату має місце на ділянці

1 - 2. Причому на ділянці 1 температура розкату може бути дещо менша, ніж на ділянці 2 внаслідок інтенсивнішого охолодження торців сляба (розкату). Задню кінцеву ділянку розкату (штаби) прокатують пізніше, ніж передній і тому температура металу на ділянці 3 - 4 буде істотно менше, ніж на ділянці

1 - 2. Така зміна температури обумовлює відповідну зміну сили P прокатки штаби при мінімальному значенні сили на ділянці 2 і при максимальному на ділянці 4.

Окрім впливу температури на зміну сили P у бік її збільшення сприяє відсутність переднього натягнення на ділянці 1 і заднього натягнення на ділянці 4. Ділянку 2 - 3 штаби прокатують за наявності переднього і заднього

натягнень, а збільшення товщини h штаби на ділянці 2 - 3 обумовлено зниженням температури розкату (штаби) від переднього до заднього кінця при русі штаби на проміжному рольгангу по клітках стана.

Нижче представлений аналіз промислових профілограмм при прокатуванні штаб на ШСГП 1680 меткомбінату ПАТ «Запоріжсталь»

[3-5,31,34 На ШСГП 1680 [11] встановлені 10 клітей: чорновий двохвалковий окалиноломач (ОК) з діаметром валків $D=900\text{мм}$ і 4-і чорнові кліті кварто з діаметрами робочих валків $D(\text{мм})$ і потужністю N головних приводів, (кВт): №1 - $D=940$ ($N=6300$), №2-850 (4000), №№ 3,4-588 (4000). Допускається незначне перевантаження головних приводів. У чистовій групі шість клітей кварто (№№5-10) з робочими валками максимальним діаметром 620мм (потужністю $N=7000$ кВт в кожній кліті) (чавунні валки з вибіленим шаром твердістю по Шору- 63...72 HSD).

Прокатують сляби в основному з вуглецевої сталі завтовшки 150...168мм, шириною 1000...1500мм і завдовжки 4,5...4,7м (одинарні) і 9,0...9,3м у разі використання ППУ. Товщина проміжного розкату після кліті №4 складає $H_{\text{ПР}}=20\text{...}28\text{мм}$. ППУ встановлене на проміжному рольгангу між кліттю №4 чорнової групи і кліттю №5 чистової групи. .

У шести клітках чистової групи прокатують штаби завтовшки 2,0...8,0мм з максимальною швидкістю в кліті №10- 9,2м/с. Кліті №№ 8-10 обладнані пристроями протипрогину робочих валків. У чорновій групі у неперервному режимі прокатки працюють кліті №№: ОК-1; 2-3 і 3-4, тобто на ділянках, де довжина розкату більше відстані між клітками.

На рис. 2.3 показана характерна профілограма зміни товщини штаби 2×1100 мм, яка прокатана на ШСГП 1680 за відсутності достатньої кількості каналів регулювання міжвалкового зазору. Як слідує з рис. 2.3, величина відхилень товщини штаби на основній довжині (~85%), у тому числі і на передньому кінці складає $\delta h_{\text{П}}= 0,02\text{...}0,07$ мм. (ділянка 2-3). Підвищення товщини штаби до задньої кінцевої ділянки, за наявності переднього і заднього натягнень, обумовлено зниженням температури (температурним градієнтом). Потовщення заднього кінця штаби відносно мінімальної товщини на передньому кінці складає $\delta h_{\text{П}} = 0,2$ мм, незважаючи на додаткове обтиснення задньої кінцевої ділянки в клітках № 6 - 9. Для усунення приросту товщини на ділянці 2 - 3 потрібно монотонне безперервне зменшення міжвалкового зазору. На ділянці 3 - 4, де відбувається додатковий приріст товщини внаслідок відсутності натягнення заднього кінця в усіх клітках чистової групи, потрібне застосування локальної дії на процес прокатки для відповідного зменшення міжвалкового зазору.

У 2008р. в лінії ширококутового стана ШСГП 1680 меткомбінату "Запоріжсталь" було встановлено проміжний пристрій (ППУ) перемотування розкату[31]. ППУ встановлене на проміжному рольгангу між кліттю №4 чорнової групи і кліттю №5 чистової групи (рис.2.4) (на відстані ~28м від кліті №5).

З рис.2.4 слідує, що в лінії проміжного рольгангу відсутні які-небудь пристрої (окрім ППУ), що забезпечують збереження теплозмісту проміжного розкату завтовшки $H_{ПР}=20...28\text{мм}$ (поз.7,8 – це пропозиція). Втрати тепла розкатом на ШСГП 1680 відбуваються до і після ППУ, а загальне зниження температури на передньому кінці розкату складають $80...100^{\circ}\text{C}$ (залежно від товщини розкату і його температури після кліті №4).

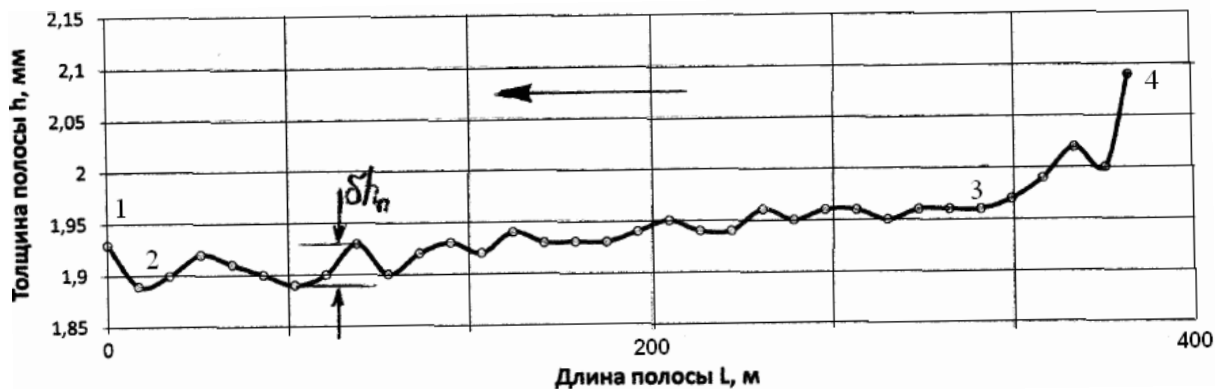


Рисунок 2.3- Профілограма зміни товщини по довжині штаби (ст. 08пс) при прокатуванні без койлбокса. Дані меткомбінату "Запоріжсталь"

Установка ППУ на проміжному рольгангу робить деякий вплив на подовжню різнотовщинність штаб. Характерний вид подовжнього профілю штаби з розмірами $2 \times 1000\text{мм}$, яка прокатана із застосуванням ППУ, представлений на рис.2.5. Профілограму на рис.2.5 можна представити у вигляді п'яти ділянок: I - прокатка переднього кінця (виміри 1-5); II - збільшення товщини штаби (5-18); III - відносно постійна товщина штаби (18-38); IV - зменшення товщини штаби (38-61); V - збільшення товщини на $\delta h_{П} = 0,15\text{мм}$ при прокатуванні заднього кінця штаби без натягнення (61-65)[31,34].

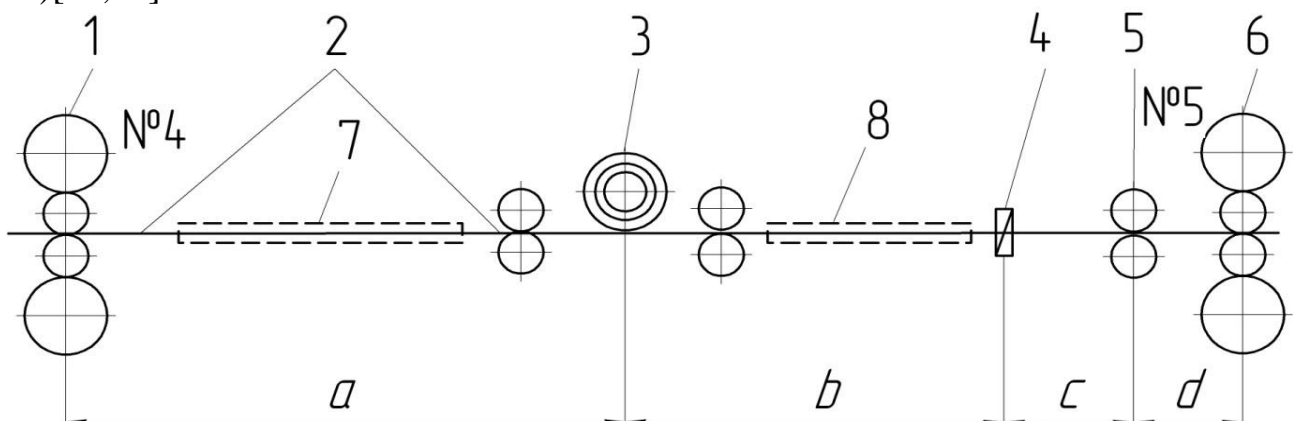


Рисунок 2.4- Ділянка проміжного рольгангу ШСГП 1680: 1 - чорнова кліт №4; 2 - проміжний рольганг ($a \approx 37\text{м}$); 3 - ППУ; 4 - ножиці кінцеві ($b \approx 10\text{м}$); 5 - чистовий двохвалковий окалиноломач ($c \approx 12\text{мм}$); 6 - перша чистова кліт №5 ($d \approx 6\text{м}$); 7,8 - індукційні пічі, що підігрівають (це пропозиція, нині відсутні). Усі розміри дані для існуючого розташування устаткування

Приведений вид профілограми обумовлений особливостями використання ППУ, коли проміжний розкат охолоджується тривалий час: при змотуванні його в рулон і при розмотуванні його для прокатки в чистовій групі ШСГП. Передній кінець штаби прокатується із заднього кінця проміжного розкату, який задають в кліть №5 (першу кліть чистової групи) при температурі $t \approx 980 \dots 1010^{\circ}\text{C}$. Перша точка виміру з товщиною 2,0мм на ділянці I відповідає прокатки «язика», ширина якого менше ширини штаби. У точці 2 (в порівнянні з точкою 1) товщина переднього кінця штаби збільшилася на $\sim 0,04\text{мм}$ внаслідок прокатки його без натягнення.

Початку процесу, що встановився, відповідає точка 4, де товщина штаби рівна $h=2,0\text{мм}$ (відстань між точками вимірів 1-4 рівне $\sim 30\text{м}$). На ділянці II (швидкість розкату перед кліттю №5 рівна $\sim 0,85\text{м/с}$) відбувається збільшення товщини штаби, внаслідок зменшення температури проміжного розкату, при незмінних усіх інших параметрах. Зменшення температури зовнішніх витків проміжного розкату відбувається в процесі їх намотування і розмотування.

На ділянці IV (точки 38-61), яка відповідає передньому кінцю проміжного розкату (задній кінець штаби), спостерігається протилежна картина. Точка виміру 61 відповідає закінченню процесу (у кліті №10), що встановився, і на проміжному розкаті ділянка 61 розташований на відстані $\sim 3,0 \dots 4,0\text{м}$ від його переднього торця при виході з кліті №4. Збільшення товщини штаби до середини її довжини (у бік зменшення номера виміру) логічно, оскільки обумовлено зменшенням температури проміжного розкату в напрямі від переднього до заднього кінця в ППУ. На початкове температурне поле витків цієї ділянки, очевидно, накладається і зниження температури при намотуванні-розмотуванні рулону



Рисунок 2.5- Зміна товщини штаби 2×1000 мм із сталі марки 1пс, яка прокатана з використанням Coilbox (довжина сляба $L = 9,3$ м). (Дані меткомбінату «Запоріжсталь»)

Витки середньої III-ої ділянки рулону розташовані між зовнішніми і внутрішніми витками, що визначає стабільність температури і приблизно однакову товщину штаби в точках вимірів 18-38.

Ділянку V, починаючи з кліті №5 і в кожній подальшій кліті, прокатують без заднього натягнення і при зменшенні температури штаби по довжині ділянки, що викликає збільшення середнього нормального контактного напруження, сили прокатки, пружних деформацій кліті і, отже, товщина штаби (виміри 61-65). Приріст товщини штаби на ділянці V в різних умовах прокатки складає $\delta h_{II} = 0,08 \dots 0,15 \text{ мм}$.

При прокатуванні штаб завтовшки $h > 2,5 \text{ мм}$ характер зміни товщини по довжині, в основному, залишається таким же, але величина відхилень δh_{II} різна. В умовах ШСГП 1680 прокатують штаби, подовжній профіль яких має різний вигляд, що виходить з отриманих профілограм. Наприклад, прокатують штаби з помітним (до $\sim 0,15 \text{ мм}$) зменшенням товщини в напрямі від переднього до заднього кінця штаби; з приблизно однаковою товщиною штаби на ділянках II - IV; штаби зі збільшеною товщиною довжиною кінцевих ділянок до 40...50м. Таким чином, подовжні профілі штаб при прокатуванні із застосуванням Coilbox мають різноманітний вигляд, що обумовлено нерівномірним розподілом температури по довжині проміжного розкату і особливостями роботи Coilbox, внаслідок яких цей пристрій не завжди виконує основній своїй функції : отримання рівнотовщинної по довжині готової штаби і зменшення товщини кінцевих ділянок

При прокатуванні без Coilbox передній кінець проміжного розкату проходить за $\sim 34 \text{ с}$ відстань між клітями №4 і №5 (проміжний рольганг ШСГП 1680 довжиною $L \approx 65 \text{ м}$, швидкість виходу розкату з кліті №4 і рольганга прийнята рівними $v \approx 1,9 \text{ м/с}$). При використанні Coilbox (ППУ) передній кінець проміжного розкату, після виходу з кліті №4, через 20с поступає до ППУ. Далі йде змотування в рулон до виходу заднього кінця з кліті №4 - час -11с, змотування з прискоренням -8с, передача рулону на розмотування - 5с, подання переднього (верхнього) кінця рулону до кліті №5- 14с. Загальний час після виходу переднього кінця розкату з кліті №4 до вступу штаби до валків кліті №5 складає -58с, що в 1,7 разу більше, ніж без ППУ(см вище) і це призводить до додаткових втрат теплоти проміжного розкату.

Невелика маса рулону (до 13т) сприяє нерівномірному розподілу температури по його перерізу, що обумовлено зменшенням температури по довжині початкового проміжного розкату, тривалим охолодженням внутрішніх витків рулону при його змотуванні і розмотуванні, можливі затримки рулону перед розмотуванням, відсутність екранування ППУ. Проте, установка Coilbox в лінії ШСГП 1680 зіграла свою позитивну роль забезпечивши прокатку тонких штаб з довгомірних слябів (завдовжки 9,0...9,3м і масою 11...13т), підвищивши тим самим техніко-економічні показники роботи стана.

Проте проблема підвищення якості подовжного профілю штаб і усунення потовщених їх задніх ділянок при цьому не розв'язана. Для вирішення цих завдань потрібне застосування на стані додаткових технічних заходів.

Підвищення точності подовжного профілю і забезпечення прокатки штаб завтовшки $h < 2,0$ мм на ШСГП 1680 меткомбінату "Запоріжсталь" може бути досягнута шляхом здійснення технічних заходів по стабілізації теплового стану штаби і підвищення температури проміжного розкату. Це може бути виконано шляхом застосування обладнання для теплозберігання (ТСО) завдовжки ~ 34 м перед ППУ і індукційній печі (ИПП), що підігріває, завдовжки ~ 10 м (рис.2.4) перед чистовою групою після перенесення ножиць ближче до окалиноломача ($s \approx 6$ м). ТСО зберігає і вирівнює температуру по довжині розкату, а ИПП дозволяє в процесі прокатки від переднього кінця до заднього збільшити температуру на $30 \dots 50^\circ\text{C}$. Сам же агрегат змотування - розмотування (ППУ) необхідно екранувати власним ТСО.

Ці технічні заходи, як показує досвід [36-38], можуть забезпечити зниження низькочастотної різнотовщинності штаб при прокатуванні, як без прискорення, так і з прискоренням штаб. Проте ці заходи не зможуть усунути потовщення задньої кінцевої ділянки штаби. Потрібна додаткова дія на задню ділянку проміжного розкату завдовжки $3 \dots 5$ м з метою компенсації збільшення його товщини внаслідок відсутності заднього натягнення.

2.4 Способи впливу на подовжню різнотовщинність штаби

Особливістю прокатки штаб на традиційних ШСГП, як відмічали вище, являється потовщення на $\delta h_{\text{п}} = 0,10 \dots 0,20$ мм задньої кінцевої ділянки готової штаби на довжині $30 \dots 40$ м. Поява цього потовщення обумовлена, головним чином, відсутністю дії на нього заднього натягнення на усіх міжклітьових ділянках чистової групи ШСГП і природне зниження температури по довжині штаби. Очевидно, що створити яким-небудь чином дискретний процес прокатки з наявністю заднього натягнення кінця штаби не представляється можливим. У зв'язку з цим усунення потовщення на локальній задній ділянці штаби можливо тільки шляхом застосування локальної зовнішньої дії на цю ділянку. Крім того товщина штаби збільшується від переднього кінця до заднього внаслідок зниження температури штаби в процесі прокатування (температурний клин).

Відомі декілька способів впливу на штабу, які компенсують відсутність заднього натягнення і зниження температури металу [35,40-46], реалізація яких можлива на промислових ШСГП:

1- застосування безперервного (напівбезперервного) процесу гарячої прокатки штаб на ШСГП;

2-застосування додаткового обтиснення задньої кінцевої ділянки розкату (штаби) в процесі його прокатування (нині використовується на багатьох станах);

3-зменшення коефіцієнта тертя при прокатуванні заднього кінця штаби в останніх клітках чистової групи шляхом подання на валки технологічного мастила, наприклад, в клітках №№8-10(12);

4-збільшення температури задньої ділянки проміжного розкату шляхом підігрівання декількох внутрішніх витків рулону в період його розмотування з ППУ, подальше подання переднього кінця рулону до першої клітки і прокатки розкату в клітках ШСГП. При цьому нагрів внутрішніх витків може бути здійснений (рухливим) стержневим індуктором;

5-застосування прискорення обертання валків усіх клітей чистової групи ШСГП починаючи з моменту, коли перед першою кліткою чистової групи залишається 3...5м довжини проміжного розкату.

Нижче наводиться аналіз деяких способів впливу на штабу з метою зменшення приросту товщини кінцевої ділянки.

1. У Японії на трьох ШСГП з традиційною технологією прокатки нині використовують безперервний процес прокатки штаб, в якому прокатують 15-16 сполучених «встык» на стикозварювальній машині проміжних розкатів, а потім декілька штаб прокатують в періодичному (індивідуальному) режимі з метою створення пауз між штабами для забезпечення інтенсивного охолодження робочих валків

Напівбезперервний процес прокатки застосовують також і на ШСГП, працюючих у складі ливарно-прокатних агрегатів (ЛПА) [33,36,37], на яких прокатують проміжні розкати завдовжки 250...270м. У цьому процесі при постійній температурі на вході розкату в клітку ШСГП температура штаби і її товщина на виході з чистової клітки при швидкості $v_{ч}=20\text{м/с}$ також будуть однаковими на довжині штаби 3000...4000м за винятком кінцевої ділянки завдовжки 30...40м, яка прокатана без заднього натягнення. Можливі відносні втрати металу в обрізь при цьому будуть незначними. .

2.Застосування додаткового обтиснення задньої кінцевої ділянки розкату (штаби) в процесі його прокатування використовують на різних станах [5,27,31,34,41,42]. Для умов прокатки на ШСГП 1680 Ю.В. Коновалов [41] рекомендував наступний режим додаткового обтиснення ΔS заднього кінця (ΔS - обтиснення по продуктиметру, мм) в клітках стана : №6 - 0,6; №7 - 0,45; №8 - 0,3; №9 - 0,2. Сумарне додаткове обтиснення по продуктиметру складає $\sum \Delta S = 1,55$ мм. При цьому, розрахунковий модуль жорсткості штаби по клітках №5 - 9 змінюється в межах $M_{п} \approx 2,0 \dots 10,0$ МН/мм, а коефіцієнт передачі обтиснення до товщини штаби в цих клітках рівний $K_{S} \approx 1,9 \dots 4,0$

($K_{S} = \Delta S_i / \Delta h_i$). Для таких умов деформації ділянка 4 штаби отримує фактичне сумарне додаткове обтиснення безпосередньо в межах $\sum \Delta h_{d(5-9)} = 0,3 \dots 0,5$ мм, а кінцеве потовщення на ділянці 4 після клітки №10, у відповідності з розрахунками, виявилось рівним $\delta h_{п} = 0,162$ мм (рис.2.6,а, клітка №10) проти $\delta h_{п} = 0,2$ мм при прокатуванні ділянки 4 з $\sum \Delta h_{d(5-9)} = 0$. Тобто прийняте на стані сумарне додаткове обтиснення ділянки 4 дозволяє зменшити величину кінцевого потовщення готової штаби всього на 0,038 мм або на 19%. Як

бачимо, міра зменшення величини кінцевого потовщення істотна, але очевидно, недостатня. З рис.2.6,а також слідує, що у міру збільшення товщини штаби потовщення задньої ділянки штаби (кліті №№ 7-9) зростає до $\delta h_{\Pi} = 0,33 \dots 0,4$ мм.

З розрахунків виходить (при $\Delta t_5 = 60$ °С), що параметр δh_{Π} для усіх клітей змінюється лінійно залежно від сумарного фактичного додаткового обтиснення ділянки 4 штаби. При додатковому сумарному обтисненні ділянки 4 в клітях №5 - 9 рівному $\sum \Delta h_d(5-9) = 1,0$ мм кінцеве потовщення на ділянці 4 зменшується в кліті №5 з $\delta h_{\Pi} \approx 0,48$ мм ($\sum \Delta_{d(5-9)} = 0$) до $\delta h_{\Pi} = 0,3$ мм, а в кліті №10 це зменшення, відповідно, складає з $\delta h_{\Pi} \approx 0,2$ мм до $\delta h_{\Pi} \approx 0,11$ мм (рис. 2.6).

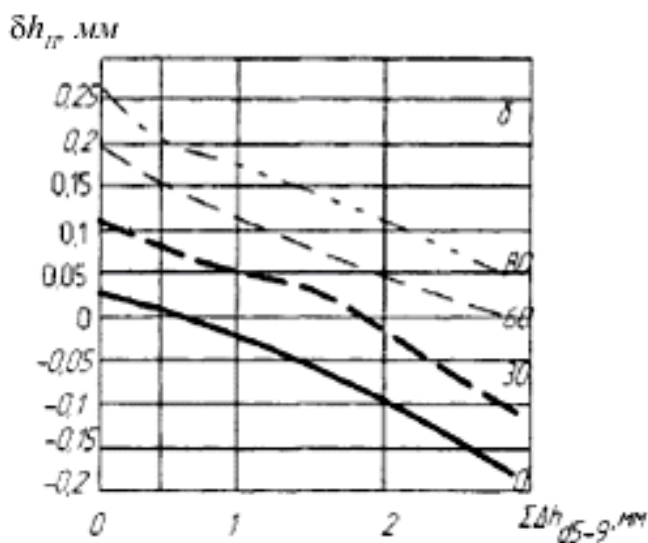
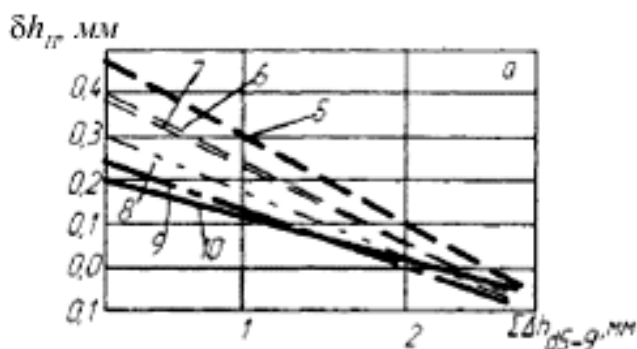


Рисунок 2.6- Зміна кінцевого потовщення на ділянці 4 заднього кінця залежно від сумарного додаткового фактичного обтиснення по клітях стана (а) і параметра Δt_5 (б) (числа у кривих) для кліті №10. Проміжний розкат $H_p = 20$ мм, штаба $2,0 \times 1250$ мм, пряма (транзитна) прокатка слябів завдовжки $L_{сл} = 4,5$ м.

Таке зменшення δh_{Π} суттєво і товщина штаби по усій довжині відповідає нормативним допускам, але сама величина $\delta h_{\Pi} \approx 0,11$ мм значно перевищує величини δh_{Π} на основній довжині штаби, де $\delta h_{\Pi} = 0,03 \dots 0,05$ мм.

Для повного усунення на готовій штабі кінцевого потовщення на ділянці 4 (тобто для $\delta h_{\Pi} = 0$) необхідно додатково деформувати цю ділянку на $\sum \Delta h_d(5-9) \approx 2,3$ мм, що в ~ 5 разів більше, ніж при серійній технології. Однак натискні електромеханічні пристрої, внаслідок невеликої швидкості переміщення (під навантаженням- $0,07$ мм/с), не встигнуть деформувати потовщену ділянку. Таке обтиснення забезпечується гідравлічними натискними пристроями, які мають швидкість переміщення валків у вертикальній площині в межах $2,0$ мм/с.

