Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти____другий (магістерський)_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему *Удосконалення технологічних режимів роботи ливарно-прокатних агрегатів для забезпечення стабільної якості гарячекатаного прокату*

Виконав: студент ___2_ курсу, групи *8.1364-омт*

*Комаровський Віталій Валерійович*_____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

спеціалізація
_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
*обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

Керівник Бондаренко Ю.В. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Бєлоконь Ю.О. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*_____

Рівень вищої освіти _____*другий магістерський рівень*_____
другий (магістерський) рівень)

Спеціальність ___*136 металургія*_____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма ___*обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____*МТЕТБ*_____
_____*Ю.О. Бєлоконь*__

"_27_" _____02_