На кінцеве потовщення ділянки 4 істотний вплив робить градієнт температур Δt_5 по довжині проміжного розкату (рис.2.6,б). При зменшенні градієнта температур по довжині розкату з Δt_5 з 60 °С до 0 °С товщина ділянки 4

($\sum \Delta h_{d(5-9)} = 0$) зменшується з $\delta h_{II} = 0,2$ мм до $\delta h_{II} = 0,03$ мм. Тобто в даному випадку немає необхідності застосовувати додаткове обтиснення штаби. При $\Delta t_5 = 30^\circ\text{C}$ і $\sum \Delta h_{d(5-9)} = 0$ товщина ділянки 4 штаби на $\delta h_{II} = 0,11$ мм перевищує товщину штаби на ділянці 2 (рис.2,6,б). Застосування додаткового обтиснення в межах $\sum \Delta h_{d(5-9)} = 0,45$ мм (існуючий режим) сприяє зменшенню кінцевого потовщення до 0,08 мм. При $\Delta t_5 = 0$ задній кінець штаби (ділянка 4) можна прокатувати без додаткового обтиснення.

3. Підвищення температури заднього кінця розкату. При використанні між чорною і чистою групами клітей ШСГП з традиційною технологією проміжного пристрою для перемотування штаб (ППУ) задній кінець розкату в рулоні займає місце переднього кінця проміжного розкату. Як показують експерименти і при використанні ППУ на задній кінцевій ділянці відбувається істотний приріст товщини штаби на $\delta h_{II} = 0,08 \dots 0,15$ мм (рис.2.5) внаслідок відсутності заднього натягнення штаби в клітях стана. В умовах такого технологічного процесу на ШСГП усунення потовщення заднього кінця штаби можливо шляхом локального додаткового нагріву двох-трьох внутрішніх витків проміжного розкату в рулоні, внаслідок чого зменшуються сила прокатки штаби, пружні деформації кліті і товщина штаби.

При внутрішньому діаметрі рулону 600...650 мм довжина додатково нагрітої ділянки розкату складе $\sim 4,5$ м. Міра усунення потовщення кінцевої ділянки визначатиметься температурою додаткового нагріву даної локальної ділянки.

Нижче представлені результати розрахунку параметрів прокатки заднього кінця проміжного розкату завтовшки $H_{II} = 24 \times 1250$ мм на штабу завтовшки 2,5 мм (сталь марки 08пс) в шести клітях (кліті №№6-10) ШСГП 1700 з діаметром робочих валків $D_p = 600$ мм в усіх клітях і швидкістю прокатки в кліті №10 - $v_{10} = 9,0$ м/с. Ділянка розкату завдовжки ~ 4 м прокатується без заднього натягнення. Приймаємо температуру на кінці проміжного розкату рівної $t_i = 980^\circ\text{C}$ (базова), а температуру після додаткового нагріву на кінці проміжного розкату рівної, $^\circ\text{C}$: 1000, 1020 і 1050 [34]. Визначаємо по відомих залежностях [3,28,34,40]. енергосилові параметри прокатування і зміна товщини готової штаби, що відповідає точці 4 на кінці розкату при вказаних температурах прокатки. У сталому процесі прокатки переднє і заднє натягнення рівні $\sigma_{II} = \sigma_3 = 15 \text{ Н/мм}^2$, а при прокатуванні заднього кінця без натягнення - $\sigma_3 = 0$.

Розрахункові параметри прокатування для базового сталого процесу з фіксованою товщиною штаби при $\delta h_{II} = 0$, а також параметри прокатки заднього кінця штаби в кліті №10 при початковій температурі 1000, 1020 і 1050°C заднього кінця проміжного розкату представлені в таблиці.2.1 -(початкові температури проміжного розкату має індекс «п»). У першій частині таблиці.2.1 представлені параметри прокатки заднього кінця проміжного розкату в серійному режимі, тобто при температурі кінцевої ділянки проміжного розкату, рівної $t_{II} = 980^\circ\text{C}$. Товщина готової штаби на задньому кінці прийнята рівною $h_{10} = 2,5$ мм і $\delta h_{II} = 0$. Як слідує з таблиці.2.1, коефіцієнт тертя у міру

зменшення товщини штаби істотно зменшується внаслідок переважаючого впливу швидкості прокатки (що збільшується) [28,40]. При прийнятому режимі деформації сила прокатки P зменшується від кліті до кліті, а модуль жорсткості штаби M_{Π} зростає з 1,43 до 7,88 МН/мм.

При додатковому нагріві заднього кінця проміжного розкату до температур $t_{\Pi}=1000, 1020$ і 1050°C (дослідний режим) сила прокатки і модуль жорсткості штаби зменшуються, що обумовлює зменшення приросту товщини кінцевої ділянки готової штаби на $\delta h_{\Pi}= 0,02\dots 0,12$ мм (останні три рядки в таблиці.2.1).

Таким чином, для усунення (зменшення) приросту товщини задньої кінцевої ділянки готової штаби необхідно заздалегідь підігрівати задній кінець розкату, що входить в валки першої кліті чистової групи ШСГП, додатково на $50\dots 70^{\circ}\text{C}$.

За наявності на стані ППУ необхідно додатково підігрівати внутрішні витки рулону проміжного розкату при його розмотуванні з ППУ. В цьому випадку у внутрішню його порожнину вводять стержень з індукційним нагрівачем, захищеним від ударів витками розкату, потужність якого достатня для нагріву металу до необхідної температури. Проте найбільш раціональним рішенням для зменшення подовжньої різнотовщинності штаб є установка перед і за ППУ індукційних печей, що підігрівають штабу, як це показано на рис.2.4, що забезпечує постійність температури по довжині проміжного розкату і незмінність силових параметрів прокатки.

4. Влияние градиента температур по длине промежуточного раската

На рис.2.7 представлені розрахункові величини кінцевого потовщення δh_{Π} на ділянці 4 при прокатуванні штаби 2×1250 мм. залежно від градієнта температур по довжині проміжного розкату Δt_5 по клітях стана 1700. Розрахунки виконані, як і в приведених раніше даних, по формулах (2.7) - (2.10).

Таблиця 2.1. Параметри прокатки штаби $2,5 \times 1250$ мм з проміжного підкату $H_{\Pi P}=24$ мм при різних температурах заднього кінця в точці 65 (для клітей 5-10серійний режим)

№ кліті	$h, \text{мм}$	f	$\rho_{\text{ср}}, \text{Н/мм}^2$	$P, \text{МН}$	$M_{\Pi}, \text{МН/мм}$	$t_{\Pi}, ^{\circ}\text{C}$	$\delta h_{\Pi}, \text{мм}$
5	14,0	0,355	226	15,8		980_{Π}	-
6	8,5	0,315	269	14,1	2,31	958	-
7	5,5	0,278	300	11,8	3,49	941	-
8	3,7	0,233	338	10,6	5,33	919	-
9	2,9	0,214	288	6,2	6,50	898	-
10	2,5	0,189	250	3,9	7,88	867	0
Дослідний режим							
10	2,48	0,188	249	3,8	7,9	1000_{Π}	-0,02
10	2,43	0,187	244	3,7	7,8	1020_{Π}	-0,07
10	2,38	0,185	237	3,5	7,4	1050_{Π}	-0,12

З рис. 2.7 слідує, що при збільшенні Δt_5 , відбувається лінійне збільшення кінцевого потовщення штаби $\delta h_{\text{П}}$ в усіх клітках чистової групи стана з максимальними значеннями при $\Delta t_5=65^{\circ}\text{C}$. Суть цього зростання обумовлена збільшенням різниці сил прокатки заднього і переднього ділянок штаби (см формулу (2.7)), а отже, збільшення пружних деформацій кліті і міжвалкового зазору. Найбільший приріст товщини штаби для усіх значень Δt_5 має місце в кліті при прокатуванні в кліті №6. У наступних клітках приріст $\delta h_{\text{П}}$ зменшується внаслідок зменшення градієнта температур між заднім і переднім кінцевими ділянками штаби.

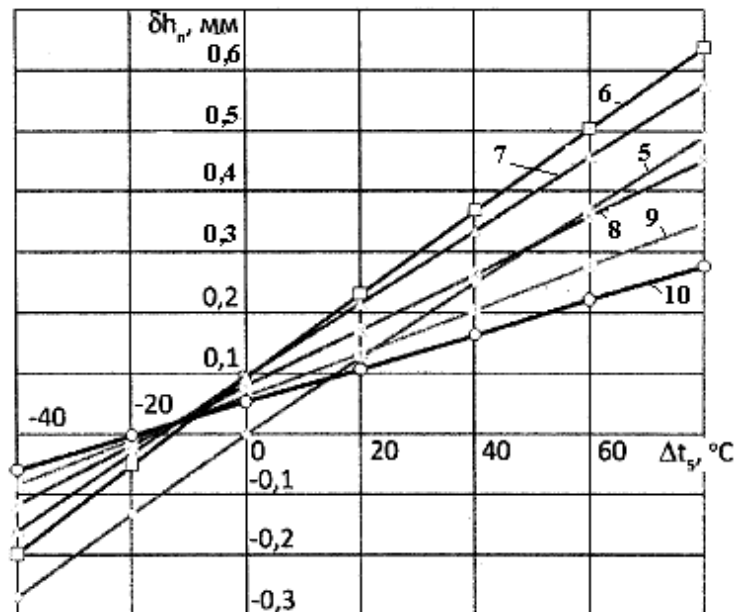


Рисунок 2.7-Вплив перепаду температур між ділянками 2 і 4 проміжного розкату на кінцеве потовщення ($H_{\text{ПР}} = 20 \text{ мм}$, $L_{\text{сл}} = 4,5 \text{ м}$)

5. Прискорення валків клітей чистової групи є загально-визнаним способом вирівнювання товщини по довжині штаби на ділянці температурного клину (ділянка 2-3 на рис.2.3)[35,46]. При прискоренні валків до кінця прокатки штаба нагрівається на $40...50^{\circ}\text{C}$, зменшуються напруження течії металу і коефіцієнт тертя, що викликає зменшення СНКН і сили прокатки. Для вирівнювання температури по довжині штаби в чистовій групі клітей залежно від товщини штаби потрібні величини прискорень в межах від $a = 0,03...0,12 \text{ м/с}^2$ ($h < 2,0 \text{ мм}$) до $a = 0,01... 0,03 \text{ м/с}^2$ ($h = 5... 16 \text{ мм}$).

Проте при довжині потовщеної кінцевої ділянки штаби на ШСГП $30...40\text{м}$, і при вказаних реальній величині прискорення і довжині ділянки, зменшення його товщини може бути усього лише в межах $\sim 0,02\text{мм}$, що явно недостатньо. При прокатуванні хвостової ділянки штаби завдовжки $L_y = 100...250 \text{ м}$ з прискоренням одночасно відбуваються наступні процеси:

-втрати тепла штабою внаслідок тепловипромінювання, теплообміну і конвекції зменшуються зі збільшенням швидкості прокатки;

-збільшення швидкості деформації металу, підвищення напруження течії металу і нормального контактного напруження;

-збільшення роботи пластичної деформації за рахунок збільшення швидкості прокатки і, разом з цим, виділення додаткового тепла, розігрівання штаби і зменшення напруження течії металу і середнього нормального контактного напруження;

–зменшення коефіцієнта тертя внаслідок збільшення швидкості прокатки і температури штаби.

Сукупність впливу вказаних чинників при достатньому прискоренні «а» забезпечує вирівнювання температури і товщини по довжині штаби. Так, за даними [35] при прокатуванні штаб 1,5x1050мм на стані 2000 з прискоренням $0,05\text{м/с}^2$ на довжині ~550м товщина штаби зменшується на ~0,15мм.

При прокатуванні штаб 2,7x1000 мм без прискорення (1) і з прискоренням (2) $a = 0,066\text{ м/с}^2$ отримали наступні дані при початковій швидкості $v_{\text{про}} = 7,52\text{ м/с}$ (Карагандинський меткомбінат) [46]:

Режим прокатки	$t_{\text{п}},$ °C	$t_{\text{з}},$ °C	$\Delta t,$ °C	L, м	$L_{\text{y}},$ м
1	858	828	30	440	-
2	852	857	-5	430	230

Тут $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{з}}$ - температура відповідно переднього і заднього кінців штаби після прокатки; Δt - перепад температур по довжині готової штаби; L і L_{y} - відповідно загальна довжина штаби і довжина штаби, прокатої з прискоренням..

На рис.2.8 представлені дані досліджень прокатки штаби 1,5x1050 мм на ШСПІ 2000 з прискоренням $a \approx 0,15\text{ м/с}^2$ [35]. З рис. 2.8 слідує, що при прискоренні штаби на профілограмі з'являються шість характерних ділянок. На ділянках I і VI завдовжки 30...40м товщина штаби значно вища за номінальну (1,5мм), що обумовлено відсутністю відповідно переднього і заднього натягнень штаби

На ділянці II провал товщини, пов'язаний з підвищеною температурою торця сляба. На ділянці III товщина штаби близька до номінальної. На ділянках I - III штаба прокатується без прискорення. Після захвату штаби моталкою починається прискорення стана (ділянка IV), при якому відбувається розігрівання металу, збільшення температури і зменшення товщини штаби внаслідок зменшення сили прокатки. На ділянці V діє автоматична система додаткового обтиснення заднього кінця штаби в клітках №6 - 9, але дія його недостатньо ефективно, оскільки потовщення штаби на довжині ~30м перевищує 0,2мм. При такій технології прокатки штаба отримує значну подовжню різно-товщинність

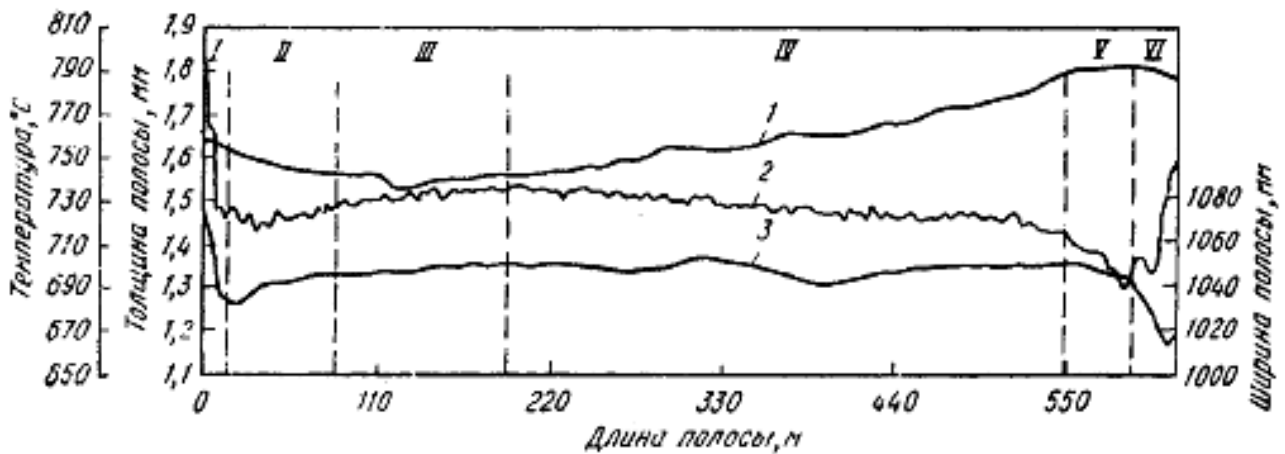


Рисунок 2.8- Изменение температуры (1), толщины (2) и ширины (3) полосы по длине рулона (сталь Ст. 3кп, полоса 1,5×1050 мм)

2.5 Нова технологія виробництва точної гарячекатаної штаби

На працюючих нині ШСГП з традиційною технологією і не високими швидкостями прокатки, при застосуванні електромеханічних натискних пристроїв і навіть при установці ППУ, не вдається істотно зменшити потовщення задньої кінцевої ділянки штаби, отримати подовжню різнотовщинність по довжині штаби в межах 0,02...0,03мм. Головними причинами цього є, як відмічали вище: менша температура на задньому кінці штаби, відсутність заднього натягнення штаби, нерівномірність розподілу температури по довжині штаби, неточність виготовлення валків.

При прокатуванні в 4-7-и клітях чистовій групі на ЛПА з неперервним процесом також відсутнє заднє натягнення штаби. Але внаслідок меншого градієнта температур по довжині штаби і значно більшої її довжини, чим на ШСГП, приріст товщини штаби на задньому кінці і відносна довжина потовщеної ділянки незначні.

Один з варіантів вдосконалення технології виробництва штаб на ШСГП запропонований в роботах [3,22,39,40,47-50], в яких головною відмінністю від існуючих ШСГП є зменшення власне чистових клітей з установкою перед ними ППУ, зменшення подовжньої різнотовщинності штаби, зниження питомої витрати електроенергії на прокатку штаб і можливість широкого варіювання деформаційно-швидкісним режимом прокатки штаб в чистовій групі клітей. Останній варіант розробок ШСГП –НТ (нова технологія) представлено на рис.2.9.

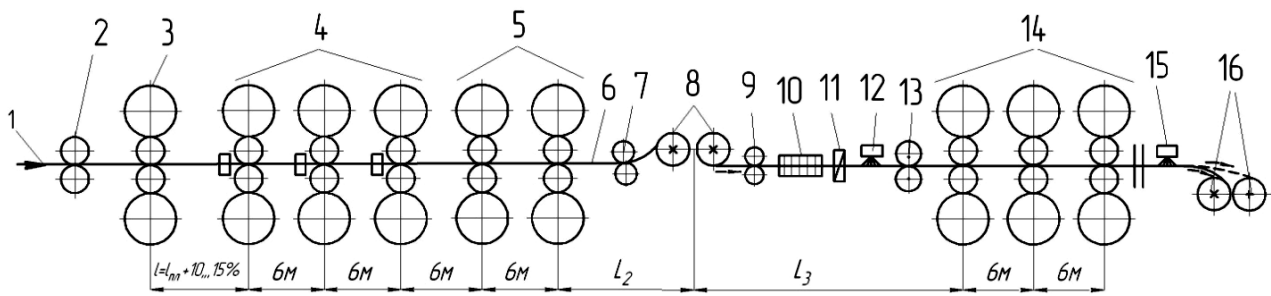


Рисунок 2.9 - Схема ШСГП-НТ : 1 - сляб; 2 – окалиноламач; 3 - чорнова кліть кварто; 4 - універсальні чорнові кліті кварто з вертикальними валками; 5 - чорнові кліті кварто; 6 - проміжний розкат; 7 - направляючі ролики; 8 - ППУ з теплозберігальним екраном; 9 - ролики, що тягнуть; 10 - прохідна індукційна піч; 11 - ножиці; 12,15 - пристрій для душирування ; 13 - чистовий окалиноламач; 14 - неперервна чистова група клітей; 16 - моталки готової штаби

Пропонований ШСГП-НТ (нова технологія) працює таким чином. Товстий сляб (завтовшки $H_{СЛ}=150...300$ мм і шириною $B=1000...2000$ мм) із слябінгу або машини безперервного литва заготовок (МНЛЗ) транзитом або після підігрівання в нагрівальних печах подають до чорнкової групи ШСГП-НТ, що складається з однієї кліті, що окремо стоїть, і неперервної групи з 5 (чи 6) клітей кварто. У неперервній чорнковій групі клітей розкат деформують до товщини $H_{ПР}=(3...6)h$ (де $H_{ПР}$ і h - відповідно товщина проміжного розкату, що виходить з неперервної чорнкової групи і товщина готової штаби, що виходить з чистової групи клітей). При цьому швидкість прокатки в останній кліті неперервної чорнкової групи (кліть №6) визначається механічними характеристиками головної лінії клітей і потужністю головних приводів.

На підставі практичних даних для прокатки розкатів вказаних розмірів швидкість прокатки в останній кліті чорнкової групи може складати $v=6...14$ м/с. Перевагою збільшення кількості клітей у неперервній чорнковій групі (при одночасному зменшенні кількості клітей до 3-х в чистовій групі), в порівнянні з традиційним ШСГП, являється збільшення температури прокатки відносно тонкого проміжного розкату і, разом з цим, зменшення кількості клітей на стані до 9-ти (при однакових розмірах валків, слябів і готової штаби, як і на традиційному ШСГП).

Після виходу з останньої кліті неперервної чорнкової групи №6 розкат змотується моталкою (чи Coilbox) в рулон масою 20...40 т. Проміжний пристрій (ППУ- Coilbox) перемотування розташований на відстані 12...15 м від осі останньої кліті №6 неперервної чорнкової групи і втрати температури на цій ділянці будуть незначними і, крім того, є можливість підігрівання штаби перед клітями чистової групи.

У чистовій групі клітей штабу прокатують по незалежному деформаційно-швидкісному режиму (від клітей чорнкової групи) і цей режим може регулюватися в широких межах. При цьому швидкість входу проміжного розкату в першу кліть чистової групи (кліть №7) може бути рівної швидкості

виходу з останньої кліти чорнової групи №6 (чи може бути дещо більшою). Штаба, що виходить з останньої кліти чорнової групи (кліть №6), внаслідок відомих причин (зниження температури і відсутність заднього натягнення штаби), має велику товщину на задній кінцевій ділянці.

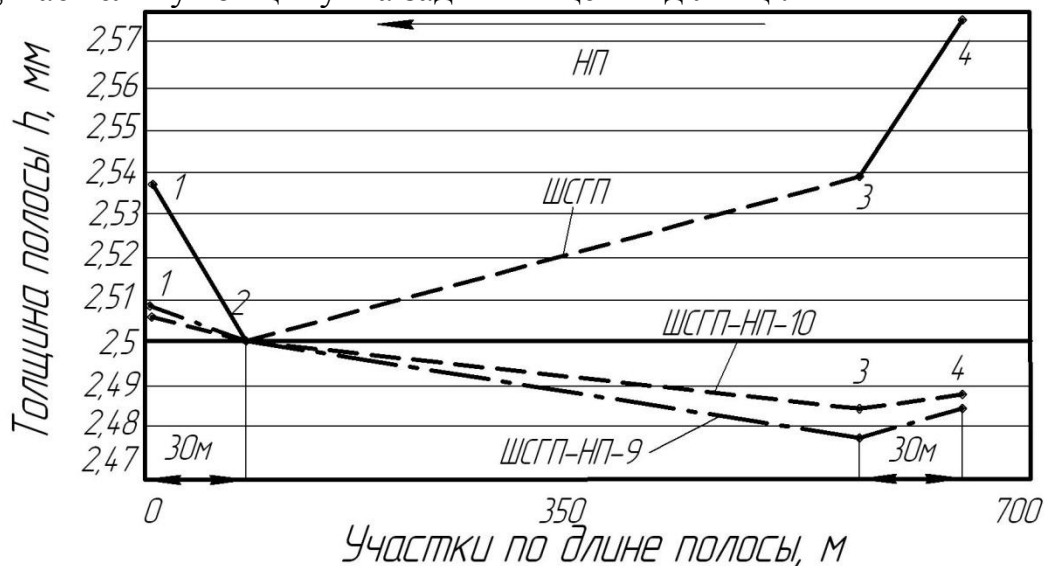


Рисунок 2.10 - Схеми зміни товщини штаби на ділянках 1-4 на станах 1700 різного типу. Товщина сляба $H=160$ мм, штаба $2,5 \times 1250$ мм, сталь 08пс, температура сляба в кліті №1 -1180°C , швидкість прокатки в чистовій кліті $v_{\text{ч}}=10$ м/с

На пристрої перемотування 7,8 відбувається зміна положення потовщеного кінця для завдання його в першу кліть чистової групи (кліть №7). При такому процесі прокатування (новий задній кінець штаби має більшу температуру і меншу товщину) забезпечується вирівнювання товщини по довжині штаби, а задній кінець штаби може бути на $0,03 \dots 0,05$ мм тонше за товщину переднього кінця [40,47].

При цьому в клітях №№4-6 сила прокатки на ШСГП (НТ) істотно менша, ніж на ШСГП (у клітях №№5-7), особливо при використанні 9-ти клітьового ШСГП -НТ. Зниження сили прокатки в клітях №№4-6 дозволяє помітно зменшити подовжню різнотовщинність готової штаби (рис.2.10).

Збільшення температури розкату і зниження коефіцієнта тертя забезпечують в клітях №№4-6 ШСГП -НТ помітне зниження опору металу деформації і середнього нормального контактного напруження (СНКН) (чинник форми $l_d/h_{\text{ср}}=2 \dots 4,5$). Сила прокатки в клітях чорнової групи зменшується з $16 \dots 19$ МН (ШСГП) до $8 \dots 13$ МН (ШСГП-НТ) Після зменшення температури при перемотуванні на ППУ сила прокатки декілька зростає в клітях чистової групи зі зменшенням сили до $4 \dots 4,5$ МН в останній чистовій кліті.

На рис.2.10 представлений характер зміни товщини штаби на ділянках 1-4 після прокатки в чистовій кліті для станів різного типу В усіх випадках задана товщина штаби для усіх станів відповідає ділянці 2 і рівна $2,5$ мм. Ділянка 1 відповідає передньому кінцю штаби, що прокатується в усіх клітях

без переднього натягнення, а ділянка 4 відповідає задньому кінцю штаби, що прокатується без заднього натягнення і при меншій температурі, ніж ділянка 2. В усіх випадках приймали відстань між ділянками 1-2 і 3-4 рівним 30м.

Зміна товщини штаби на ділянці 2-3 обумовлено градієнтом температур по довжині штаби і відповідною зміною відношення $P_i/M_{\Pi i}$ (P_i і $M_{\Pi i}$ - сила прокатки і модуль жорсткості штаби на ділянках) в порівнянні з фіксованою ділянкою 2 штаби. Відповідно до прийнятих параметрів прокатки градієнт температур по довжині штаби між ділянками 2 і 4 для серійного ШСГП виявився рівним $\Delta t_T = 20$ °С, а для ШСГП(НТ) $-\Delta t_T = 10$ °С (менша температура на ділянці 4). Міжклітьове напруження натягнення для останніх шості клітей усіх станів приймала рівними $\sigma_H = 15$ Н/мм². Приріст товщини на ділянках 1, 3, 4 в порівнянні з ділянкою 2 визначали по формулах (2.7) - (2.10).

Як слідує з розрахунків (рис.2.10), при прокатуванні на традиційному стані ШСГП максимальне потовщення $\delta h_{\Pi} = 0,074$ мм відповідає ділянці 4 заднього кінця, де товщина штаби виявилася рівною $h_4 = 2,574$ мм. Як показує практика на подібних станах (ШСГП 1680 меткомбінату "Запоріжсталь") [31] приріст товщини на ділянці 4 може бути і більше, оскільки тепловий режим штаби в рулоні на ППУ не контролюється і не регулюється. Це зауваження можна віднести до усіх станів, що мають ППУ, і на яких відсутні додаткові пристрої для стабілізації теплового режиму прокатки штаби в чистових клітях.

При прокатки в чистових клітях ШСГП -НТ для заданої товщини штаби (ділянка 2) приріст її спостерігається лише на ділянці 1 переднього кінця, а на ділянках 3 і 4 штаба прокатана в кліті №9 на мінус $\delta h_{\Pi} = -0,022$ мм, (на 10-ти клітьовому стані на $-0,015$ мм) внаслідок того, що в клітях чистової групи ШСГП-НТ штабу прокатують з більшою температурою в клітях №7,8, чим на ШСГП ($t_8 = 924$ °С). Так, наприклад, температура на вході в кліть №8 для ШСГП-НТ (10 клітей) складає $t = 937$ °С (більше на 13°С). Ще більша різниця в температурах кінця прокатки штаби в клітях №10: відповідно до 832 і 859°С тобто різниця складає 27 °С).

Таким чином, на ШСГП-НТ основна деформація розкату виконується в клітях чорнової групи (6-7 клітей), а завершальний деформаційний етап виконується в чистовій групі з трьох клітей, перед якою встановлене ППУ і прохідна індукційна піч. Така схема розташування робочих клітей забезпечує:

- підвищення температури розкату (штаби) на 25...39°С після чистової кліті;

- підвищення точності прокатки штаб за рахунок зменшення товщини задньої кінцевої ділянки і температурного клину;

- зниження сумарної потужності прокатки на стані на 15.25% за рахунок підвищення температури штаби і зменшення кількості клітей з 6-7 до 3-х, що беруть участь в процесі прискорення штаби після захвату її переднього кінця моталкою.

2.6 Особливості холодної прокатки штаб на неперервних станах

Неперервні чотирьохкільцеві стани холодної прокатки меткомбінату «Запоріжсталь» (стан 1680, м. Запоріжжя - ЗМК) і Маріупольського меткомбінату (ММК-стан 1700) відносять до станів перших поколінь. Фактична швидкість прокатки на цих станах не перевищує 9 і 12 м/с відповідно, а управління процесом прокатки робиться вручну. На станах застосовують порулонний спосіб прокатки при масі укрупненого рулону 10...30т.

На рис.2.11 представлено схему розташування устаткування чотирьохкільцевого неперервного стана 1700 порулонної холодної прокатки (ММК). Укрупнені рулони після усунення окалини на неперервно - травильному агрегаті подають мостовими кранами на приймальний транспортер 1, з якого вони поступають на стіл розмотувача 2. Розмотувач має два конусні виступи і щоківини для центрування і бічного затиску рулону. Відгинач переднього кінця рулону 3 задає його в роликівий натяжній пристрій 6 і після захвату штаби валками першої кліти 7 починається процес прокатки.

На початку передній кінець штаби, поки він не зайде в моталку, прокатують на заправній швидкості, рівній 0,5...1,0 м/с, і потім швидкість збільшують до максимальної швидкості 9...12 м/с. В період заправки штаби в стан її передній кінець прокатують без переднього натягнення, зазор між валками зменшують з метою необхідного обтиснення штаби і отримання близької до номінальної товщини.

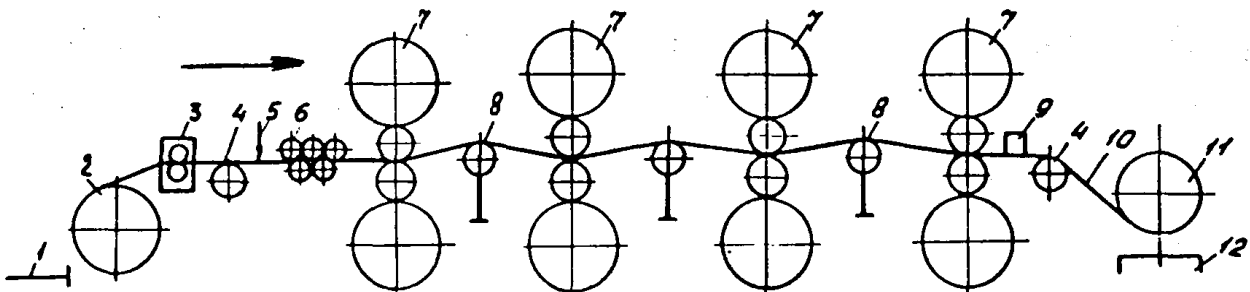


Рисунок 2.11 - Схема розташування устаткування неперервного чотирьохкільцевого стана порулонної холодної прокатки : 1 - приймальний транспортер; 2 - розмотувач; 3 - відгинач кінців рулонів; 4 - обвідною ролик; 5 - індикатор шва; 6 - роликівий натягувач ; 7 -чотирьохвалкові кліти; 8 - ролик тензометричного пристрою; 9 - товщиномір; 10 - готова штаба; 11 - моталка; 12 - прибиральний транспортер

При проході переднього кінця штаби через стан і для отримання товщини заданого розміру натискні гвинти першої кліти опускають (по продуктіметру) на $S_1 = 0,7...1,0$ мм (відносно нульового положення) , в другій кліти на $S_2 = 0,5$ мм, в третій кліти – на $S_3 = 0,3$ мм нижче встановленого для прокатки цього розміру штаби в сталому процесі. . Тобто валки цих клітей встановлюють «в забій» (мінусовий зазор) для компенсації пружного розтягування кліти. При захваті переднього кінця штаби моталкою натискні гвинти клітей 1-3 повертають до

первинного нульового положення (по продуктіметру- прилад, що показує величину переміщення натискних гвинтів).

Під час прокатки штаби на швидкості $v_4 = 9...12$ м/с стабільність товщини штаби забезпечується або вручну або регулюється автоматично (тонке регулювання) залежно від зміна величин міжклітьових натягнень штаби.

Як правило, величини міжклітьових натягнень коливаються в період проходження штаби через кліті стан в сталому процесі внаслідок наявності

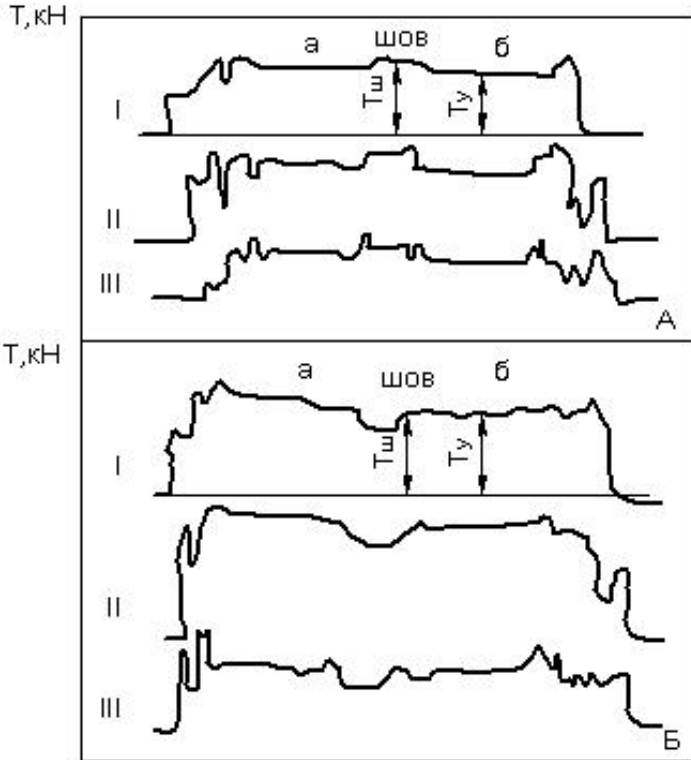


Рисунок 2.12- Сила натягнення (Т) при прокатуванні штаб 1x1250 мм з підкату Н = 3 мм з уповільненням швидкості на ділянці шва з $v_4 \approx 8,0$ м/с до $v_{4ш} \approx 2,5$ м/с (а-перший рулон; б-другий рулон). Переміщення натискних гвинтів : А: $S_1=0,4$ мм; $S_2=0,35$ мм (існуючий режим); б: $S_1=0,4$ мм; $S_2=0,6$ мм; $S_3=0,5$ мм; $S_4=0,2$ мм ($\sum S=1,70$ мм) (дослідний режим); I, II, III - міжклітьові проміжки подовжньої різнотовщинності початкового

гарячекатаного підкату, биття валків стана, зміни умов тертя і тому подібне. При підході до кліті 1 ділянки штаби із зварним швом від індикатора шва швидкість валків на виході з чистової кліті автоматично (або вручну зменшується до $v_{4ш} = 2...3$ м/с. Зменшення швидкості обумовлене побоюванням пориву шва, «забуривання» штаби на повній швидкості і ушкодження валків усіх клітей.

Прокатка штаби на зменшеній швидкості знижує втрати у разі пориву шва. При прокатки ділянки шва на малій швидкості відбувається найбільша зміна величин міжклітьових натягнень (рис.2.12). При такому режимі прокатки натягнення штаби на усіх ділянках стана зростають на 10...40% в порівнянні з прокаткою на максимальній швидкості (рис.2.12). Збільшення натягнень відбувається внаслідок розузгодження швидкостей прокатки і, отже, секундних об'ємів по клітях стана. Зниження окружної швидкості валків призводить до збільшення коефіцієнта тертя [28,29,40] і, отже, сили прокатки, зазору між валками і товщини штаби на ділянці шва. Застосування додаткового обтиснення на НСХП 1680 меткомбінату «Запоріжсталь» тільки в клітях 1 і 2 при прокатуванні шва на зменшеній швидкості викликає збільшення міжклітьових натягнень на першому і другому ділянках в 1,17...1,37 разу в порівнянні з натягненням в сталому процесі

Після виходу шва з останньої кліті швидкість валків і зазор між валками збільшують до номінальних параметрів. Частенько штаби завтовшки більше 1,4

мм з якісним швом прокатують на максимальній швидкості без регулювання межвалкового зазору, що дозволяє збільшити продуктивність стана, але приводить одночасно до збільшення подовжньої різнотовщинності готової штаби внаслідок збільшення сили прокатки і пружних деформацій кліті на потовщених ділянках штаби в районі зварного шва.

При підході заднього кінця до кліті 1 окружну швидкість валків зменшують до $v_{1к} = 0,5$ м/с і одночасно зменшують міжвалковий зазор (по продуктіметру) в усіх чотирьох клітях таким чином (мм) : $S_{1-3} = 0,5 \dots 0,6$;

$S_4 = 0,2$. При додатковому обтисненні заднього кінця тільки двома клітями в межах $S_1 + S_2 = 1,45$ мм по продуктіметру товщина заднього кінця на тонких штабах завжди перевищує номінальну товщину штаби.

На неперервних станах холодної прокатки штаб застосовують, як правило, чотиривалкові кліті, що мають два робочих і два опорних валки (рис.2.11). Опорні валки великого діаметру, забезпечуючи жорсткість вузла, запобігають значному прогину робочих валків. При деформації металу робочими валками невеликого діаметру створюється порівняно невелика підпираюче подовжнє напруження σ_3 в осередку деформації, що обумовлюють менше середнє нормальне контактне напруження в порівнянні з прокаткою у валках великого діаметру. Це, а також менша довжина дуги контакту визначають і меншу величину сили прокатки в порівнянні з прокаткою у валках великого діаметру.

Охолодження валків виконують мастильно-охолоджувальною рідиною СОЖ (емульсія) з концентрацією мінерального масла 2...4%. Емульсія не лише охолоджує валки і штабу, але і знижує сили тертя на контактних поверхнях осередку деформації. При цьому емульсія не повинна забруднювати готову штабу.

Режим деформації штаби на станах розробляють з урахуванням рівномірного завантаження головних приводів та сили прокатки по клітях (окрім останньої). Проте це можливо виконати на п'ятіклітьовому стані і частенько не вдається здійснити на старих чотирьохклітьових неперервних станах.

На виході з останньої кліті поверхня штаби спеціально захищають від попадання на неї емульсії, яка при рекристаллізаційному відпалі залишає на поверхні штаби чорні плями.

2.7 Подовжня різнотовщинність штаб при холодному прокатуванні

Для станів порулонної холодної прокатки характерні значні потовщення штаби на кінцевих ділянках і на ділянці зварного шва відносно номінальної (мінімальною) товщини штаби, отриманої при прокатуванні на максимальній можливій швидкості в сталому процесі. Головними причинами появи потовщених ділянок штаби при холодному прокатуванні є [1,14,19,35,41 та ін.]:

- спадкова подовжня різнотовщинність від гарячекатаної штаби;
- відсутність натягнень кінцевих ділянок штаби, що викликає збільшення сили прокатки, межвалкового зазору і, отже, товщина штаби;

- зниження окружної швидкості валків при пропуску кінцевих ділянок і зварного шва, що призводить до збільшення коефіцієнта тертя, сили прокатки, межвалкового зазору і товщини штаби;

- збільшення міжклітьового натягнення при пропуску шва на зменшеній швидкості у ряді випадків призводить до пориву шва і збільшення витрати металу, ушкодження валків і деталей головної лінії стана;

- наявність ексцентриситету діаметрів і шийок робочих і опорних валків створює високочастотну різнотовщинність штаби.

На станах вказаного типу приріст товщини готової штаби на ділянці шва складає $\delta h_{II} = 0,10 \dots 0,15$ мм, а на задньому кінці приріст товщини штаби істотно більший. В умовах чотирьохклітьового неперервного стана порулонної холодної прокатки (НСХП), де ділянку шва прокатують з додатковим обтисненням в клітках 1 -3 на $0,4 \dots 0,6$ мм (по продуктіметру) приріст товщини зменшується до $\delta h_{II} = 0,06 \dots 0,10$ мм.

На п'ятиклітьових станах безперервної прокатки ділянки зварних швів прокатують в клітці №5 на швидкості, рівній $4 \dots 5$ м/с і це виключає помітне збільшення товщини штаби і, отже, і подовжня різнотовщинність штаби складає $0,04 \dots 0,05$ мм. Наявність невеликої різнотовщинності штаб при такій швидкості обумовлена невеликою відмінністю коефіцієнтів тертя і сили прокатки в порівнянні з цими параметрами в сталому процесі на швидкості $v > 15 \dots 20$ м/с.

Вплив додаткового обтиснення ділянок штаб. При порулонному прокатуванні зменшення приросту товщини на ділянці шва забезпечується застосуванням раціонального режиму додаткового обтиснення ділянок штаб що прокатуються на зменшеній швидкості [51,52]. Вивчення впливу додаткового обтиснення на зміну міжклітьових натягнень і товщину штаби на ділянці зварного шва виконували на НСХП 1680 з використанням необхідних приладів. Силу натягнення визначали месдозами, які встановлено під опори роликів між клітками, а їх показання записували на стрічку самописця Н-338-4.

Товщину штаби вимірювали ізотопним товщиноміром РТ-7015 за четвертою кліткою і записували самописним приладом КСП-4. Як слідує з рис.2.12, А, при використанні існуючого режиму додаткової деформації міжклітьове натягнення при прокатуванні ділянки шва зростає на $\sim 17 \dots 37$ %, що в певних умовах може бути причиною його розриву. В цьому випадку сумарне переміщення натискних гвинтів по продуктіметру склало $\Sigma S = 0,75$ мм. Підвищення сумарного загального обтиснення ділянки шва до $\Sigma S = 1,70$ мм (по продуктіметру) одночасно в усіх клітках) (рис.2.12, Б) забезпечує істотне зниження міжклітьових натягнень і товщини шва. Сумарне додаткове переміщення натискних гвинтів ΣS залежить від розміру штаби (рис.2.13). Відповідно до дослідних даних для отримання $\delta h_{II} = \delta h_{III} = 0$ на ділянці шва сумарне додаткове обтиснення повинне перевищувати $\Sigma S = 1,3$ мм (рис.2.13) і залежно від товщини готової штаби може бути визначено з формули(мм)

$$\Sigma S \approx 0,8 + 0,6h.$$

З рис.2.13 і приведеної формули слідує, що зі збільшенням товщини штаби для отримання $\delta h_{II} = 0$ необхідно підвищувати сумарне додаткове обтиснення по продуктіметру, використовуючи для цього усі кліті стана, що і було рекомендовано для практичного застосування.

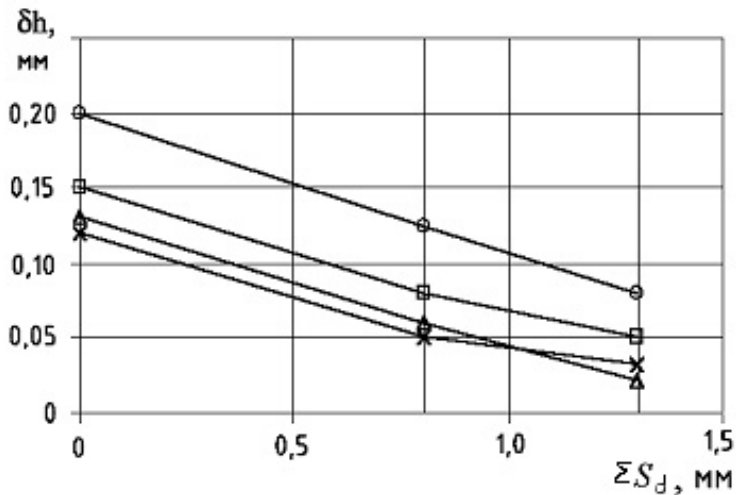


Рисунок 2.13. Зміна подовжньої різнотовщинності при прокатуванні ділянки зварного шва із швидкістю $v_{4ш} = 2,0 \dots 2,5 \text{ м/с}$ при різних режимах додаткового обтиснення (сталь 08 пс): х - 2,7-0,8x1250 мм; Δ - 3,0-1,0x1250 мм; □ - 3,5-1,4x1000 мм; О - 3,8-2,0x1100 мм.

Розподіл обтиснень S_i по клітях повинно задовольняти умові рівності секундних об'ємів. Дані рис.2.13 відповідають умовам прокатки швів при швидкості $v_{4ш} = 2 \dots 2,5 \text{ м/с}$ ($v_{4ш}$ - окружна швидкість валків в кліті 4 при прокатуванні ділянки шва).

Досліди показують, що за відсутності додаткового обтиснення в клітях збільшення окружної швидкості валків з $v_4 \approx 2,0 \text{ м/с}$ до $v_4 \approx 5,5 \text{ м/с}$ приводить до зменшення приросту товщини штаби 0,8x1250 мм на ділянці шва з $\delta h_{II} = 0,12$ до $\delta h = 0,04 \text{ мм}$, тобто в три рази. Одночасно зменшується довжина потовщеної ділянки із зварним швом. Збільшення товщини штаби при невеликій швидкості прокатування обумовлене підвищенням коефіцієнта тертя, сили прокатки, пружних деформацій кліті і збільшенням міжвалкового зазору, а також відмінністю спливання шийок опорних валків в підшипниках рідинного тертя.

Більш жорсткі умови деформації металу існують при прокатуванні задніх кінцевих ділянок штаби, які прокатують за відсутності заднього натягнення і із швидкістю $v_k = 0,5 \dots 1,0 \text{ м/с}$. Крім того, частенько при випуску заднього кінця штаби додаткове обтиснення металу виконують лише в клітях №№1,2, а валки клітей №3,4 піднімають і задній кінець штаби прокатують без обтиснення. У зв'язку з цим розробка деформаційний - швидкісного режиму кінцевих ділянок штаби на станах порулонної прокатки вимагає виконання спеціальних теоретичних і експериментальних досліджень

Раціональні додаткові обтиснення в усіх чотирьох клітях стана сприяють зниженню міжклітьових натягнень і подовжньої різнотовщинності штаби на ділянках зварних швів. Зниження міжклітьових натягнень забезпечує також зменшення розривів швів і виходу робочих валків з ладу. При прокатуванні ділянки шва рекомендуються наступні додаткові обтиснення штаби (по

продуктіметру)[51,52] : в клітках: 1-3 - $S_{1-3} = 0,4...0,6$ мм, в кліті 4 - $S_4 = 0,2$ (S_i - переміщення натискних гвинтів по продуктіметру).

Прокатка штаб на НСХП після додаткового перемотування гарячекатаного рулону. Суть пропонованого способу прокатки для існуючої порулонної технології виробництва холоднокатаних штаб полягає в тому, що внутрішній товщий кінець штаби (до або після НТА), переводять при попередньому перемотуванні в положення верхнього витка і після перемотування задають його в кліті НСХП [50,53].

Відомо, що заправку переднього кінця штаби в кліті НСХП і випуск заднього кінця виконують при істотно менших швидкостях ($v_i < 1,0$ м/с), ніж в сталому процесі ($v_y \geq 8$ м/с).

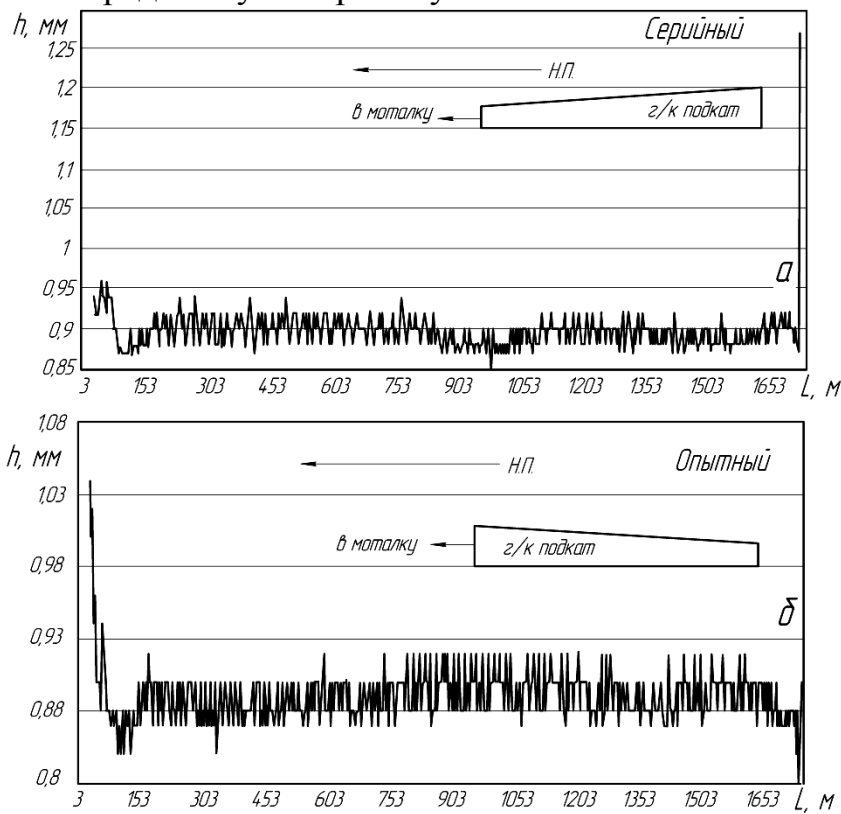


Рисунок 2.14- Профілограми товщини по довжині штаби 0,9x1000мм (ст. 08кп): а - серійна прокатка; б - нова технологія з перемотуванням рулону (Н.П. - напрям прокатки)

У цих умовах коефіцієнт тертя, сила прокатки і, отже, товщина штаби на кінцях штаби завжди виявляється дещо більшою, ніж при прокатуванні в сталому процесі [28,29]. У практичних умовах кінцеві ділянки піддають додатковому обтисненню в декількох клітках, але це як показано вище, не забезпечує повного вирівнювання товщини по довжині штаби.

Крім того, відомо так само, що довжина переднього заправного кінця істотно менша, ніж довжина потовщеної кінцевої ділянки при випуску штаби із стана. Так, для чотирьох-клітьових станів типу 1700 довжина готової штаби на заправній ділянці переднього кінця складає ~12 м, а довжина готової штаби, прокатої на невеликій швидкості при випуску із стана заднього кінця складає ~50м. Тому після проміжного перемотування гарячекатаного рулону зовнішній, товщий початковий кінець штаби, будучи переднім, менший час прокатують на заправній швидкості (довжина (12 м)). Подальші ~38 м прокатують після прискорення стана впродовж 2,0...2,5с і в сталому режимі при меншій силі прокатки, в порівнянні з прокаткою цієї ділянки у разі розташування його на задньому кінці (при випуску його з клітей НСХП в серійних умовах плющення). Задній кінець штаби в новому технологічному процесі має меншу спадкову

різновтовщинність, що також обумовлює менше потовщення кінцевої ділянки готової штаби.

Новий технологічний процес прокатки штаб, був випробуваний на чотирьохкільтовому НСХП 1680 ВАТ меткомбінат «Запоріжсталь» [50,53]. Перед прокаткою штаб з розмірами 0,9x1000 мм із сталі 08кп три рулони масою по ~11,3т з плавки перемотані без додаткового обтиснення на реверсивному стані 1680 з виводом на зовнішній виток товстого кінця (товщина гарячекатаного підкату ~ 2,7 мм, товщина заднього кінця 2,82...2,85 мм).

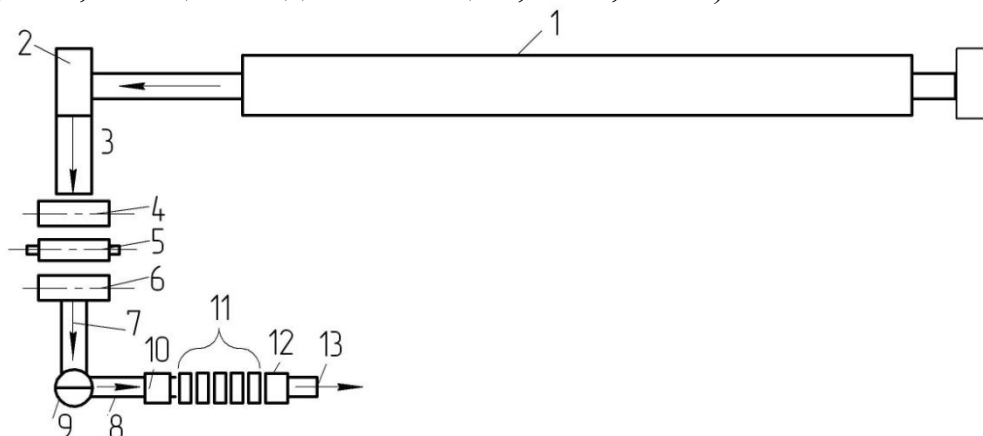


Рисунок 2.15- Схема розташування устаткування при виробництві холоднокатаних штаб з проміжним агрегатом (ППА) перемотування: 1-НТА; 2-роликів машина (моталка); 3-транс-портер; 4-розмотувач; 5-ролики, що тягнуть (прокатна кліть); 6-моталка; 7, 8-передавальні транспортери; 9-поворотний стіл; 10-розмотувач; 11-НСХП; 12-моталка; 13-прибиральний пристрій.

Дослідні рулони прокатували по серійному режиму, а параметри прокатки фіксували ізотопним товщиноміром з подальшою обробкою даних в комп'ютерній системі. На рис.2.14 представлена експериментальні профілограми товщини готових штаб при серійній (а) і дослідній (б) прокатках. Як слідує з профілограм, відносно мінімальної товщини штаби

(~ 0,9 мм), сумарне потовщення переднього і заднього кінцевих ділянок штаби складає (мм) : серійна штаба $\sum \delta h_{II} = 0,43$; дослідна штаба $\sum \delta h_{II} = 0,13$, що істотно менше.

Крім того, в дослідному рулоні значна довжина кінцевих, ділянок, що додатково обтиснюють, прокатана в мінусовому допуску. За даними комп'ютерної реєстрації і обробки даних середня довжина придатної готової штаби збільшилася з $L_C=1565$ м (96,47 % придатного) в серійних рулонах до $L_{OP}=1578$ м (97,39 % придатного) в досвідчених рулонах, тобто на 0,92 % більше.

Таким чином, застосування в промисловості на подібних станах пропонованого технологічного процесу при невеликому об'ємі інвестицій, дозволить істотно поліпшити подовжній (і поперечний) профілі і підвищити вихід придатного холоднокатаного металу. Пристрій для проміжного агрегату

перемотування гарячекатаних штаб (ППА) після травлення може бути встановлений на ділянці між НТА і НСХП (рис.2.15). В цьому випадку рулон з НТА по транспортеру 3 передають до проміжного агрегату перемотування 4-6 (ППА), а потім пристроями 8-10 передають на неперервний стан холодного прокатування (НСХП) 11, після чого штаб прокатують на стані 11 і змотують в рулон на моталку 12.

Безперервний процес прокатки штаб застосовують на сучасних п'ятиклітьових НСХП, швидкість прокатки рулонів, на яких складає 25м/с і більше [2,3] (Безперервний процес прокатки штаб- це процес, який виконують без перерв, без пауз). Процес прокатки в безперервному режимі триває від перевалки до перевалки або до вимушеної зупинки стана і при такому способі прокатки немає великих проблем з подовжньою різнотовщинністю і потовщенням на кінцевих ділянках у зв'язку з їх відсутністю. У цьому процесі величина потовщення на ділянках стикового зварювання не перевищує $\delta h_{\text{П}} \leq 0,05 \text{ мм}$, а вихід придатного складає 98,5...99%, тобто на одну тону прокату втрати складають 10...15кг (втрати прокату в обрізь доводяться на видалення ділянок зварювальних стиків).

3. ПОГОННІ СИЛИ ТА ПРОГІБ ВАЛКІВ КЛІТІ КВАРТО

Формування поперечної різнотовщинності і площинності штабової сталі багато в чому обумовлене параметрами пружних деформацій валкової системи (прогинами валків) і раціональністю початкових профілювань бочок твірних валків. У зв'язку з цим розглянемо вплив основних технологічних чинників на зміну характеру взаємодії опорного, робочого валків і штаби і загальні закономірності пружного прогину валків, спираючись на відомі розробки [12,41,53-63 та ін.].

С достатньою для практики точністю завдання визначення прогинів валкового вузла може бути вирішене з використанням диференціального рівняння зігнутої осі балки, де робочий валок розглядається як балка, що лежить на пружній основі (на опорному валку). При цьому враховується можливість контакту на частини довжини валків, враховується форма їх, що утворюють і міра нерівномірності навантаження робочого валка з боку опорного валка і штаби.

Для можливості теоретичного розрахунку пружних деформацій (прогинів) валків в першу чергу необхідно визначити допоміжні параметри, такі як погонні сили на пружному міжвалковому контакті (між робочим і опорному валками - МВК) і погонні сила на пружно-пластичному контакті (між робочим валком і штабою- ППК) .

3.1 Погонні сили на міжвалковому контакті

Деформація металу супроводжується виникненням міжвалкових погонних сил $q(y)$ і погонних сил у контакті із штабою $p(y)$ (рис.1.4), значення яких

визначають таким чином:

$$q(y) = \frac{P_i}{L_i}; \quad p(y) = \frac{P_i}{B_i}, \quad (3.1)$$

де P_i - сила площення, діюча на ділянці L_i довжини бочки валка або на ділянці B_i ширині штаби.

У загальному випадку ці погонні сили по довжині валків нерівномірні і від співвідношення $q(y)$ і $p(y)$ багато в чому залежить величина власне прогину робочого валка W_1 (рис.3.1). Під власним прогином робочого валка розуміють міру нерівномірності його пружного сплюснення у контакті з опорним валком. Встановлено, що при контакті вузьких штаб міжвалкові погонні сили під штабою $p(y)$ максимальні в середній частині ширини контакту з робочим валком (рис.1.4, епюра4), що відповідає епюрі розподілу нормального контактного напруження в осередку деформації в контакті штаби 3 з робочим валком 2 при прокатуванні вузької штаби за даними [11]. Для цього випадку прокатки епюра міжвалкових погонних сил також має опуклий вигляд (епюра 4), що встановлено в роботах [55,57]. Тобто для цих умов деформації металу маємо:

$$q_1/q_0 < 1 \quad \text{и} \quad p_1/p_0 < 1,$$

де q_1 і q_0 - міжвалкові погонні сили відповідно на краю контакту і по осі; p_1 і p_0 - погонні сили прокатки в осередку деформації на краю і в середині ширини штаби.

При прокатуванні широких штаб максимальні погонні (локальні) сили p_1 діють на кромках штаби, а мінімальні p_0 - по осі штаби, тобто $p_1/p_0 > 1$. Появу максимальної погонної сили p_1 на кромці (епюра 5) обумовлено більшою жорсткістю крайових ділянок опорного валка, затисканням кінцевих ділянок робочого валка і, отже, більшою пластичною деформацією крайових ділянок штаби і, відповідно, більшими величинами нормальних контактних напружень.

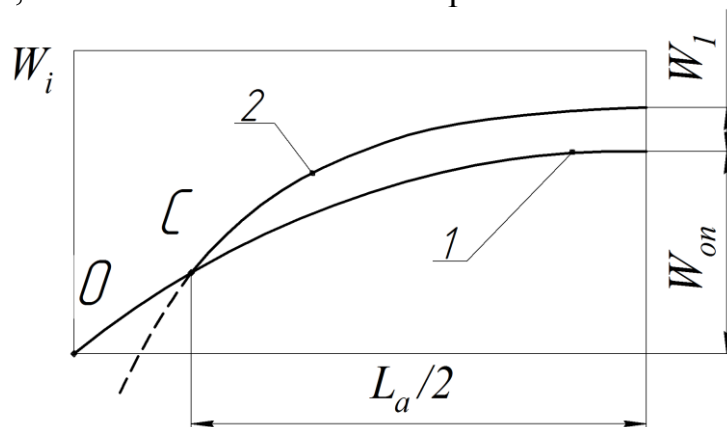


Рисунок 3.1 - Схема прогинів опорного (1) і робочого (2) валків (L_a - довжина фактичного міжвалкового контакту)

У відповідність з розподілом погонних (локальних) сил по ширині штаб і на міжвалковому контакті виникає відповідна форма епюри 5 (з увігнутим профілем) міжвалкових погонних сил, при якій $q_1/q_0 > 1$.

Експериментальні дослідження показують, що міжвалкові погонні сили розподіляються по довжині валків за параболічним законом, який можна виразити у виді

$$q(y) = q_0 + a^1 \cdot y^m. \quad (3.2)$$

де a_1 - коефіцієнт, визначуваний з граничних умов коли при $y = b$ погонна сила рівна $q(y) = q_1 = n \cdot q_0$, тобто

$$n \cdot q_0 = q_0 + a^1 \cdot b^m. \quad (3.3)$$

З рівняння (3.3) отримаємо

$$a^1 = q_0(n - 1) / b^m, \quad (3.4)$$

де b - половина довжини міжвалкового контакту; n - коефіцієнт нерівномірності розподілу міжвалкових погонних сил; m - показник степені параболи, що представляє твірну бочки валка.

Тоді

$$q(y) = q_0 \left[\frac{y^m}{b^m} (n - 1) + 1 \right]. \quad (3.5)$$

Приймаємо рівність площ епюр міжвалкових сил і загальної сили прокатки у контакті зі штабою. Сила прокатки P на міжвалковому контакті з урахуванням розподіленого навантаження рівна

$$P = \int_{-b}^b q(y) dy = 2q_0 b \left[1 + (n - 1) \frac{1}{1 + m} \right].$$

Звідки

$$q_0 = \frac{P(n + m)}{2b(n + n)}. \quad (3.6)$$

Підставляючи рівняння (3.6) в рівняння (3.5) отримуємо

$$q(y) = \frac{P(n + m)}{2b(n + n)} \left[1 + (n - 1) \frac{y^m}{b^m} \right].$$

У цьому рівнянні $P/2b = q$ - дорівнює середній величині погонних сил, тобто

$$q(y) = \frac{q \cdot (1 + m)}{m + n} \left[1 + (n - 1) \frac{y^m}{b^m} \right] \quad (3.7)$$

Із рівняння (3.7) слідує, що параметр $q(y)$ є сложна функція y/b , m и n , так як сам коефіцієнт n залежить від параметрів y/b (B/L) и D_1/D_2 и змінюється у межах:

при прокатуванні вузьких штаб ($B/L=0,5$), $D_1/D_2=0,3$, $m=2$, $n=0,13$
отримаємо:
 $y/b=1$ (край бочки) - $q(y)=q_1=0,182q$;
 $y/b=0$ (середина бочки) - $q(y)=q_0=1,41q$;

при прокатуванні широких штаб ($B/L=0,85$), $D_1/D_2=0,3$, $m=2$, $n=0,61$ отримуємо:

$$y/b=1 \text{ (край бочки)} \quad - \quad q(y)=q_1=0,7q;$$

$$y/b=0 \text{ (середина бочки)} \quad - \quad q(y)=q_0=1,15q.$$

З розрахунку виходить, що нерівномірність міжвалкових сил і величина коефіцієнту n відбувається, головним чином, внаслідок зміни ширини штаби і власного прогину робочого валка. Збільшення коефіцієнту n (зменшення нерівномірності міжвалкових сил) свідчить також про зменшення нерівномірності зносу опорного валка.

Як слідує з формули (3.7), при значеннях коефіцієнту $n < 1$ еюра між валкових сил має опуклий вигляд, а при $n > 1$ - увігнутий, тобто в цьому випадку величини $q(y)$ максимальні на краях бочок. Це можливо при прокатуванні широких штаб у валках з $D_1/D_2 \geq 0,4$.

Залежність коефіцієнта n для циліндричних валків для рівняння (3.7) визначені з даних В. П. Полухіна [55,57] і представлена в наступному виді

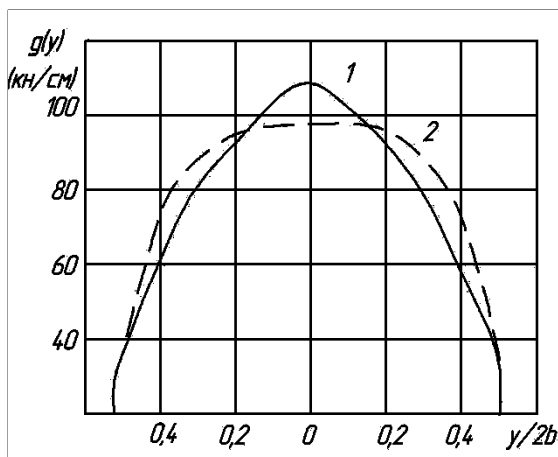
$$n = \left[5 \cdot D_1/D_2 - 0,5 \right] \cdot \left[0,13 + 2,17 \left(\frac{B}{L_a} - 0,5 \right)^{1,5} \right]. \quad (3.8)$$

З урахуванням форми і опуклості твірної опорного валка [64] отримаємо

$$n = n_m n_f \left[5 \cdot D_1/D_2 - 0,5 \right] \cdot \left[0,13 + 2,17 \left(\frac{B}{L_a} - 0,5 \right)^{1,5} \right]; \quad (3.9)$$

$$n_m = 1,03 - 0,03m; \quad n_f = 0,5 + 0,5 \sqrt{1 - 1000 f_\Sigma / L^2}, \quad (3.10)$$

де f_Σ - сумарна опуклість опорного і робочого валків на радіус; n_m -ко-



фіцієнт, що враховує вплив форми твірної опорного валка $\therefore n_f$ -коефіцієнт, що враховує вплив величини опуклостей валків..

При розрахунку міжвалкових погонних сил за формулою (3.7) показник степені m відображає форму твірної валків. .

Рисунок 3.3-Розподіл міжвалкових погонних сил при m : 1-2; 2-4.

З рис.3.3 слідує, що у разі застосування профілю бочки у вигляді параболи другої степені ($m=2$, крива 1) величини $q(y)$ змінюються по параболі з «загостреною» вершиною, що сприяє появі максимальних локальних величин $q(y)$ і місцевому зносу бочок валків. У разі застосування профілю бочок з параметром $m \geq 4$ міжвалкові погонні сили більше рівномірно розподілені на довжині бочки, рівною $y/2b = 0,4$, що сприяє зниженню зношення середньої частини валків.

З отриманих даних виходить, що збільшення параметра m при виготовленні твірної опорного валка забезпечує зниження коефіцієнта нерівномірності $q(y)$. Приведені дані свідчать о доцільності застосування опорних валків з твірною у вигляді параболи з $m \geq 4$.

Дослідження впливу типу профілювання опорних валків на характер міжвалкових погонних сил виконували на моделі чотиривалкової кліті (рис. 2.4) з діаметрами робочого валка $D_1 = 32$ мм і опорного $D_2 = 80$ мм, довжина бочки валків 100 мм. Валки було виготовлено із сталі 9Х з поверхневим загартуванням. Досліди за визначенням довжини міжвалкового контакту виконували при навантаженнях $P_M = 10 \dots 42$ кН. Початкову опуклість опорного валка для модельних навантажень приймали рівною $f_{оп} = 0,06; 0,14; 0,28; 0,33$ і $0,46$ мм. Використали валки з різною формою твірної [12].

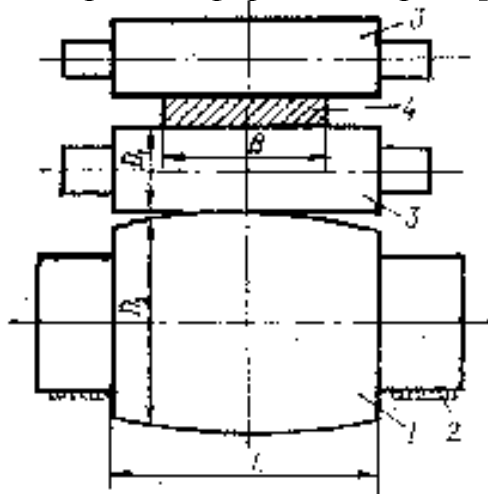


Рисунок 3.4 -Модель кліті кварто:1 – опорний валок; 2 – опори шийок валка; 3 - рабочие валки; 4 – алюминиевая пластина

Для фіксації площі міжвалкового контакту застосовували відомий метод. У основі методу лежить зняття відбитків контакту за допомогою чутливого паперу, що укладається між валками. У нашому випадку застосовували копіювальний папір, на якому отримували досить чіткі відбитки. Розміри відбитків визначали на інструментальному мікроскопі.

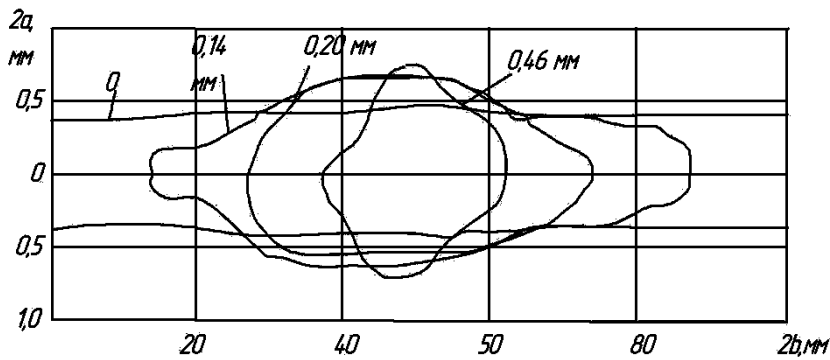


Рисунок 3.5- Форма міжвалкових контактних ділянок при різних опуклостях бочки опорного валка

На рис. 3.5 показані форми контактних міжвалкових площ при різних опуклостях опорного валка ($V=70$ мм, $P_M=40$ кН). При контакті циліндричних ($f_{оп}=0$) валків довжина $2b$ міжвалкового контакту при усіх навантаженнях дорівнює довжині бочки. Ширина $2a$ цей площі має максимальні розміри по осі валка. При контакті опуклого опорного валка з циліндричним робочим валком форма контактної площі набуває форми овалу. Зі збільшенням опуклості валка довжина $2b$ контакту зменшується, обумовлюючи підвищення міжвалкових погонних сил. При цьому спостерігається деяке збільшення ширини $2a$ контакту. .

Дані рис.3.5 дозволяють визначити міжвалкові погонні сили за формулою[12]

$$q(y)=q \cdot 2a(y)/2a,$$

де $2a$ -ширина ділянки по осі контакту; $2a(y)$ - ширина ділянки у будь-якому перерізі контакту.

Як впливає з рис.3.6 збільшення опуклості валка з $f_{оп}=0$, до $f_{оп} = 0,28$ мм викликає відповідне збільшення міжвалкових погонних сил. При цьому, чим більше опуклість валка, тим більше нерівномірність міжвалкових погонних сил. При збільшенні опуклості від $f_{оп}=0$, до $f_{оп} = 0,28$ мм ($m=2$) коефіцієнт n зменшується від 0,84 до 0,15.

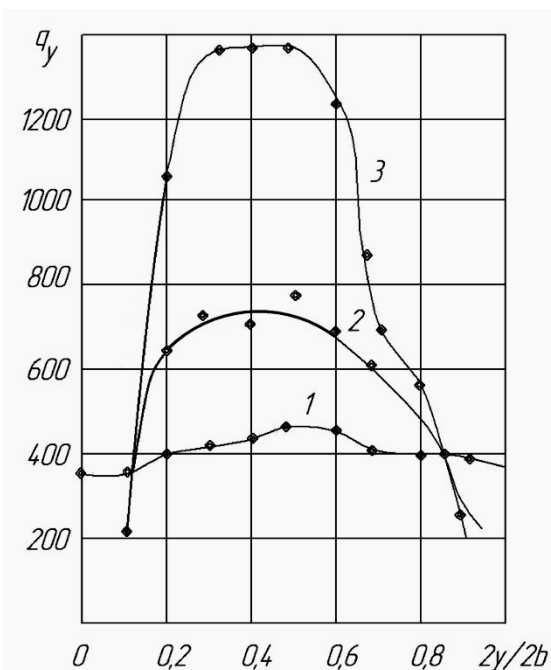


Рисунок 3.6 - Розподіл міжвалкових погонних сил при різних профілюваннях опорних валків, мм: 1 - 0; 2 - 0,14; 3 - 0,28 ($P_M = 40$ кН, $V = 70$ мм, $L = 100$ мм)

Дані на рис.3.6 отримані при взаємодії опуклого опорного валка і циліндричного робочого валка. Подіб-

ний характер залежностей матиме місце і у разі застосування циліндричного опорного валка і опуклого робочого валка. І в першому і в другому варіантах наявність опуклості викликає підвищене зношення поверхонь центральної частини довжини валків.

3.2 Погонні сили на контакті робочих валків зі штабою

Характер розподілу погонних сил по ширині штаби визначається багатьма чинниками, у тому числі поперечним профілем штаби і закономірностями обтиснення по ширині, нерівномірністю розподілу на ширині штаби коефіцієнта зовнішнього тертя і натягнення, розширення металу і т. п. [65-67]. Досліджуючи закономірності зміни $p(y)$ О.І.Целіков [68] відмічає, що нерівномірність розподілу нормальних контактних напружень по ширині штаби обумовлена нерівномірністю деформацій за рахунок розширення і дією зовнішніх частин. При цьому залежно від ширини штаби характер епюру $p(y)$ може бути різний. Для вузьких штаб $p(y)$ має максимум в середині ширини, а для широких - максимум $p(y)$ розташовується між серединою і кромкою. .

У одному з перших досліджень І. Г. Астахов [70] встановив залежність нерівномірності розподілу погонних сил $p(y)$ від ширини і форми поперечного перерізу штаби. При цьому для вузьких штаб і штаб з опуклим профілем поперечного перерізу епюра $p(y)$ має максимум в середині ширини штаби, а для широких штаб ($B/L > 5$) і штаб з увігнутим поперечним профілем епюра $p(y)$ має два максимуми поблизу кромки

У дослідженнях О. П. Чекмарьова і О. А. Тарасенко [11], П. І. Полухіна, В. П. Полухіна, В.О.Ніколаєва [69] методом точкових месдоз встановлений вплив ширини і обтиснення, на нерівномірність розподілу погонних сил. Причому при прокатуванні штаб з $B/L = 0,76$ в 90 % випадків спостерігається зниження $p(y)$ від краю до середини ширини. Прокатка початкових штаб з опуклим профілем поперечного перерізу обумовлює появу опуклої епюри нормальних напружень з максимумом по середині ширини штаби. Рівномірне обтиснення по ширині штаби забезпечує і рівномірний розподіл нормальних контактних напружень.

Узагальнюючи теоретичні і експериментальні дослідження В.П. Полухін [57,68] пропонує математичну модель ітераційного рішення, яка достовірно описує розподіл погонних сил на ППК

$$p(y) = p \left[\frac{10}{3} (\alpha - 1) \left(\frac{y-b}{B} \right)^4 + 5 (\alpha - 1) \left(\frac{y-b}{B} \right)^2 + \alpha \right],$$

де p - середня погонна сила по ширині штаби; α - параметр, який характеризує форму епюру $p(y)$.

При опуклій епюрі параметр $\alpha > 1$, а при увігнутій - $\alpha < 1$. Якщо $\alpha = 1$, то епюра є рівномірною і $p(y) = p$. Дослідження пружних деформацій валків із залученням вказаної формули показало, що параметр α істотно впливає на прогин робочого валка. Проте визначення $p(y)$ за приведеною формулою

ускладнене внаслідок відсутності рекомендацій для визначення параметра «а».

У роботі [61] дана наступна залежність для визначення $p(y)$

$$p(y) = \frac{3P}{B(n_1 + 1)} - \frac{12P(n_1 - 1)}{B^3(n_1 + 1)} \left(y - \frac{B}{2} \right)^2.$$

Коефіцієнт n_1 нерівномірності розподілу $p(y)$ рекомендується приймати рівним $n_1 = 0,5 \dots 2$. Фіксоване значення коефіцієнта n_1 , як показано в роботах [65-67], не дозволяє набувати об'єктивних розрахункових значень $p(y)$ і прогинів валків

У експериментальних і теоретичних дослідженнях показано, що за відсутності механізму активної дії на профіль валків розподіл погонних сил підкоряється в основному параболічному закону. З урахуванням цього в загальному випадку нерівномірність розподілу погонних сил може бути описана таким чином [12]

$$p(y) = p_0 + a^1 y^{m_1}, \quad (3.11)$$

де p_0 - погонна сила по осі штаби; a^1 - коефіцієнт, визначуваний з граничних умов; m_1 - показник степені контуру поперечного перерізу штаби.

Приймаємо, що при $y = 0,5B$ погонна сила рівна $p(y) = p_1 = n_1 \cdot p_0$. Тобто

$$n_1 \cdot p_0 = p_0 + a^1 \cdot y^{m_1}. \quad (3.12)$$

де p_1 - погонна сила у кромки штаби; n_1 - коефіцієнт нерівномірності розподілу погонної сили ($n_1 = p_1/p_0$).

З формули (3.12) отримаємо ($y=0,5B$)

$$a^1 = p_0(n_1 - 1)/(0,5B)^{m_1}, \quad (3.13)$$

де B – ширина штаби.

Тоді з формул (3.11) - (3.13) отримаємо

$$p(y) = p_0 \left[\frac{2^m y^m}{B^m} (n_1 - 1) + 1 \right]. \quad (3.14)$$

Приймаємо рівність площ епюр погонних сил і загальної сили прокатки на контакті із штабою. Сила прокатки P на контакті з урахуванням розподіленого навантаження рівна

$$P = \int_{-0,5B}^{0,5B} p(y) dy = p_0 B \left[1 + (n_1 - 1) \frac{1}{1 + m_1} \right].$$

Откуда

$$p_0 = \frac{P(1 + m_1)}{B(m_1 + n_1)}. \quad (3.15)$$

Підставляючи формулу (3.15) в рівняння (3.14) отримуємо

$$p y = \frac{P}{B} \frac{1+m_1}{m_1+n_1} \left[1 + n_1 - 1 \frac{(2y)^{m_1}}{B^{m_1}} \right].$$

У цьому рівнянні P/B рівно середній величині погонних сил на контакті із штабою $q = P/B$ і тоді

$$p y = \frac{p \cdot 1+m_1}{m_1+n_1} \left[1 + n_1 - 1 \frac{(2y)^{m_1}}{B^{m_1}} \right]$$

Для практичних розрахунків з деяким наближенням можна приймати $m_1=2$ і тоді

$$p y = \frac{3p}{2+n_1} \left[1 + n_1 - 1 \frac{(2y)^2}{B^2} \right]. \quad (3.16)$$

Як слід з формули (3.16), параметр $p(y)$ є складною функцією $2y/B$ і n_1 , оскільки сам коефіцієнт n_1 залежить від різних технологічних параметрів. З формули (3.16) також виходить, що при $n_1 = 1$ має місце рівномірний розподіл погонних сил на контакті зі штабою, а при $n_1 = 0 (<1)$ параметр $p(y)$ змінюється по параболічній залежності з $p(y) = 0$ при $y = B/2$. Якщо $n_1 > 1$, то максимальні значення $p(y)$ знаходяться на кромках штаби, а мінімальні - в середині ширини штаби.

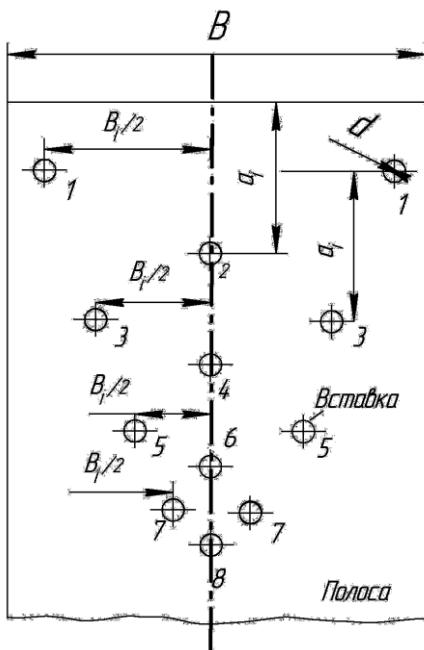
Таким чином, якщо будуть відомі параметр n_1 у формулі (3.16), завжди можна визначити $p(y)$ і потім спільно з $q(y)$ - прогин робочого валка.

3.3 Експериментальні дослідження коефіцієнта нерівномірності n_1

Результати лабораторних і теоретичних досліджень, що наводяться нижче [32,65-67] дозволили встановити характер впливу різних технологічних, і конструктивних особливостей станів на нерівномірність деформації валків і погонних сил по ширині штаб, яка оцінювалася коефіцієнтом n_1 .

У роботі [32] коефіцієнт n_1 визначали шляхом прокатки дюралюмінієвих і алюмінієвих штаб різної ширини з м'якими вставками на двохвалковому і тривалковому станах (рис.3.7). – h_0 ,

Рисунок 3.7 – Складена полоса для визначення пружних деформацій валків і пластичних деформацій штаби (1-8-вставки; d -діаметр вставки)



Оскільки прогин валків по ширині на ділянках м'яких вставок 1-8 різний, то різні їх товщина і величини їх обтиснень. Після прокатки в різних подовжніх перерізах по ширині штаб вимірювали товщину вставок і по виразах:

$$\Delta h_1 = H - h_i; \quad \Delta h_0 = H - h_0$$

визначали обтиснення і розраховували довжини дуг контакту з урахуванням пружних деформацій валків в різних поперечних перерізах ширини штаби [28]. Базовими були параметри по осі штаби (H - початкова товщина основної штаби; h_i і h_0 - товщина м'яких вставок на кромці і в середині ширини штаби).

Коефіцієнт n_l визначали за формулою

$$n_l = \frac{l_{d1}}{l_{d0}} \approx \frac{p_1}{p_0}, \quad (3.17)$$

де l_{d1} і l_{d0} - довжина дуги контакту відповідно на кромці і по штаби.

В результаті досліджень отримана наступна лінійна залежність коефіцієнта n_l від відношення $\Delta h_1 / \Delta h_0$ (в діапазоні зміни 0,6...1,6)

$$n_l = 0,75 + 0,25 \Delta h_1 / \Delta h_0, \quad (3.18)$$

де Δh_1 і Δh_0 - абсолютні обтиснення відповідно на кромці і по осі штаби..

З формули (3.18) виходить, що при рівності обтиснень $\Delta h_1 = \Delta h_0$ по ширині штаби коефіцієнт $n_l = 1,0$, а погонні сили рівномірні, тобто $p(y) = \text{const}$. При можливому збільшенні параметра $\Delta h_1 / \Delta h_0$ в межах від 0,6 до 1,6 коефіцієнт n_l зростає з $n_l = 0,9$ до 1,13.

Параметр $\Delta h_1 / \Delta h_0$ є універсальною характеристикою міри нерівномірності погонних сил по ширині штаби, визначуваної нерівномірністю розподілу по ширині зовнішніх чинників (поперечній різнотовщинності штаби до і після прокатки, натягнення кінців штаби, прогинів робочого валка, температури штаби і тому подібне).

3.4 Теоретичне визначення нерівномірності погонних сил по ширині штаби

Для вирішення цього завдання використали кінцеве - різницевий метод [26,72]. Середнє нормальне контактне напруження на кожній ділянці Δy по ширині штаби (рис.3.8) розраховували по відомому методу [28], який забезпечує отримання результатів близьких до реальних (див. рівняння (1.2) і (1.3))

$$p_{cp.y} = \sigma_\phi \left[0,5 \xi_3 + \xi_\Pi + a \cdot C_H \cdot f_\Pi \cdot l_{СП} / h_{CP} \right] \frac{l_\Pi}{l_{СП}} + 0,5 \cdot \sigma_\phi \frac{l_{У\Pi}}{l_{СП}}; \quad (3.19)$$

$$\left. \begin{aligned} C_H &= 0,17 + 14,7 f_{II} - \text{при } f_{II} \leq 0,12 \\ C_H &= 0,48 - \text{при } f_{II} \geq 0,12 \end{aligned} \right\}$$

де a - коефіцієнт, що враховує спотворення форми епюри внутрішніх напружень від поперечної взаємодії сусідніх подовжніх ділянок ($a = 1,1 \dots 1,2$)[26].

Без урахування впливу доли пружною складовою валка l_{yII} , що допустимо, формула набере вигляду:

$$p_{CP} = \sigma_{\Phi} \left[0,5 \xi_3 + \xi_{II} + a \cdot C_H \cdot f_{II} \frac{l_C}{h_{CP}} \right] \quad (3.20)$$

Формула (3.20) має високу точність, оскільки розрахункові формули для коефіцієнта тертя отримані раніше з дослідного випередження без урахування впливу ділянок l_{yII} осередку деформації [28,91]. .

Повністю алгоритм розрахунку середньої нормальної напруги дан в роботі [65].

У першому варіанті розрахунку виконаний аналіз впливу змінного обтиснення по ширині штаби, на нерівномірність розподілу погонних сил на пружно-пластичному контакті штаби з валком (ППК)

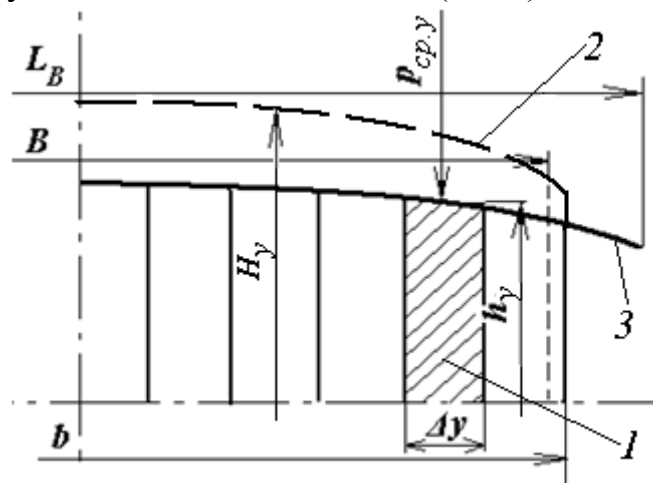


Рисунок 3.8 - Розрахункова схема: 1 - елемент штаби; 2 – підкат; 3 - робочий профіль робочого валка

При цьому вважали, що нерівномірність обтиснення по ширині (між серединою і краєм штаби) складає деяку величину рівну $\Delta l = 0 \dots 0,15$ мм. Змінний параметр обтиснення Δl припускає що його величина формується усіма технологічними чинниками, діючими на осередок деформації. Відповідно до рекомендацій [26,72] осередок деформації по ширині штаби розбивали на ділянки $\Delta y = 50$ мм (рис. 3.8) і для кожної з них розраховували середнє нормальне контактне напруження $p_{CP,y}$ (Н/мм²), і погонну силу p_y (Н/мм).

Розрахунок $p_{cp,y}$ виконували з урахуванням пружних деформацій валків і штаби за формулою (3.20).

Параметри деформації по ширині штаби розраховували по приведених нижче формулах. Середня товщина початкової (H_{cp}) і кінцевої (h_{cp}) штаби рівна (мм) :

$$H_{cp} = H_k + 0,67 \delta H_0; \quad h_{cp} = h_k + 0,67 \delta h_0, \quad (3.21)$$

где δH_0 и δh_0 – різнотовщинність підкату і штаби відповідно; H_k и h_k - товщина підкату і готової штаби на кромках штаби.

Середні величини обтиснень абсолютного і відносного рівні:

$$\Delta h_{cp} = H_{cp} - h_{cp}; \quad \varepsilon_{cp} = \Delta h_{cp} / H_{cp}.$$

Вказані вище параметри розраховують для кожного елемента ширина якого може бути прийнята рівною $\Delta y = 50$ мм. Погонну силу в контактї штаби з валком на кожній ділянці Δy визначають за формулою, Н/мм

$$p_y = p_{cp,y} \cdot l_{c,y}, \quad (3.22)$$

де $l_{c,y}$ - довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби.

Сила прокатки на усій ширині штаби рівна, МН

$$P = \sum_1^K p_{cp,y} \cdot l_{c,y} \cdot \Delta y \quad (3.23)$$

де K - число кінцевих елементів штаби.

Ця сила має дорівнювати силі прокатки, визначеного з усереднених по площі контакту параметрів деформації по усій ширині, тобто:

$$P = p_{cp} \cdot l_c \cdot B, \quad (3.24)$$

де p_{cp} - середнє нормальне контактне напруження, Н/мм²; B - ширина штаби, мм.

Товщину штаби в кожному перерізі до і після прокатки визначали з формул:

$$H_y = H_k + \delta H_y; \quad h_y = h_k + \delta h_y; \quad (3.25)$$

$$\varepsilon = \frac{H_y - h_y}{H_y};$$

де Δh_y і δh_y - поперечна різнотовщинність підкату і штаби відносно краю в перерізах, мм.

При параболічної форми поперечних перерізів підкату і штаби отримаємо

$$\delta H_y = \delta H_0 \left[1 - \epsilon y/B \right]^2; \quad \delta h_y = \delta h_0 \left[1 - \epsilon y/B \right]^2; \quad (3.26)$$

$$\Delta\Pi = \delta H_0 - \delta h_0; \quad (3.27)$$

де $\Delta\Pi$ - різниця величин поперечної різнотовщинності підкату і штаби в данному подовжньому перерізі.

На рис.3.9 представлені результати теоретичних досліджень [67,71] з використанням кінцеве - різницевого методу впливу технологічних параметрів на коефіцієнт нерівномірності n_1 по ширині осередку деформації при зміні в межах: $B/L=0,59\dots0,88$, $\Delta\Pi/H=\pm 0,05\dots0,15$ і $\epsilon=0,2\dots0,4$. Результати досліджень представлені на рис.3.9. З розрахунків виходить, що параметр $\Delta\Pi/H$ робить істотний вплив на нерівномірність розподілу погонних сил і при більшому обтисненні в середині ширини штаби ($\Delta\Pi/H>0$) коефіцієнт n_1 менше одиниці ($n_1<1,0$).

В умовах прокатки штаб можливі два крайні випадки зміни параметра $\Delta\Pi/H$ по ширині штаби. У першому випадку (прокатка вузьких штаб- $B/L=0,7$) параметр $\Delta\Pi/H>0$ коефіцієнт $n_1<1$, тобто епюра погонних сил $p(y)$ (пружно-пластичний контакт - ППК) на контакті штаби з валком має опуклу форму. Такий характер зміни $p(y)$ можливий коли обтиснення більше в середині ширини штаби (при середньому відносному обтисненні $\epsilon_{CP} = \text{const}$) або при менших відносних обтисненнях ϵ_{CP} при $\Delta\Pi/H = \text{const}$.

У другому випадку при $\Delta\Pi/H<0$ епюра погонних сил на ППК має увігнуту форму коли коефіцієнт $n_1>1$. Такий характер розподілу $p(y)$ має місце при прокатуванні широких штаб ($B/L=0,7\dots0,88$) з великим обтисненням на кромках штаби. Збільшення відносних обтисненнях ϵ_{CP} при $\Delta\Pi/H = \text{const}$ сприяє вирівнюванню погонних сил. При прокатуванні штаб з $\Delta\Pi/H=0$ погонні сили рівномірно розподілені по ширині штаби, а коефіцієнт нерівномірності рівний $n_1=1$.

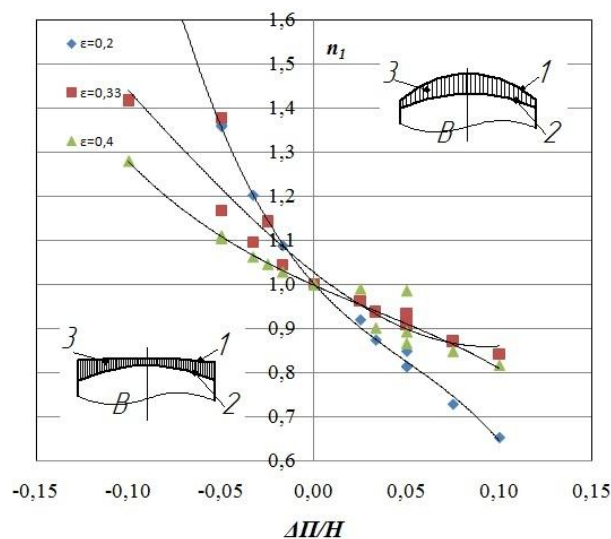


Рисунок 3.9-Вплив нерівномірності обтиснення $\Delta\Pi/H$ на коефіцієнт нерівномірності n_1 (НСХП 1700, $H=1.3$ мм; $B=1000\dots1500$ мм; сталь марки 08кп; діаметр вал-ків 500 мм (1 - підкат; 2- штаба; 3 - поле обтиснення).

Теоретичні результати розрахунків достатньою мірою адекватні результатам відомих експериментальних досліджень. В результаті теоретичних досліджень отримали узагальнювальні формули:

$$\text{для } \Delta P/H > 0 \text{ (при } B/L < 0,72) - n_1 = 0,81 + 1,35 \cdot \varepsilon - 3\Delta P/H \left(+1,67 \cdot \varepsilon \right) \quad (3.28)$$

$$\text{для } \Delta P/H < 0 \text{ (при } B/L > 0,72) - n_1 = 1,3 - 1,08 \cdot \varepsilon - 5\Delta P/H \left(-0,8 \cdot \varepsilon \right) \quad (3.29)$$

Формули (3.28) і (3.29) отримані за умови постійних значень температури і напруження натягнення по ширині штаби і вони дають значення, адекватні залежностям на рис.3.9. Результати досліджень, представлені на рис.3.9 і формулами (3.28) і (3.29), дозволяють стверджувати, що коефіцієнт n_1 при прокатки штаб визначається величиною відносного обтиснення штаби і усіма технологічними чинниками, оскільки вони визначають поперечну різнотовщинність штаби по клітях стана. Очевидно, для кожного прокатного стана мають місце свої найбільш характерні величини різнотовщинностей штаб ($\Delta P/H$) і коефіцієнта n_1 .

Різноманіття чинників, що впливають на параметр ($\Delta P/H$), не дають можливості однозначно встановити його значення для конкретного стана і тому формули (3.28) і (3.29) представляють науковий інтерес з точки зору пізнання закономірностей формування нерівномірності розподілу погонних сил на ППК.

Визначення коефіцієнта n_1 , придатного для практичного використання, виконували методом зворотного перерахунку за дослідними даними прогинів валків, експериментальних значень сили прокатки, формули (3.8) для визначення коефіцієнта n і формул для розрахунку прогинів робочого і опорного валків, що враховують в якості складових коефіцієнти n і n_1 (формула (3.32)) [12]. Розрахунки коефіцієнта n_1 виконали за дослідними даними М.М. Сафьяна і В. П. Холодного [73], П. І.Грудєва[74] (таблиці.3.1) і А.В.Третьякова [75]. На підставі обробки результатів отримано наступне вираження для середньозважених значень коефіцієнта n_1

$$n_1 = 6,44 \left(\frac{B}{L} \right)^4 - 19,42 \left(\frac{B}{L} \right)^3 + 22,12 \left(\frac{B}{L} \right)^2 - 11,2 \frac{B}{L} + 3,0 \quad (3.30)$$

При наявності кінцевих скосів на опорних валках параметр L (довжина бочки) в виразі (3.30) слід замінити на довжину активної частини валка L_2 табл.3.1 коефіцієнт n_1 визначено методом зворотного перерахунку з використанням формули для розрахунку власне прогину робочого валка і дослідчених даних W_{10} (W_{10} – дослідне значення прогину робочого валка, W_{1P}^* – розрахункове значення прогину робочого валка коли $n = n_1 = 1,0$, W_{1P} – розрахункове значення прогину робочого валка коли $n \neq 1,0$ и $n_1 \neq 1,0$).

Таблиця 3. 1 - Параметри деформації і прогину робочого валка за даними П. І. Грудєва (відносно краю бочки) і розрахункові (W^{*1P} при $n=n_1=1$ і W_{1P} при $n(n_1)\neq 1$)

№ випробування	P, МН	B, мм	n	n_1	$W_{10, \text{мм}}$	$W_{1P, \text{мм}}$ $n=n_1=1$	$W_{1P, \text{мм}}$ $n(n_1)\neq 1$
1	10	1400	0,37	0,94	0,13	0,270	0,153
2	14	1400	0,37	0,94	0,18	0,317	0,215
3	18	1400	0,37	0,94	0,225	0,484	0,276
4	10	1700	0,53	0,94	0,04	0,147	0,026
5	14	1700	0,53	0,94	0,06	0,205	0,036
6	18	1700	0,53	0,94	0,075	0,264	0,046
7	10	1900	0,72	0,96	0,01	0,079	-0,007
8	14	1900	0,72	0,98	0	0,111	-0,01
9	18		0,72	0,98	0	0,143	-0,013

П. І. Грудєв виконував дослідження на одноклітьовому листовому стані 2180 ПАТ «Запоріжсталь» з діаметрами валків : робочих - 490 мм і опорних - 1300мм (без кінцевих скосів), верхній робочий валок мав діаметральну опуклість $f=0,3\text{мм}$. Як слідує з табл.3.1, прогин робочих валків W_{10} зростає зі збільшенням сили прокатки (окрім штаб з $B=1900\text{мм}$) і зменшенням ширини листа.

Розрахункові величини прогинів валка W^{*1P} при $n=n_1=1$ (тобто якщо прийняти рівномірний розподіл погонних сил) в якісному плані відповідають дослідним даним, проте істотно (у середньому $\sim 2,9$ раз) перевищують дослідні значення. Отримані зворотним перерахунком величини коефіцієнта n_1 змінюються в межах 0,94...0,98, тобто, в цих дослідах, практично мало залежать від відношення B/L . За даними інших досліджень коефіцієнт n_1 змінюється в межах 0,89...1,09.

Розрахункові величини прогинів робочих валків W_{1P} при $n\neq n_1\neq 1$, з урахуванням нерівномірного розподілу погонних сил на міжвалковому контакті (МВК) і на ППК, тобто при визначенні коефіцієнтів n і n_1 відповідно по формулах (3.8), (3.9) і (3.30), в значно більшій степені ближче до дослідних значень прогинів (помилка 35%), особливо при випробуваннях на широких листах, ніж при розрахунку W^{*1P} з коефіцієнтами $n=n_1=1$

Аналогічні результати розрахункових прогинів робочих валків W^{*1P} і W_{1P} отримані також і відносно дослідних даних М.М.Сафьяна і В. П. Холодного, А.В.Третьякова .

Таким чином, теоретичні дослідження зміни нормального контактного напруження і погонних сил по ширині штаби в осередку деформації дозволили встановити загальні закономірності впливу нерівномірності обтиснення на коефіцієнт нерівномірності погонних сил. Шляхом обробки експериментальних даних отримані значення коефіцієнта n і n_1 , необхідні для розрахунку реальних величин прогинів робочих валків.

3.5 Формули для розрахунку прогинів валків

У чотиривалковій кліті листового (штабового) прокатного стана профіль поперечного перерізу штаби і її площинна значною мірою визначаються прогином опорного і робочого валків і їх профілюванням. У свою чергу власний прогин робочого валка (нерівномірність сплющення робочого валка у контакті з опорним валком) обумовлений нерівномірністю розподілу погонних сил на міжвалковому контакті і на контакті зі штабою (см рис.1.4).

Для розрахунку власного прогину робочого валка відомі методи, запропоновані в роботах П. І.Грудева, Л.І.Боровика, В. П. Полухіна, А.А.Будакви і Ю.В.Коновалова та ін. Останній метод відрізняється від інших тим, що враховує вплив профілювання (зношення) валків. Проте вказані методи розрахунку занадто громіздкі і, головне, не враховують вплив нерівномірності розподілу погонних сил на контакті робочого валка і штаби.

Власний прогин робочого валка по осі від моменту сили прокатки, що вигинає, с урахуванням нерівномірності погонних сил між валками $q(y)$ і у контакті зі штабою $p(y)$ (см рис.1.4) можна визначити з диференціального рівняння зігнутої осі балки, що лежить на пружній основі (на опорному валку) використовуючи початкове рівняння

$$E_1 J_1 W_1^{IV} = p(y) - q(y) \quad (3.31)$$

де J_1 - модуль інерції перерізу робочого валка; W_1 -прогин робочого валка.

З рівняння (3.31) (при $E_1 \cdot J_1 = \text{const}$) в загальному випадку слідує, що при $p(y=B) > q(y=L)$ робочий валок прогинатиметься опуклістю на штабу (прокатка широких штаб), а якщо $p(y=B) < q(y=L)$, то опуклістю на опорний валок (вузькі штаби). Прогин робочого валка відсутній якщо $p(y=B) = q(y=L)$.

Після рішення рівняння (3.31) з урахуванням залежностей (3.8), (3.9) і (3.30) і вважаючи для першої похідної $y = l$, $W_I = Q/2$; при другому рішенні $y = l$, $W_{II} = 0$; при третьому рішенні $y = 0$, $W_{III} = 0$, після четвертого рішення з урахуванням прогину від поперечної сили остаточно отримуємо [12] ($m=2$)

$$W_1 = \frac{PL_a^3 A_1}{384 E_1 I_1} \left\{ \frac{3}{2+n} [3-1,7 \ 1-n] - \frac{B^3}{L_a^3} \frac{3}{2+n_1} \times \right. \\ \left. \times \left[1-4 \frac{L_a}{B^2} + 6 \frac{L_a^2}{B^2} - 8 \ 1-n_1 \left(0,5 \frac{L_a^4}{B^4} - 0,167 \frac{L_a^3}{B^3} - 0,12 \right) \right] \right\} + \\ + \frac{PL_a A_1 k}{4\pi R_1^2 G_1} \left[\frac{3}{2+n} \left(0,5 - \frac{1-n}{4} \right) - \frac{B}{L_a} \frac{3}{2+n_1} \left(0,5 - \frac{1-n_1}{4} \right) \right] + \\ + \frac{QL_a^3}{32 E_1 I_1} \left[\frac{a}{L_a} \left(1 - \frac{2 a^2}{3 L_a^2} \right) - \frac{1}{3} \right]. \quad (3.32)$$

Прогин опорного валка відносно довжини L_a від дії моменту, що вигинає, поперечної сили і моменту, що затискує в підшипникових опорах рівний

$$W_2 = \frac{PL_a^3 A_1}{29,5E_2 I_2} \left[\begin{array}{l} \frac{1+2n}{2+n} + 2,9 \frac{E_2 I_2 L_a}{G_2 R_2 L_a^3} \left(1 - \frac{L_a}{2L}\right) - \\ -0,92 \left(\frac{a}{L_a} - 1\right) \end{array} \right], \quad (3.33)$$

де E_1, E_2 - модулі пружності відповідно робочого і опорного валків; I_1, I_2 - моменти інерції перерізів відповідно робочого і опорного валків; R_1, R_2 - радіуси робочого і опорного валків; k - коефіцієнт, що відповідає за форму перерізу ($k=1,2$); a - відстань між осями натискних гвинтів; Q - сила протівигину робочого валка; A_1 - коефіцієнт впливу протівигину на силу прокатки; $L_a (L_2)$ - довжина фактичного міжвалкового контакту.

Модулі пружності для сталевих валків рівні $E = 2,2 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, для чавунних валків $E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$; модулі зсуву - для сталевих валків $G = 8,2 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$, для чавунних $G = 6,9 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$; момент інерції перерізу валка визначають по формулі

$$I_i = \pi D_i^4 / 64,$$

а коефіцієнт A_1 - по формулі

$$A_1 = 1 + Q/P.$$

У формулі (3.32) перший доданок враховує вплив моменту, що вигинає, другий - перерізуючих сил, третій, - протівигину валків. Крім того, в першому і другому доданків перші складові відображають дію погонних сил $q(y)$, що обумовлюють величину прогину робочого валка, а друге - дії погонних сил $r(y)$, протидіючих вигину робочого валка. У формулі (3.33) перший доданок відображає вплив моменту, що вигинає, другий - перерізуючої (поперечної) сили, третій, - затискаючого моменту в підшипникових опорах шийок опорних валків.

Сумарний прогин робочого валка відносно довжини $L_a (L_2)$ визначається за формулою

$$W_p = W_1 + W_2. \quad (3.34)$$

Термін «прогин валка» означає викривлення осі валка, в результаті якого вісь валка придбає параболічну форму. Стрілка викривлення для опорного валка, шийки якого затиснені в подушках, спрямована по напрямку діючої сили. Стрілка викривлення власне прогину робочого валка відповідає характеру розподілу погонних сил на ППК. При $n_1 < 1$ стрілка викривлення осі спрямована у бік опорного валка (вузькі штаби), а при $n_1 \geq 1$ - у бік штаби (широкі штаби). Для отримання необхідного якісного поперечного профілю

штаби твірні бочок валків виготовляють зі спеціальним профілем.

Для розрахунку необхідної величини опуклості або угнутості робочого валка для компенсування прогинів валків слід використати формулу (1.12)

$$f_p = \left[W_1 + W_2 - \frac{\delta h_{\Pi}}{2} \left(\frac{L_2}{B} \right)^2 \right] \left(\frac{L}{L_2} \right)^2 - \frac{1}{2} f_{оп} - \delta_B - f_T, \quad (3.35)$$

Для виконання розрахунків прогинів по формулах (3.32) -(3.34) необхідно знати параметри n і n_I нерівномірності розподілу погонних сил, по довжині валків і ширині штаби, які визначають по формулах (3.8) (3.9) (3.30). Параметри $f_{оп}$ і δ_B приймають з практичних даних ($f_{оп}$ - опуклість опорного валка; (δ_B - зношення опорного валка по осі). Величина δh_{Π} є поперечною різнотовщинністю штаби (листа), що допускається, для чистової кліті (проходу), а для проміжних клітей (проходів) визначається по формулі

$$\delta h_{\Pi_i} = \delta h_{\Pi} \cdot h_i / h, \quad (3.36)$$

де h_i - товщина штаби в проміжній кліті (проході); h - кінцева товщина штаби.

3.6 Вплив деяких чинників на профілювання робочих валків

Розрахунок величин опуклостей (угнутостей) твірних робочих валків (верстатне профілювання), для компенсації їх прогинів (спільно з прогином опорних валків) виконують за формулою (1.12), (1.35).

Аналіз впливу різних чинників на профіль твірних робочих валків представлено на рис.3.10-3.13.

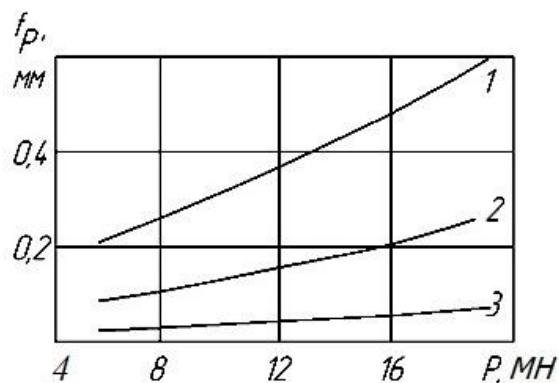


Рисунок 3.10 - Вплив сили прокатки на профілі робочого валка при n_I : 1-0,655; 2- 0,875; 3- 1,0 ($B=1000$ мм, $f_{он}=0$).

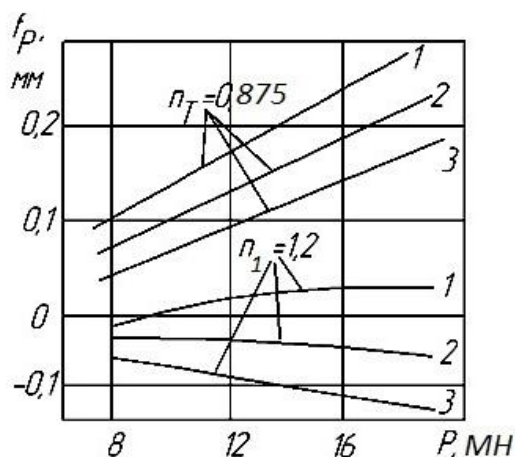


Рисунок 3.11 -Зміна профілю робочого валка залежно від сили прокатки при V/L : 1-0,59; 2-0,705; 3-0,825 ($f_{on}=0$)

Розрахунок профілювання робочих валків виконували для кліті стана 1700 холодної прокатки: $D_1 = 500$ мм, $D_2 = 1300$ мм, $L = 1700$ мм, $L_2 = 1530$ мм, $\delta h_{II} = 0$, $f_T = 0$, $\delta_B = 0$. З рис.3.10 слідує, що збільшення сили прокатки, а отже, і прогину валків викликає необхідність відповідного збільшення і опуклості робочого валка. Величина прогину залежить від степені нерівномірності погонних сил по ширині штаби, що характеризується коефіцієнтом n_1 . При $n_1 < 1$ еюра погонних сил $p(y)$ має опуклу форму ($p_0 > p_1$) і сприяє збільшенню прогину робочого валка і, разом з цим, обумовлює необхідність збільшення опуклості робочого валка.

Так, при $P = 12$ МН і $n_1 = 1,0$ (рівномірний розподіл погонних сил) необхідна опуклість валка складає $f_p \approx 0,05$ мм, а для $n_1 = 0,875$ власний прогин робочого валка можна компенсувати опуклістю, рівною $f_{p1} = 0,2$ мм. Під власним прогином робочого валка, як звісно, розуміють нерівномірне пружне його сплющення на контакті з опорним валком в результаті нерівномірного розподілу погонних сил на ППК, тобто на контакті зі штабою. Приріст величини пружного сплющення робочого валка в другому випадку визначається таким чином

$$\delta_{СП} = f_{p1} - f_p = 0,2 - 0,05 = 0,15 \text{ мм.}$$

Вплив коефіцієнта n_1 на профіль твірної робочого валка для штаб різної ширини підтверджується даними рис.3.11. Для коефіцієнта $n_1 = 0,875$ при усіх розмірах штаб збільшення сили призводить до збільшення опуклості валка для компенсування прогинів валків. Проте для коефіцієнта $n_1 = 1,2$ при прокатуванні штаб шириною $V/L > 0,7$ власний прогин робочого валка, а отже, і величина профілю вступає в негативну область і зменшується у міру збільшення сили прокатки. Отриманий характер зміни величини f_p (і власного прогину робочого валка) обумовлено характером нерівномірності розподілу погонних сил на ППК.

З формули (3.34) виходить, що сумарний прогин робочого валка обумовлений завжди позитивною величиною прогину опорного валка W_2 і позитивним (або негативним) власним прогином, тобто нерівномірним

пружним сплюсненням на контактi з опорним валком. При цьому, якщо величина погонних сил на ППК має більше значення в середині довжини валка ($p_0 > p_1$, $n_1 < 1$), то в цьому перерізі має місце великі значення пружного сплюснення і прогину валка (+ W_1 - робочий валок прогинається опуклостю на опорний валок), а якщо $p_0 < p_1$ ($n_1 \geq 1$ - більша погонна сила на краях), власний прогин робочого валка негативний (- W_1 - робочий валок прогинається опуклостю на штабу) і $W_p < W_2$. В цьому випадку твірну робочого валка виготовляють з увігнутим профілем (- f_p).

З рис.3.10 слідує, що сила при прокатуванні вузьких штаб ($n_1 < 1$) істотно (лінійно) впливає на величину опуклості і, отже, незначна зміна стану технологічних параметрів робитиме помітний вплив на прогин робочого валка і якість поперечного профілю штаби.

Застосування на прокатних станах робочих валків з опуклим профілем бочки, що утворює, окрім достоїнств, має і серйозні недоліки, суть яких полягає в наступному :

1. Підвищене зносу середніх ділянок по довжині опорного валка, контактуючих з опуклою ділянкою робочого валка.

2. Наявність опуклостей на робочому валку обумовлює відмінність їх діаметрів, окружних швидкостей і величин випереджень по ширині штаби погіршує умови отримання плоских штаб, особливо при холодному прокатуванні.

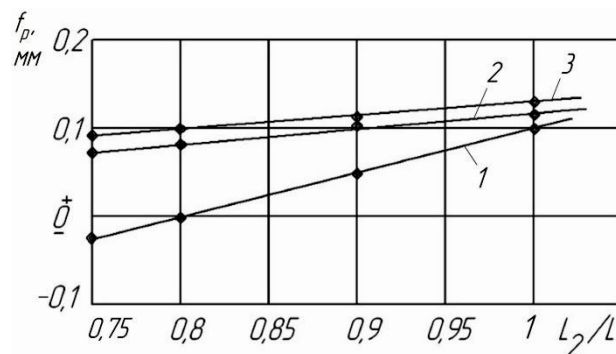


Рисунок 3.12-Влияние профиля опорного валка на профиль рабочего валка при P , МН:; 1 - 8; 2 - 10; 3 - 13; 4 - 18 ($B=1000$ мм, $n_1 = 0,875$).

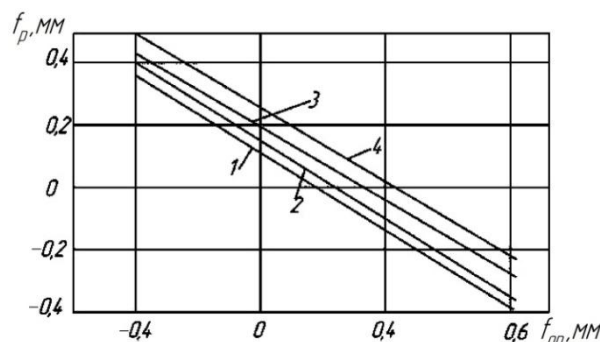


Рисунок 3.13 - Профілі робочого валка залежно від параметра L_2/L опорного валка при P , МН: 1-9; 2-11; 3-13 ($B=1000$ мм, $f_{on}=0$, $n_1=0,875$).

Для нівелювання впливу цих недоліків доцільно основну частину опуклості робочого валка переносити на опорний валок, відповідним чином зменшуючи можливу шліфувальну опуклість робочого валка (рис.3.12).

Одним із способів зменшення прогину і опуклості робочого валка стало свого часу (кінець 60-х років минулого століття) застосування опорних валків з кінцевими скосами (урізанні) завдовжки 80...100мм. з кожного кінця бочки (рис.1.4). Застосування кінцевих скосів на опорних валках зменшує затискання кінцевих ділянок робочих валків знижуючи при цьому прогин і необхідну його опуклість.

З рис.3.13. слідує, що збільшення довжини кінцевих скосів (урізань) на опорних валках зменшує необхідну початкову опуклість робочого валка, внаслідок зменшення його прогину, і тим більшою мірою, чим менше сила прокатки. Така залежність обумовлена збільшенням співвідношення n_1/n .

4 ПРОФІЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

4.1 Тепловий профіль і зношення робочих валків.

Гаряча прокатка штаб

Неперервний широкоштабовий стан гарячої прокатки (ШСГП 1680, ПАТ «Запоріжсталь») має у своєму складі 4-і кліті кварто в чорновій групі і 6-ть клітей кварто а чистовій групі. Стан відноситься до першого покоління і має максимальні швидкості прокатки : в чорновій кліті №4 - $v=1,9\text{м/с}$ і в чистовій кліті №10- $9,2\text{м/с}$. На стані прокатують штаби завтовшки $h=2.8\text{мм}$ і шириною $B=900...1500\text{мм}$. У клітях №№3-10 встановлюють чавунні двошарові робочі валки з діаметром $D= 585...620\text{мм}$ (585мм- у кліті №3 і 620мм - в кліті №10). Опорні валки в усіх клітях сталеві діаметром 1170..1240 (нові)мм Температура початку прокатки металу в чорновій групі $\sim 1180^\circ\text{C}$, а закінчення ($1020...1100^\circ\text{C}$. В чистовій групі $980...1000^\circ\text{C}$, а закінчення $820...860^\circ\text{C}$ [3-6].

Робочі валки чорнових клітей експлуатуються при високих температурах металу, при високих значеннях контактних напружень і наявності в осередку деформації води і окалини.

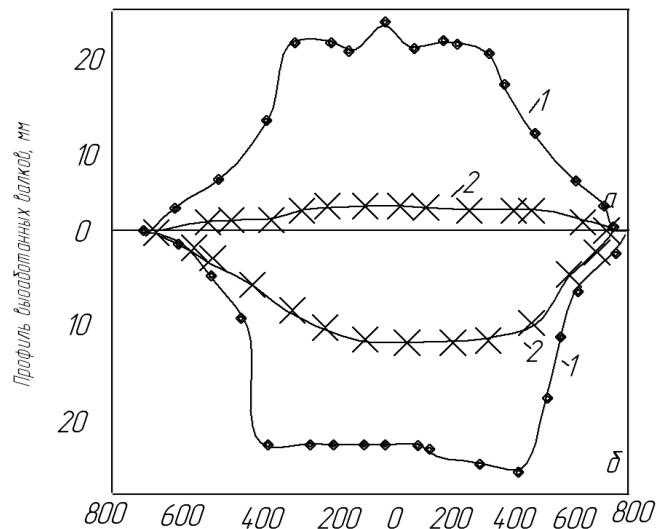


Рисунок 4.1-Профіль (f_p) зноше-них робочих валків по довжині бочки (L) в кліті 1 після прокатки 67тис. т металу : 1 - верхній (D=887,5 мм); 2 - нижній (D=887 мм); початковий профіль валків – циліндричний профіль: а - верхній; б - нижній (ШСГП 1680)

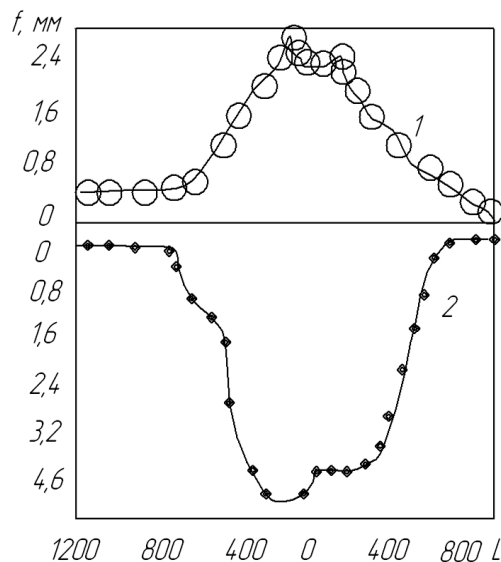


Рисунок 4.2 - Профілі зношених твірних робочих валків клітей: 1 - №2 (G = 31884 т прокату); 2 - №3,4 (G = 27000 т прокату). Валки з початковим циліндричним

Вказані чинники викликають інтенсивний знос поверхні робочих валків (рис.4.1,4.2)[77]. Для кліті 1 (рис.4.1) характерний край нерівномірний знос по довжині бочок валків, а глибина зносу, максимальна для нижнього валка і складає $\delta_p \approx 3,8$ мм.

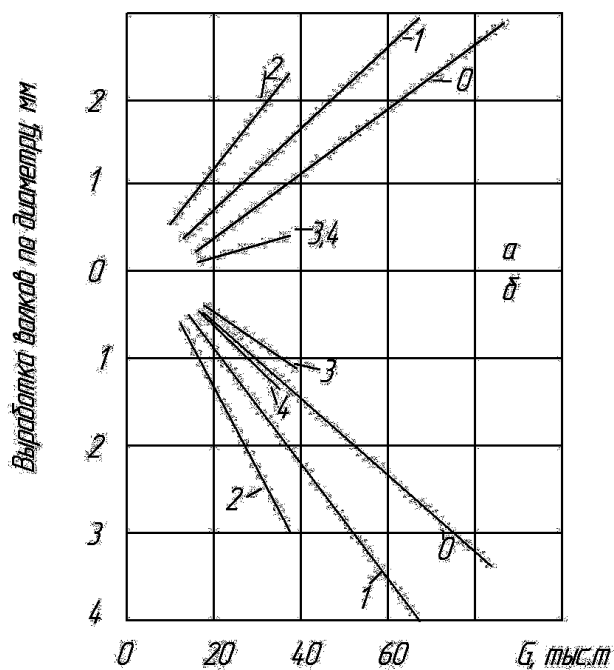


Рисунок 4.3 - Зміна максимального зносу робочих валків залежно від сумарного об'єму прокату: 0 - чорновий окалиноламач; 1-4 - номери клітей (ШСГП 1680): а - верхні валки; б-нижні валки.

Інтенсивність зношення зростає від країв бочки до середини, що обумовлено значною долею вузьких розкатів (до $B=1200$ мм). З даних рис.4.2 для клітей №№ 3,4 видно, що максимальний знос зосереджений на довжині бочки робочого валка ≈ 800 мм, на якій прокатують увесь сортамент металу. Чим більше величина зносу діаметру валка, тим більше чітко

проявляється площа в середині довжини бочки валка з приблизно рівним зносом металу.

Зношення чавунних з вибіленою поверхнею робочих валків в клітях № 3,4 значно менше і пов'язано це з більш високою твердістю поверхонь в порівнянні із сталевими валками в клітях №1,2

Значне зношення робочих валків, і внаслідок цього, велика поперечна різновтовщинність розкату, що виходить з попередньої кліті, викликає підвищення зносу середньої частини довжини бочки робочих валків кожної наступної кліті, погіршує умови отримання готових штаб з мінімальною поперечною різновтовщинністю. Основним способом підвищення зносостійкості сталевих робочих валків є підвищення їх твердості.

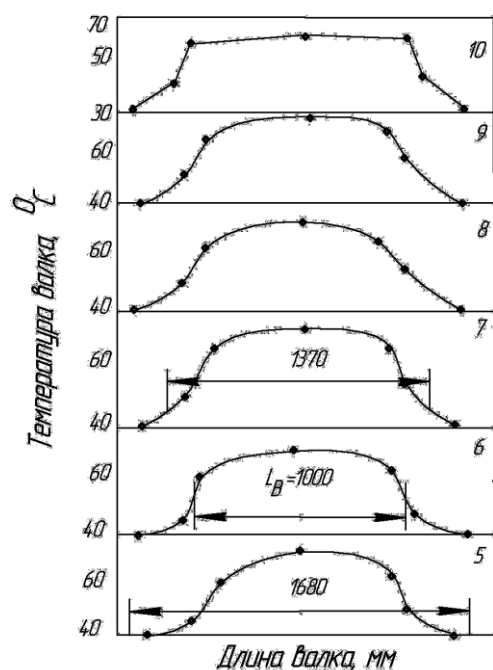


Рисунок 4.4 - Зміна температури робочих валків чистової групи стана ШСГП 1680: 5 - 10 - номери клітей стана ($B=1000$ мм); О - верхній валок; х- нижній валок

У зв'язку з таким характером зносу для його компенсації початкове профілювання твірної робочих валків слід виконувати у виді параболи вищого порядку зі степінню $m \geq 4$. З даних рис.4.1-4.3 також слідує, що нижні робочі валки отримують більший знос, що, очевидно, обумовлено меншою

температурою нижньої поверхні сляба і гіршими умовами охолодження валків.

У процесі прокатки опорні валки нагріваються до температури 45...55⁰С, а робочі валяння на станах гарячої прокатки до 55...80⁰С. Причиною нагріву робочих валків є контакт з нагрітим металом і тепло, що виділяється в процесі пластичної деформації металу. Опорні валки нагріваються в наслідок виділення тепла від деформування на контакті з робочими валками. Розподіл температури по довжині валків нерівномірний: у більшій степені нагрівається середня частина довжини бочки, що контактує зі штабою (рис.4.4,4.5) [5,76].

З рис.4.4 слідує, що при прокатуванні штаб однієї ширини ($B = 1000$ мм) знос робочих валків відбувається на довжині бочки $L_{\text{н}} \approx 1370$ мм, а власне краї валків в гарячому стані не показують ознак зносу. Це свідчить про те, що зв'язані зі штабою ділянки робочих валків отримують знос від абразивних часток, що потрапляють на ділянку контакту його з опорним валком.

Однією з головних причин зношення робочих валків є дія сил тертя на контакті валка і штаби. Параболічний характер зносу робочих валків від країв до середини ширини штаби обумовлений збільшенням амплітуди прогину і пружних деформацій валка, які визивають появу розтягуючих мікронапружень і мікротріщин, розвитку яких сприяє процес утворення дефекту «сітки розпалу», що йде водночас

Нерівномірність розподілу температури по ширині смуги обумовлена нагрівом смугою середини довжини валка і охолодження водою (емульсією при холодному плющенні) вільних крайових ділянок валка і шийок валка, що деформується, забирає тепло від середини валка.

Профіль твірних зношених валків у гарячому стані отримує різну форму. Загальним є те, що робочі валки зношуються в середній частині на величину $2\delta_r$, яка рівна 0,05...0,29мм. Максимальний знос спостерігається в клітях 9, 10.

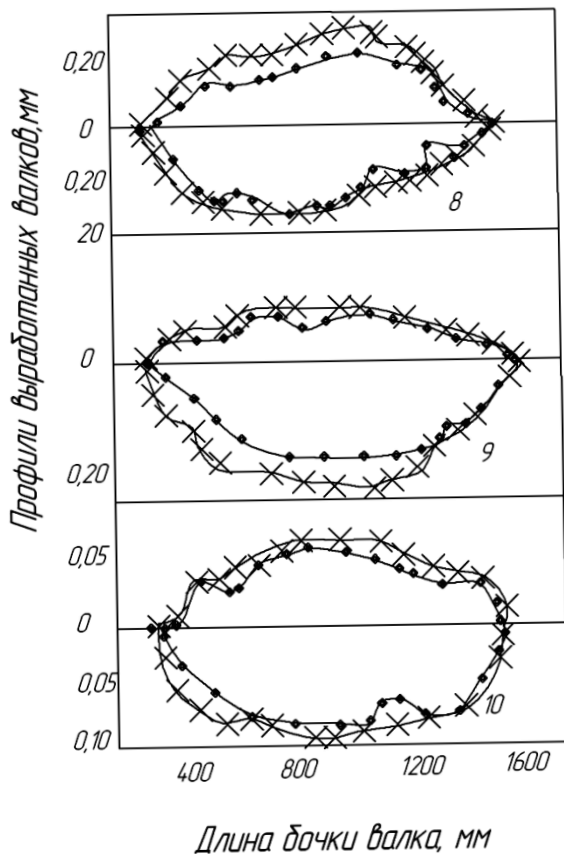


Рисунок 4.5 - Профілі зношених робочих валків в холодному стані (чистова група) ШСГП 1680 (кліті № 8 - 10). Початкові (холодні) профілі в клітях № 8,10 - $f_{\text{ш}}=0$; у кліті № 9 - $f_{\text{ш}}=0,1/0$. Об'єм прокату $G = 2100 - 2400$ т

Твірні валків в гарячому стані на ширині штаби отримують увігнуту (кліті 5, 6) і опуклу (кліті 7-10)

форми. Причому величина опуклості в клітках 7,8-10 значна і дорівнює $2f_T = 0,10 \dots 0,17$ мм) [5,76]. .

Різниця (градієнт) температур f_T по довжині бочок валків визначається за формулами, мм :

для робочого валка (відповідності з експериментальними даними [5,76]):

$$f_T = 0,155 \cdot \sqrt[3]{\Delta t_1 / 35}; \quad (3.37)$$

для опорного валка $f_T = D_2 \cdot \alpha_T \cdot \Delta t_2,$ (3.38)

де α_T - коефіцієнт теплового розширення (для сталі – 12×10^{-6}); $\Delta t_1, \Delta t_2$ -градієнт температур робочого і опорного валків в середині і на краю бочки; D_2 – діаметр опорного валка.

Холодна прокатка штаб

Умови служби прокатних валків розглянемо на прикладі неперервного стану 1680 (ПАТ «Запоріжсталь»). Цей стан складається з чотирьох клітей з робочими валками діаметром 510 мм і опорними 1300 мм. На 4-клітьовому неперервному стані 1680 прокатують штаби завтовшки 0,5...2,0 мм і шириною 1000...1500 мм з маловуглецевих марок сталі (08пс, 15пс, 20пс і т. п.). При прокатуванні профілів із сталей 08пс, 15пс режим деформації розподілений таким чином, що в кліті 1 абсолютне обтиснення складає 0,8...1,1 мм, а на інші три кліті (кліті 2-4) доводиться всього 0,8...1,3 мм. В чистовій кліті 4 відносні обтиснення мінімальні (0,1...0,15). В якості мастильно-охолоджувальної рідини застосовується 2...4% -а емульсія мінерального масла (типу «Індустріальне 20»).

Характерним для кліті №1 неперервного стану 1680 являється значний знос поверхонь опорних валків, обумовлений високими напруженнями в осередку деформації і на міжвалковому контакті у зв'язку із застосуванням насічених робочих валків. Профіль зношення бочок верхніх і нижніх робочих валків кліті №1 приблизно однаковий. При невеликому об'ємі прокату ділянки максимального вироблення зміщені від осі до краю бочки. Збільшення об'єму прокату змінює характер профілю після зношення з розташуванням максимального зносу в середній частині довжини бочки (рис.4.6).

Характеру зношення валків відповідає і параболічний характер зміни температури по довжині бочки. Температурний градієнт середини і країв бочки досягає в 10...30⁰С (рис.4.7).У клітках 2, 3 шліфовані робочі валки експлуатуються приблизно в однакових умовах.

У клітках №№2,3 обидва опорні валки і один робочий валок мають циліндричний профіль, а другий робочий валок - початкову опуклість 0,15...0,25 мм, яка зберігається на усю кампанію роботи опорних валків між перевалками (20-25доб.). Її незмінність обумовлена особливістю зносу нижнього опорного валка на опуклість на відміну від верхнього опорного валка, який працюючи у

контакті з опуклим робочим валком, отримує увігнутий профіль середньої частини довжини валка.

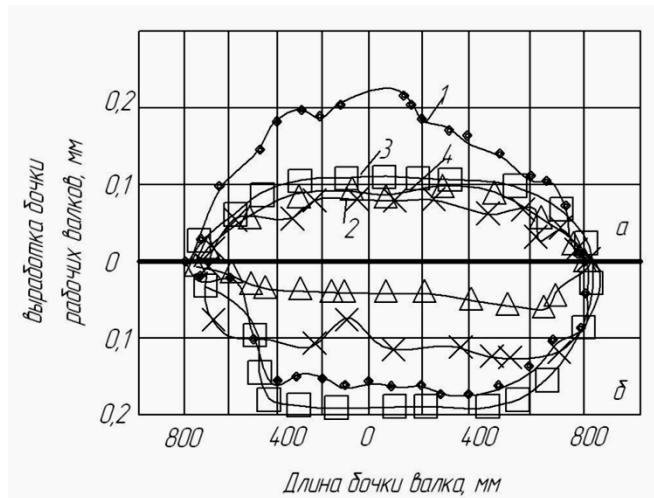


Рисунок 4.6 - Зміна зносу по довжині робочих валків : 1-4 - номери клітей. Об'єм прокату(т) : 1 - ~1500; 2 - ~2000; 3 - ~3000; 4 - ~1300т (а, б - верхній і нижній валки)

Знос поверхні робочих валків по довжині бочки нерівномірний, а максимальна його величина складає ~0,2 мм на діаметр (рис.4.6). Розподіл температури по довжині валків близький до параболічного і до кінця роботи температурний градієнт робочого валка складає в кліті 2-5...15⁰С, в кліті 3-16...20⁰С (рис.4.7). Переважний знос середньої частини бочок робочих валків викликає необхідність їх інтенсивного розігрівання, а отже, збільшення опуклості на цій ділянці. При цьому форма профілю робочих валків в гарячому стані мало змінюється в порівнянні з шліфувальним (початковим) профілем бочки.

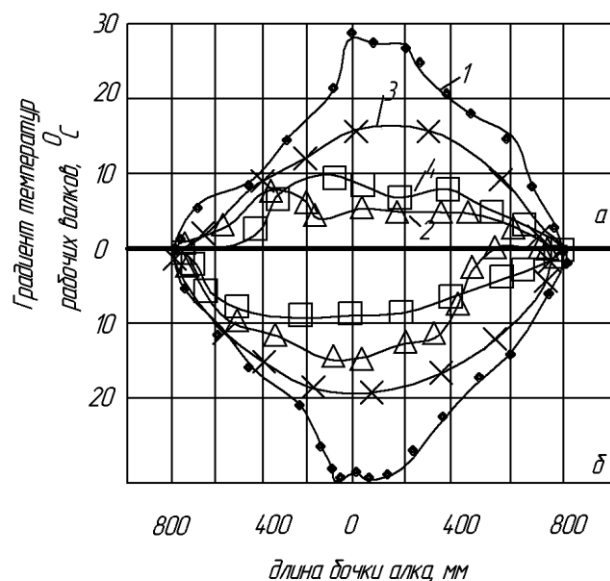


Рисунок 4.7- Зміна градієнта температури по довжині робочих валків в клітях 1-4 НСХП 1680 .Об'єм прокату, т: 1-1500;2-2000;3-3000;4-1300 (а, б-верхній і нижній валки)

Закономірності зносу бочок опорних валків обумовлені різними технологічними параметрами, зокрема станом поверхонь і профілюванням робочих валків. При однаковій шорсткості поверхонь обох робочих валків якісна картина зносу опорних валків також може бути однаковою. Інша картина спостерігається у разі використання робочих валків з різною шорсткістю поверхонь (НСХП 1680).

4.2 Верстатне профілювання валків клітей кварто

Механічну обробку опорних і робочих валків виконують на спеціальних вальцетокарних і вальцешлифувальних верстатах. Приклади режимів обробки і підготовки валків до експлуатації наведені в роботі [78]. У загальному випадку підготовка валків включає токарну обробку (опорні валки), чорнову і чистову (з доведенням) шліфовку абразивним кругом. При чистовому шліфуванні робочим валкам надають необхідний профіль і шорсткість поверхні ($1,1 \dots 1,5$ мкм R_a).

На станах гарячої і холодної прокатки штаб в кліті кварто застосовують валки з профільованими твірними бочок, наявність яких дозволяє компенсувати пружні деформації робочих і опорних валків. Як правило, в робочому стані (після розігрівання) валки отримують додаткову опуклість профілю з одночасним підвищенням нерівномірності їх зношування. Наявність початкових опуклостей (увігнутостей), нерівномірне розігрівання і знос по довжині бочок валків обумовлює нерівномірний розподіл міжвалкових погонних сил (див. розділ 2). З урахуванням дії різних чинників і з метою підвищення ефективності експлуатації валків в роботі [12] розроблені і рекомендуються наступні загальні принципи профілювання бочок валків широкоштабових станів :

- 1) зменшення (усунення) опуклості робочих валків за рахунок перенесення її на опорні валки;
- 2) зменшення сумарної опуклості в системі робочий валок - опорний валок шляхом розміщення опуклості на двох опорних валках;
- 3) зменшення кривизни бочок валків і середньої величини опуклостей твірних валків за рахунок застосування профілювання валків у вигляді параболи вищого порядку (наприклад, трапецієвидної форми);
- 4) застосування змінного профілювання робочих валків в клітях стана шляхом періодичної зміни в кожній перевалці положення опуклого валка з верхнього в нижнє і навпаки;
- 5) збільшення довжини активної робочої частини бочки опорного валка (без кінцевих скосів) від чистової кліті неперервного стана до першої.

Практичне використання рекомендацій по п. п. 1-3 забезпечує зменшення зношення середньої частини довжини бочок валків і підвищення їх працездатності. Використання рекомендації по п.4 дозволяє зменшити міру нерівномірності зносу опорних валків, а рекомендації по п. 6 забезпечують вирівнювання обтиснень і погонних сил по ширині штаби.

Аналіз експлуатації валкових комплектів з різним профілюванням широко представлено у вказаних вище роботах. У цьому розділі розглянутий додатковий матеріал в розвитку вказаних досліджень. На рис.4.8 показані різні профілі опорних (а) і робочих (б) валків. Варіанти 1-7 відносяться до типів початкових профілювань опорних і робочих валків, а варіанти 8, 9 характеризують умови контакту у разі використання зношених на угнутість опорних валків і нових робочих валків (відповідно опуклого і увігнутого).

Варіант 1 передбачає застосування опорного і робочого валків з циліндричним профілем твірних. У цьому варіанті робочий валок, внаслідок силового контакту із штабою, отримує в процесі роботи переважний знос в середній частині довжини контакту і умови контакту трансформуються в профіль за типом 4 з максимальними погонними міжвалковими силами q_1 на крайових ділянках контакту з опорним валком. Під дією максимальних погонних сил при меншій твердості опорного валка відбувається переважний знос його крайових ділянок і зношення на опуклий профіль(тип 9).

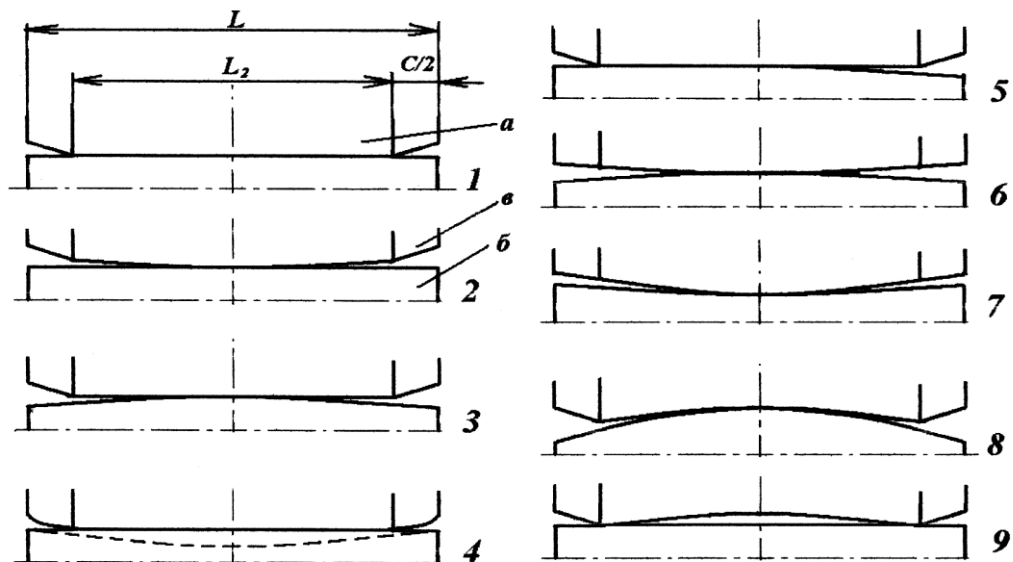


Рисунок 4.7 - Типи профілів твірних валків: а - опорний валок; б- робочий валок; 3- кінцевий скіс

При виготовленні профілів твірних за типом 2,3,5-8 з опуклим опорним або робочим валками максимальні погонні міжвалкові сили концентруються в середній частині довжини бочки опорного валка.

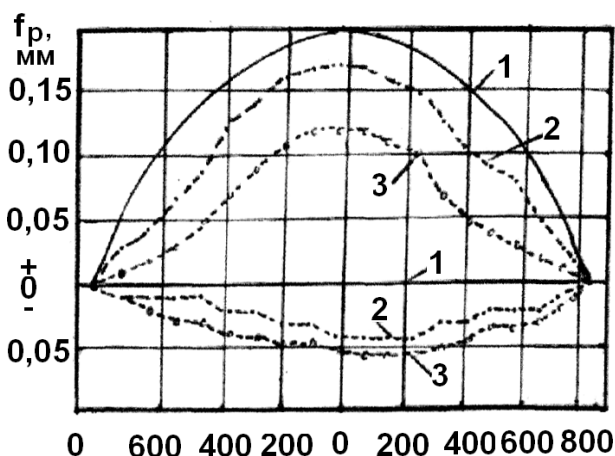
При контакті увігнутого опорного валка з циліндричним робочим валком (чи зі зношеним профілем) (тип 9) максимальні погонні сили діють на краях опорного валка, що сприяє їх зношенню і зменшенню нерівномірності первинного профілю твірної опорного валка. Нині в клітях кварто в основному встановлюють комплекти валків наступного типу:

Тип профілювання	Верхнє положення		Нижнє положення	
	опорний	робочий	опорний	робочий
3	Циліндричний	Опуклий	-	-
2	-	-	Опуклий	Циліндричний
3	Циліндричний	Опуклий	-	-
1	-	-	Циліндричний	Циліндричний

Таким чином, застосування в кліті кварто робочого валка з опуклим профілем твірної, при будь-якій формі твірної бочки опорного валка, викликає максимальне зношення в середині довжини бочки опорного валка. Застосування робочого і опорного валків з циліндричним профілем забезпечують зношення опорного валка на опуклість. Контакт циліндричного (чи з увігнутим профілем) робочого валка і зношеного на угнутість опорного валка забезпечує зменшення нерівномірності профілю опорного валка.

4.3 Ефективність раціонального профілювання валків кліті кварто

Дослідження [12,60,79] показали, що при використанні в кліті кварто робочих валків з опуклим профілем бочки ($m=2$) знос опорних валків помітно вище, ніж при установці циліндричних валків. Це обумовлено більшою нерівномірністю міжвалкових погонних сил і великим значенням q_0 / q_1 (рис.1.4 епюра 4), чим при контакті циліндричних валків. Очевидно, доцільним є розподіл опуклості на два робочі валки. Проте в цьому випадку вершини опуклостей обох валків повинні точно співпадати по осі валків, збільшується час виготовлення валків при їх ручному профілюванні. Виготовлення обох опуклих робочих валків автоматичним способом усуває цей недолік. Але при використанні обох робочих валків з опуклим профілем твірних, так або інакше, призводить до зносу середньої частини довжини бочок опорних валків. З цієї причини такий варіант профілювання є не раціональним.



З цієї причини такий варіант профілювання є не раціональним.

Риснок 4.8- Профілі робочих валків : 1 - початковий ($m=2$); 2 - гарячий профіль після роботи; 3 - холодний профіль (НСХП 1680, кліть 3, $f_p=0,2$)

У роботі [12] пропонується два варіанти профілювань робочих валків, що забезпечують підвищення експлуатаційної стійкості опорних валків, що важливо для зменшенні нерівномірності їх зношення, збільшення терміну їх служби і якості готових штаб.

У першому випадку застосовують так звану змінне профілювання робочих валків (ЗПРВ) (1984р.). Суть способу полягає в наступному. Після

установки в кліть нових опорних валків у верхнє положення встановлюють наприклад, робочий валок з опуклим профілем бочки, а в нижнє положення циліндричний робочий валок. У такому положенні опуклий робочий валок зберігає форму профілю в течії усього періоду установки (рис.1.4), а нижній циліндричний - із самого початку, за рахунок зносу штабою середини довжини бочки, у результаті придбає увігнутий профіль. Розподіл міжвалкових погонних сил, набуває вигляду епюри 5 при $q_1/q_0 > 1$ (рис.1.4). У цих умовах контакту нижній опорний валок (циліндричний на початку роботи) поступово набуває опуклий профіль за рахунок переважного зносу крайових ділянок бочки (рис.4.7, типи 4 і 9).

У наступну заміну зношених робочих валків на нові, опуклий робочий валок встановлюють до нижнього опорного валка, а циліндричний - у верхнє положення. В цьому випадку характер зносу опорних валків міняється на протилежний. На верхньому опорному валку зменшується висота максимального зносу (рис.4.7, тип 7), а на нижньому - зменшується висота придбаної опуклості (рис. 4.7, тип 6).

Експериментальні дослідження запропонованої ЗПРВ виконані в кліті 1 НСХП 1680 ПАТ МК «Запоріжсталь». З цих досліджень (рис.4.9) видно, що максимальний знос верхнього опорного валка при серійній, на той період, технології рівний $\delta B = 2,96$ мм (з урахуванням початкової опуклості), а нижнього $\delta B = 0,18$ мм. При використанні ЗПРВ величина зносу складає відповідно $\delta B = 1,14$ і $0,41$ мм. Таким чином, сумарне зношення опорних валків при експлуатації за серійною технологією складає $\Sigma \delta B = 3,14$ мм, а із застосуванням ЗПРВ сумарний знос рівний усього $\Sigma \delta B = 1,55$ мм.

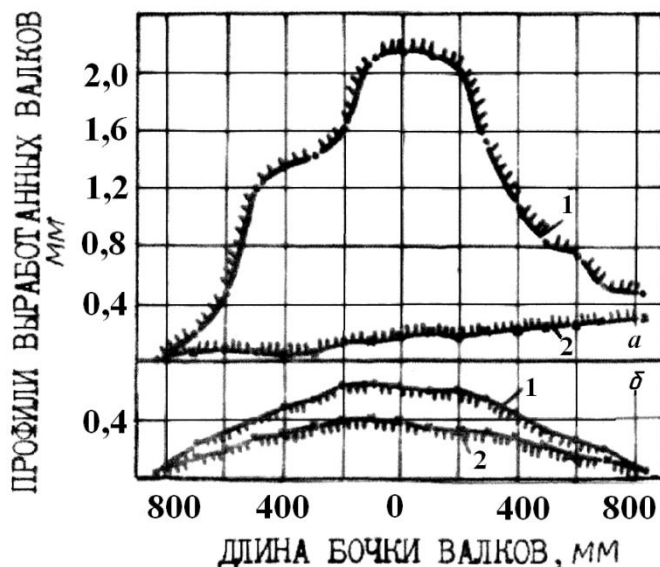


Рисунок 4.9- Профілі зношених верхніх (а) і нижніх (б) опорних валків при серійному (1) і змінному профілюванні (2) робочих валків (ЗПРВ). Об'єм прокату, т: 1-34000; 2-40000. Початкова опуклість опорних валків $f_{OP} = 0,8/0,8$ мм (верх, низ) ($m=2$), $c=75$ мм,

На підставі аналізу умов роботи опорних валків в кліті 1 НСХП 1680 після прокатки 719000 тонн металу за серійною технологією і 402000 тонн металу з використанням ЗПРВ встановлено, що в останньому випадку тривалість експлуатації опорних валків збільшується приблизно в 1,2 разу, а знімання діаметру валка за одне переточування зменшується приблизно в 1,13 разу [12,79].

На існуючих НСХП профілюють робочі валки таким чином, що б прокатувати штабу з натягнутими кромками [12,26]. В цьому випадку розтягуючи напруження на кромках істотно перевищує напруження розтягування в середній частині ширини штаби і прокатку виконують з невеликим жолобленням. Такий спосіб прокатки запобігає зміщенню штаби з лінії прокатки, проте призводить в деяких випадках до поривів штаб по кромці.

У дослідженнях [12] було показано, що з метою зниження нерівномірності деформації кромки штаби, зниження в них рівня напружень розтягання і зменшення поривів штаби довжина скосів (урізів) на опорних валяннях в клітях неперервного стана повинна зменшуватися від першої кліті до останньої.

При використанні такого диференційованого профілювання опорних валків (ДПОВ) по клітях стана жорсткість валкової системи на крайових ділянках бочок, підвищується і в кожній подальшій кліті кромки штаби отримують додаткове обтиснення, в порівнянні з середнім по ширині штаби ділянками. Завдяки такій особливості деформації штаби відбувається зниження подовжніх напружень розтягування на її кромках і кількості поривів, підвищується площинність штаб [12,79].

Експлуатаційна служба опорних валків першій кліті неперервного стана холодної прокатки визначає умову отримання якісного поперечного профілю штаби і міру стоншування її кромки. Величину кінцевих скосів опорних валків в цій кліті слід приймати максимальній. Оскільки на одних і тих же опорних валках прокатується увесь сортамент штаб, то максимальну довжину кінцевих скосів визначають за відношенням

$$2c = L - B_{св},$$

де $B_{св}$ - середньозважена ширина штаб, що прокатуються на стані; c - довжина скосу (уризу) опорних валків.

Оскільки зазвичай $B_{св} / L = 0,72 \dots 0,78$, то для кліті 1 отримаємо

$$2c = (0,21 \dots 0,28) L.$$

Для неперервного широкоштабового стана 1700 загальна довжина скосів (урізів) опорного валка в першій кліті буде рівна $2c \approx 360 \dots 480$ мм. При випробуваннях ДПОВ на неперервному НСХП 1680 довжину урізів (скосів) по клітях 1-4 приймали рівними (мм): $c_1 = 180 \dots 220$; $c_2 = c_3 = 130 \dots 140$; $c_4 = 75 \dots 80$ мм. Як слідує з дослідних даних, при використанні збільшених розмірів кінцевих скосів в кліті 1 НСХП 1680 (проти $c = 75$ мм) зношення середньої частини верхнього опорного валка зменшилося до $\delta_B = 1,2 \dots 1,9$ мм в порівнянні з $\delta_B = 2,9 \dots 3,0$ мм при довжині скосів $c = 75$ мм.

Зменшення нерівномірності зношення верхнього опорного валка обумовлено зменшенням нерівномірності розподілу міжвалкових погонних сил і величин опуклостей робочих валків [12]. Дещо зменшився знос і нижнього опорного валка, який працює в менш важких умовах оскільки постійно працює у контакті з циліндричним (або увігнутих) робочим валком.

Для розробленого профілювання типу ДПОВ (НСХП 1680) розраховані і рекомендовані величини профілів робочих валків, величини опуклостей яких помітно зменшилися [12,80-83]. Зниження зносу опорних валків в кліті 1 дозволило продовжити термін їх експлуатації до 16-20 діб проти 11-13 діб при старому профілюванні з величиною $c=75\text{мм}$. Зменшилася нерівномірність зносу валків в клітках 2-4. В результаті поліпшення умов деформації металу при експлуатації валків із запропонованим профілюванням зменшилася кількість випадків наварів на 34%, а кількість валків, списаних по ушкодженнях, зменшилася на 7,3% .

Комплекти вказаних вище типів профілювань валків на станах, які використовують традиційну технологію мають наступні недоліки:

- відсутність ефективного динамічного профілювання валків в процесі їх роботи. Теплове регулювання профілю бочки інерційне і дозволяє внести необхідне коригування профілю валків в течії 15-25 мін;
- при переході на прокатку ширших штаб необхідно робити зміну робочих валків з іншим профілюванням, що вимагає зупинки стана і зниження його продуктивності;
- відсутня можливість регулювання локальної неплоскості, що погіршує якість форми готової продукції;
- ефективність регулювання міжвалкового зазору натискними електро-механічними пристроями обмежена.

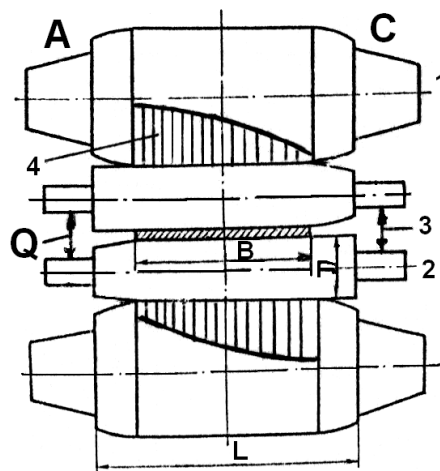


Рисунок 4.10 - несиметричне профілювання робочих валків (НПРВ) кліті кварто: 1 - опорний валок; 2-робочий валок; 3 - гідровигин валків; 4 - епюра міжвалкових погонних сил

Зменшення нерівномірності зношення опорних валків може бути забезпечене застосуванням робочих валків з несиметричним профілюванням робочих валків (НПРВ, 1983р.)[12], що передбачає виконання на одній половині валка циліндричної ділянки, а на іншій - опуклого зі зменшенням діаметру від середини до краю бочки (рис.4.10). Необхідна величина опуклості робочих валків розраховується по відомих формулах (див. вище).

Система НПРВ виключає опуклість в середній частині робочих валків і істотно знижує нерівномірність зносу опорних валків, сприяє підвищенню

якості поперечного профілю штаби. При такому профілюванні робочих валків має місце нерівномірність міжвалкових погонних сил (рис.4.10), що обумовлює прогнозований нерівномірний несиметричний знос опорних валків.

За наявності в цеху сучасних верстатів для шліфування опорних валків профіль твірної бочки включає кінцеві скоси і циліндричну (опуклу) ділянку, може бути замінений профілем виді параболи вищого порядку з степінню $m=4-6$ [12].

Гідністю профілювання валків з $m=4-6$ є зменшення пружної деформації в середній частині міжвалкового контакту, зниження нерівномірності розподілу міжвалкових погонних сил q_i і зменшення нерівномірності зношення по довжині валків, що важливо для стабілізації процесу прокатки і підвищення площинності штаб.

4.4 Геометричні параметри і матеріал валків для прокатки штаб

Валки листових (штабових станів) виконують основне завдання пластичної деформації металу і тому їх якість визначає продуктивність прокатного стану, але якість поверхні і геометричного профілю штаби (листа [4-7,18-21]).

У багатовалковій кліті валки, що контактують з металом, називаються робочими опорні валки сприймають навантаження від металу через робочі валки. Робочі валки мають бочку, шийки і хвостовики. З'єднання робочих валків приводом здійснюється за допомогою універсальних або і зубчатих муфт.

Діаметр робочих валків листових станів визначають з умов захвату (чорнові кліті) і достатньої зносостійкості (передчистові і чистові кліті) (табл.4.1). Діаметр робочих валків станів гарячої прокатки 600-1200 мм, а холодної – 200-600 мм, а довжина бочки валків визначається шириною штаби, міцністю і прогином, що допускається. Діаметр опорних валків обумовлений необхідною їх міцністю і прогином що допускається. Максимальні діаметри робочих і опорних валків має листовий стан із довжиною бочки $L=5500$ мм, на якому робочі валки $D_p=1200$ мм, а опорні $D_{оп}=2400$ мм (нові валки).

На станах гарячої прокатки сталеві опорні валки цілісноковані, а на станах холодної прокатки складені (рис.4.11). Товщина z бандажа із сталі рівна $z/R=0,35-0,25$ (z - товщина бандажа; R - радіус опорного валка). Більше значення z/R відповідає валку з $L_\delta=1200$ мм, а менше - $L_\delta=5000$ мм.

Бандаж на вісь встановлюють з натягом $\delta=0,6-1,55$ мм ($\delta/d=0,0008-0,00137$, де δ - величина натягу; d - діаметр посадочного діаметра опорного валка).

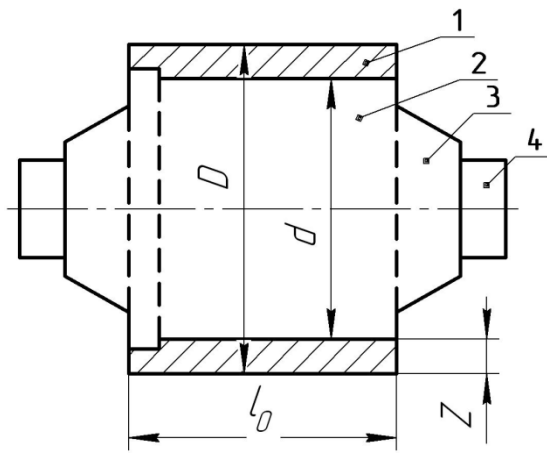


Рисунок 4.11 - Складений опорний валок стана холодної прокатки штаб: 1 – бандаж; 2 – вісь; 3 – шийка; 4 – хвостовик

Робочі валки виконують цілісноковані, а для невеликих станів зі внутрішньою порожниною для покращення охолодження валки листових станів повинні задовольняти наступним основним вимогам:

- всі елементи валка повинні мати високу міцність і мінімальний вигин бочки, що допускається;
- поверхневий робочий шар бочки валка повинен мати високі твердість і зносостійкість;
- поверхневий шар бочки валка гарячої прокатки повинен бути термостійким, тобто володіти протидією високій температурі металу і різкій зміні температури валка під час паузи;
- поверхневий шар бочки валків при холодної прокатки повинен витримувати без руйнування великі контактні напруження.

Чавунні валки виготовляють шляхом лиття рідкого чавуну в металевий кокіль. Такі валки володіють високою якістю поверхні і зносостійкістю (високою твердістю). Робочі валки з чавуну з вибіленою поверхнею (ЛП, ЛШ, никельмагнієві, двошарові ЛПХНд) застосовують на станах гарячої прокатки. Валки з меншою твердістю в чорнових клітях (58-68 HSD), валки з більшою твердістю (62-85 HSD) в чистових клітях.

Таблиця 4.1 -Основні співвідношення розмірів елементів валків листових станів

Валки	Бочка		Шийка		Хвостовик	
	D, мм	L/D	$d_{пр}/D$	$l_{пр}/D$	d_1/D	l_1/D
Опорні валки клітей кварто	1300- 2400	1,8- 3,5	0,55- 0,75	0,6- 0,8	-	-
Робочі валки клітей кварто	200- 1200	2,5- 4	0,6- 0,7	0,8- 1,3	0,55- 0,6	0,5-0,6

Легування чавуну хромом, нікелем і молібденом підвищує його міцність, а також твердість вибіленого шару. Модифікування чавунних валків магнієм збільшує їх міцність і пластичність. У модифікованому чавуні включення графіту мають кулясту форму і ізольовані один від одного, тоді як в звичайному чавуні вони розташовуються у вигляді пластин і лусок, часто незв'язаних між собою, що різко знижує його механічні властивості. Міцність чавунних валків істотно менша, ніж сталевих валків.

Сталеві ковани валки на ШСГП застосовують як опорні у всіх клітках стана і як робочі в перших клітках чорнової групи.

На ШСГП опорні і робочі валки цілісноковані і виготовлені із сталі марок 9Х2, 9ХФ і т.п. Поверхню опорних валків піддають гарту до твердості 45...60 НSD, що підвищує їх зносостійкість і опір проти викришивання. Сталеві робочі валки забезпечують захват розкату з кутом 19-20 град.

Недоліком чавунних валків, які встановлені в клітках чистової групи є їх інтенсивний і нерівномірний знос по довжині бочки валка. Чавунні валки замінюють на ефективніші двошарові, в яких вісь виготовляють з кулястого графіту або із сталі, а зовнішній (робочий) з високохромистого чавуну. Такі валки мають стійкість в 1,5...2 рази вище, ніж звичайні валки ЛПХНд, які застосовують в даний час. Окрім цього, в чистовій групі клітей застосовують робочі валки з високоякісної швидкорізальної сталі (марка HVS85) [5,21].

Для станів холодної прокатки, як і для інших станів, основними параметрами, є діаметр і довжина бочки. Діаметр валка вибирають за наслідками розрахунків на міцність і величин контактних напружень. Довжина бочки обумовлена шириною штаби і необхідною жорсткістю проти вигину. Звичайно максимальна ширина штаби, повинна бути рівна $B=(0,85...0,9)L$. Для прокатки стрічки застосовують валки із довжиною бочки $L=200...300$ мм, для вузьких штаб $L \leq 800$ мм, для штаб $L=1200...2500$ мм. Діаметр бочки робочих валків для холодної прокатки штаб товщиною 0,4...2,0 мм складає 500...600 мм.

Робочі валки мають бочку, шийки і хвостовик для приводу і завалки. Розміри елементів валків для клітей кварто дані табл.4.1. Опорні валки виготовляють складеними з віссю і бандажем (рис.4.11), що дозволяє економити дорогі марки сталі, а вісь використовувати неодноразово. Зношений

бандаж (після доставки опорного валка на машинобудівний завод) знімають з осі часто механічним способом – шляхом різання (нанесення концентратів напружень) і подальшого руйнування піропатронами в спеціальних ямах.

Робочі валки станів холодної прокатки працюють в чотирирядних підшипниках кочення з конічними роликами, а опорні валки – в підшипниках рідинного тертя (ПРТ).

Для виготовлення робочих валків холодної прокатки застосовують високоякісні сталі, що містять мінімальну кількість домішок (9X, 9X2, 9XФ, 9X2МФ, 9X2В, 9X2СВФ, 60X2СМФ). З приведених марок сталь 60X2СМФ є доэвтэктоидной, а інші – заэвтэктоидними. Гарт і відпустка валків забезпечують отримання високої твердості на глибину 15-20 мм на радіус (90-102HSD). Сталі марок 9X, 9X2 і 9XФ, рекомендують застосовувати для виготовлення робочих валків діаметром менше 400 мм. Проте ці сталі застосовують і для виготовлення валків з $D > 400$ мм.

Хромомолібденованадієва сталь 9X2МФ завдяки підвищеній кількості хрому і наявності молібдену і ванадію володіє значною прогартованістю і в'язкістю, чим сталі 9X, 9X2, 9XФ. Сталь марки 9X2МФ володіє більшою витривалістю і опором викришиванню. Практично такими ж технологічними і експлуатаційними властивостями, що і сталь марки 9X2МФ, володіє хромовольфрамова сталь 9X2В. Вищі експлуатаційні властивості мають валки з кремніє-вовольфромо-ванадієвої сталі марок 9X2СВФ і 9XСВФ. Кремній підвищує теплостійкість сталі і тому в таких валках можна прокатувати штаби з вищими швидкостями. Вказані сталі рекомендують застосовувати для виготовлення валків з діаметром $D > 400$ мм.

Сталеві робочі валки станів холодної прокатки після виготовлення повинні вилежуватися 4-6 місяців для релаксації внутрішніх напружень і лише після цього встановити їх в кліть.

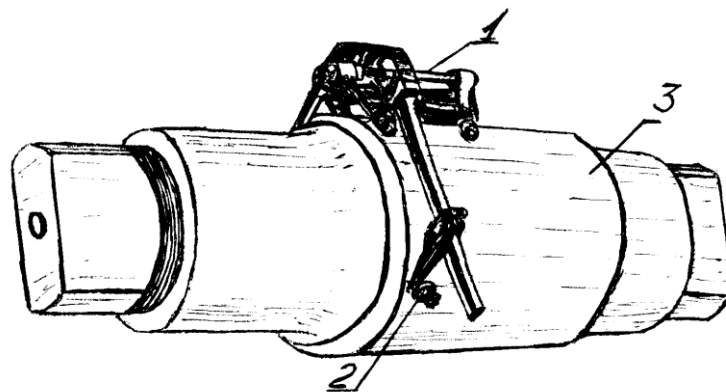


Рисунок 4.12 - Пасометр: 1 – візок; 2 – індикатор; 3 – бочка валка

Термін «вилежання» можна скоротити шляхом низької відпустки нових валків в індукторі при температурі $t \approx 250^{\circ}\text{C}$ на протязі 1,5...2-х годин.

Шліфування робочих валків після зносу необхідно виконувати після їх повного охолодження до температури навколишнього середовища. Технологія механічної обробки валків дана в роботі [17].

До і після шліфування валків профіль їх твірних вимірюють пасометром (профілемір) (рис.4.12) з індикатором. Точність вимірювання 0,01 мм (іноді 0,001 мм).

В процесі прокатки робочі і опорні валки одержують знос поверхонь бочок в межах 0,05...0,4 мм. В деяких випадках, при контакті з насіченим робочим валком, опорний валок стана холодної прокатки одержують максимальний знос у середині бочки більше 1,5 мм. Форма твірної зношеного валка обумовлена величиною прогинів валків, станом їх поверхонь, параметрами профіля бочок твірних, шириною штаби, формою епюри розподілу температури по довжині валків.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Меерович И.М. Повышение точности листового проката. /МееровичИ.М., ГерцевА. А., Горелик В. С., Классен Э.Я. – М.: Metallurgy, 1969. – 264 с.
2. Сафьян М.М. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство. /Сафьян М.М, Мазур В.Л., Молчанов А.И, Сафьян А.М. – К.: Вища школа, 1988. – 351 с.
3. Николаев В.А Горячая прокатка полос и листов. - Запорожье, ЗГИА, 2014.-176с.
4. Николаев В.О. Мазур В.Л. Виробництво плоского прокату.– Запоріжжя, ЗДІА, 2010. – 320 с.
5. Николаев В.А., Путноки А.Ю. Прокатка широкополосной стали – К.: Освита України, 2009. – 268с.
6. Николаев В.А. Валки прокатных станов. Учебное пособие. – Запорожье, ЗГИА, 2000. – 176 с.
7. Николаев В.А. Длина дуги контакта при прокатке с учетом упругих деформаций валков и полосы // Изв. вузов. Черная металлургия, 1987, №4. – С.57-59.
8. Николаев В.А. Упругие деформации листовых валков // Изв. вузов. Черная металлургия, 1988, №10. – С.51-53.
9. Николаев В.А. Неравномерность деформации по ширине полосы // Изв. вузов. Черная металлургия, 1989, №3. – С.56-61.
10. Николаев В.А., Ходунов Д.А. Влияние профилировок на упругие деформации листовых валков // Изв. вузов. Черная металлургия, 1989, №6. – С.55-58.
11. Чекмарев А.П. О некоторых вопросах теории прокатки. Теория прокатки /Материалы конференции по теоретическим вопросам прокатки, Днепропетровск.- М.: Metallurgizdat, 1962.-С.31-56.
12. Николаев В.А. Профилирование и износостойкость листовых валков. - К.: Техніка, 1992. - 160 с.
13. Николаев В.А. Расчет профилировки валков листового стана.//Изв вузов Черная металлургия, 1988, №5.-С.75-80.
14. Коновалов Ю.В. Повышение точности листовой прокатки.-/Ю.В. Коновалов, Д.П. Галкин, В.Г. Додока и др. – М.: Metallurgy, 1978,-296с.
15. Ганжин В.Г., Киселев Ю.Н. Технология XXI века. Перспективы России // Национальная металлургия. – 2003, №12. – С.50-66.
16. Мартини Ф. Свойства рабочих валков из быстрорежущей стали для станов горячей прокатки // Сталь, 1999, №10. – С.50-54.
17. Синнаве М. Современные высокопроизводительные прокатные валки, особенности и перспективы их эксплуатации / М. Синнаве, К. Гостев, В. В.Глухов, В.С.Смирнов // Сталь, 2001, №8. – С.2-7.
18. Николаев В.А. Влияние профилировки валков на неравномерность распределения межвалковых нагрузок // Изв. вузов. Черная металлургия, 1982, №4. – С.68-70.

19. Франценюк И.В. Современный цех холодной прокатки углеродистых сталей / Франценюк И.В., Железнов Ю.Д., Кузнецов Л.А., Камышев В. Г – М.: Металлургия, 1984. – 154 с.
20. Мазур В.Л. Прокатка металла со сварными соединениями/ Мазур В.Л., Мелешко В.И., Галкин Д.П. и др. – М.: Металлургия, 1985. – 112 с.
21. Третьяков А.В. Совершенствование теплового процесса листовой прокатки./А.В. Третьяков, Э.А. Гарбер, А.Н. Шичков, А.В. Грачев-М.: Металлургия, 1973.-304с.
22. Николаев В.А. Исследования параметров, способы и устройства прокатки полос.- Запорожье: Акцент Инвест-Трейд, 2012.-264с.
23. Патент №104789..Спосіб подачі охолоджувача на штабу при холодному прокатуванні./ В.О.Ніколаєв, С.В.Жученко, О.Г.Васильєв.Оубл. Бюл.№4, В21В 39/34, 25.02.2016р.
24. Николаев В.А. Влияние температуры металла на параметры прокатки с технологическими смазками.// Известия вузов. Черная металлургия.1975,№2. –С.91-93.
25. Николаев В.А. Параметры прокатки полос при температурах 20...250⁰С. // Известия вузов. Черная металлургия.1978, №1.-С.117,118
26. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос.- М.: Металлургия ,1971,200с.
27. Николаев В.А., Матюшенко Д.А. Алгоритм расчета продольной разнотолщинности стальной полосы //Сб. Металургія, №15.-Запоріжжя, ЗДІА, 2008-С.115.119.
28. Николаев В.А. Теория прокатки - Запорожье, ЗГИА, 2007.-232с.
29. Николаев В.А. Среднее нормальное контактное напряжение при холодной прокатке полоос //Производство проката, 2012, №1.-С.6-8.
30. Николаев В.А., Васильев А.А. Продольная разнотолщинность полос в зависимости от скорости холодной прокатки// Металл и литьё Украины, 2007, № 8.– с.20-22.
31. Николаев В.А., Путноки А.Ю. Формирование толщины полосы при прокатке на широкополосных станах– Запорожье: Дикое поле , 2011–268с/
32. Минаев А.А. Совмещенные металлургические процессы.- Донецк, Технопарк ДонНТУ УНИТЕХ, 2008.-552 с.-Металлургия, 1975. – С. 255-257.
33. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос. – М.: Теплотехника, 2008. – 640 с.
34. Николаев В.А. Процессы обработки металлов давлением.- Запорожье: Акцент Инвест-трейд, 2014.-192с.
35. Железнов Ю.Д., Коцарь С.Л., Абиев А.Г. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки.- М.: Металлургия, 1974.240с.
36. Грот И. Новый способ горячей прокатки тонких полос/ И. Грот, Л. Сьеревогель, М. Корнелиссен и др.// Черные металлы, 2004, июль- август. – С.30-32.

37. Янсен Х., Совка Э.К. Прогресс в развитии литейно – прокатного агрегата компании THYSSEN KRUPP STEEL // Черные металлы (пер. с нем.), 2007, №6-С.45-50
38. Остапенко Л.А., Коновалов Ю.В., Клименко О.В. Непрерывный широкополосный стан 1700 горячей прокатки Мариупольского меткомбината им. Ильича как объект модернизации // Металл и литье Украины, 2012, №1- С.12-17.
39. Николаев В.А., Васильев А.А. Технологические процессы прокатки широких полос // Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. ДГМА. – Краматорск, ДГМА, 2012, №2 (31). – С.194-200.
40. Николаев В.А. Теория и технология прокатки металла.- Запорожье: Акцент Инвест – трейд, 2011.232с.
41. Ткалич К.Н., Коновалов Ю.В. Точная прокатка тонких полос. - М.: Металлургия, 1972.-176с.
42. Николаев В.А., Васильев А.Г., Матюшенко Д.А. Комплексное влияние технологических факторов на приращение толщины по длине горячекатаных полос // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2011, №3.- С.43-47.
43. Николаев В.А. Теоретическое решение процесса прокатки волочения в неприводных валках // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2009, №6.- С.56-58.
44. Николаев В.А., Васильев А.А. Деформация полосы в неприводных валках с применением переднего натяжения // Производство проката, 2013, №3- С.17-22.
45. Грудев А.П., Тилик В.Т. Технологические смазки в прокатном производстве.- М.: Металлургия, 1975.-368с.
46. Сацкий В.А. Температурные условия прокатки с ускорением на широкополосном стане 1680./ В.А. Сацкий, А.И. Молчанов, А.Ю. Путники и др. // Теория и практика металлургии, 2007, №1.-С.5-7.
47. Николаев В.А., Васильев А.А. Особенности прокатки на комбинированном полосовом стане // Металл и литье Украины, 2011, №8. – С.3-7.
48. Николаев В.А. Технологические процессы производства широких полос. Сообщение 1. // Металл и литье Украины, 2012, №5.-С.24-27.
49. Николаев В.А. Новые технологии производства широкополосной стали. Сообщение 2. // Металл и литье Украины, 2012, №7.-С.23-26
50. Николаев В.А., Васильев А.А. Варианты реконструкции непрерывных станов для прокатки полос. // Производство проката, 2012, №6.-С.2-9.
51. Николаев В.А., Пилипенко С.С., Тилик В.Т. Натяжение и продольная разнотолщинность полосы на участке сварного шва // Металлургия и коксохимия, сб. 94. – К.: “Техніка”. 1987. – С. 38 – 43.
52. Николаев В.А., Пилипенко С.С. Метод определения продольной разнотолщинности полосы. // Теория и технология производства листового проката. МЧМ СССР, ИЧМ.-М.: Металлургия, 1991.-С.42-47.
53. Николаев В.А. Холодная прокатка полос на НСХП после предварительной перемотки горячекатаных рулонов / В.А. Николаев, А.Ю.

Путноки, А.Г. Николенко и др. // Вестник Национального университета “ХПИ”: “Новые решения в современных технологиях”, НТУ “ХПИ”, 2011, №47.-С.28-32.

54.Третьяков А.В., Гарбер Э.А. Расчет и исследования валков холодной прокатки. – М.: Машиностроение, 1966. – 179с.

55.Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. – М.: Металлургия, 1967. – 388с.

56.Боровик Л.И. Эксплуатация валков станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1968. – 233с.

57.Полухин В.П.Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных валков.-М.:Металлургия,1972.-512с.

58.Будаква А.А.Профилирование валков листовых станов / А.А.Будаква, Ю.В.Коновалов, К.Н.Ткалич и др. – К.: Техніка, 1986. – 190с.

59.Полухин П.И. Прикладная механика и расчет прокатных валков / П.И.Полухин, В.П.Полухин, Н.Ф.Андрианов, В.Г.Усачев. – Алма-Ата: Наука, 1977. – 202с.

60.Николаев В.А. Влияние профилировки валков на неравномерность распределения межвалковых нагрузок // Изв. вузов. Черная металлургия, 1982, №4. – С.68-70.

61.Никитенко Е.Н., Клименко В.М., Савицкий С.Г. О рациональном профилировании рабочих и опорных валков четырехвалковых клетей // Изв. вузов. Черная металлургия, 1988, №1. – С.67-71.

62.Николаев В.А. Длина дуги контакта при прокатке с учетом упругих деформаций валков и полосы // Изв. вузов. Черная металлургия, 1987, №4. – С.57-59.

63.Николаев В.А. Упругие деформации листовых валков // Изв. вузов. Черная металлургия, 1988, №10. – С.51-53.

64.Николаев В.А. , ЖученкоС.В. Формирование межвалкового контакта в клетки кварто //Металлургическая и горнорудная промышленность, 2010, №4.- С44-49.

65.Николаев В.А., Жученко С.В. Влияние различных факторов на неравномерность погонных сил при деформации полос. Сообщение 1.// Прокатное производство, 2015, №11.-С.10-14.

66.Николаев В.А., Жученко С.В. Расчет прогибов рабочих валков с учетом неравномерности погонных контактных сил. Сообщение 2.// Производство проката , 2015, №12.-С.3-8.

67.Николаев В.А., Жученко С.В. Неравномерность распределения погонных сил на контакте валков при прокатке в клетки кварто. //Международная конференция «Научно-технический прогресс в черной металлургии», сб.трудов - Череповец, 2015.-С.191-193.

68.Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки.-М.: Металлургия, 1980.-320с.

69.Полухин П.И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке./ П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др.-М.:Металлургия,1974.-198с.

70.Астахов И.Г. Распределение давления на контактной поверхности при прокатке.// Сб. тр. МИСиС, вып. XXX- М.:Металлургидат,1951.-С.56-61.

71.Николаев В.А., Жученко С.В. Погонные силы в области контакта "полоса-валок" в клети кварто // Металл и литье Украины, 2010,№ 12. С. 9-13.

72.Мазур В.Л. Производство листа с высококачественной поверхностью.- К.:Техніка,1982.-163с.

73.Сафьян М.М., Холодный В.П. Экспериментальное определение прогиба валков станов кварто. В кн. Обработка металлов давлением. XLVIII-е - М.: Гос. НТИ лит. Черн. и цветн. металлургии, 1962. 350 с.

74.Грудев П.И. Прогиб рабочих валков вследствие совместного сплющивания рабочих и опорных валков // Сб. «Обработка металлов давлением». Вып.2 – М., Металлуриздат, 1953. – С. 200–223.

75.Третьяков А.В., Гарбер Э.А.Расчет и исследование валков холодной прокатки. – М.: Машиностроение, 1966, - 179 с.

76.Николаев В.А., Васильев А.Г., Тилик В.Т. Определение рациональных профилировок рабочих валков чистовой группы ШСГП // Изв. вузов. Черная металлургия, 1997, №3. – С.25-28.

77.Николаев В.А. Холодная прокатка полос – Запорожье, ЗГИА, 2014-142с.

78.Боровик Л.И., Добронравов А.И. Технология подготовки и эксплуатации валков тонколистовых станов. – М.: Металлургия, 1984. – 104 с.

79. Николаев В.А. Новый способ профилировки валков непрерывного стана 1680 холодной прокатки / В.А. Николаев, И.Г. Овчаров, А.И. Симонов и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та “Черметинформация”, 1981, №5. – С.57-58.

80.Николаев В.А. Износ, прогиб профилирование валков стана 1680 холодной прокатки / В.А. Николаев, С.С. Пилипенко, А.Г. Васильев и др. // Сталь, 1990, №4. – С.52-56.

81.В.А.Николаев Внедрение новых профилировок опорных валков непрерывного стана 1700 холодной прокатки / В.А. Николаев, Н.И. Прищип, С.С.Пилипенко, Э.Н.Шебаниц // Черная металлургия. Бюл. ин-та “Черметинформация”, 1987, №2. – С.49-51.

82..Николаев В.А. Исследование износа валков стана холодной прокатки // В.А. Николаев, В.П. Полухин, Г.М. Попов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия, 1989, №9. – С.71-74.

82. Николаев В.А. Резервы повышения эффективности полосовых станов.-Сталь,2015, №8.-С.36-39.

83.Николаев В.А. Способы и устройства повышения качества полос.- Сталь,2015, №10.-С.28.31..

84.Nikolaev V.A. More Efficient Operation of Strip Mills- Steel in Translation, 2015, Vol.45,№8, pp593-597.

85.Кламма К. Технология CVC на полосовых станах холодной прокатки // Черные металлы (пер. с нем.), 1984, №22. – С.44-47.

86.Болте В. Технология CVC – новый способ холодной прокатки стальной полосы // Черные металлы (пер. с нем.), 1986, №9. – С.32-37.

87.Николаев В.А.Совершенствование технологии прокатки полос на ШСП // Металургія .Сб. наук. праць ЗДІА.- Запоріжжя, ЗДІА, 2014, № 1(31)- С.143-150.

88.Николаев В.А. Резервы повышения эффективности работы полосовых станов// Сталь, 2015, №8.-С.36-39.

89.Николаев В.А. Способы и устройства повышения качества полос //Сталь, 2015, №10.-С.28-31.

90.Nikolaev V.A. Improvements in Steel- Strip Quality- Steel in Translation, 2015, Vol.45,№10, pp778-783.

91.Николаев В.А., Пилипенко С.С. Расчет коэффициента трения при холодной прокатке //Изв. вузов. Черная металлургия,1989, №9.-С.55-60.

Методичне видання

Віктор Олександрович Ніколаєв
д.т.н., професор

**ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ
ТОЧНОЇ ПРОКАТКИ ШТАБ**

Навчальний посібник
для студентів ЗДІА
металургійних спеціальностей
денної та заочної форм навчання

Підписано до друку 23.01.2017р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 5,6. Наклад 1 прим.
Внутрішній договір № 5/17

Запорізька державна інженерна академія
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Глава 1 Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Соборний, 226
ЗДІА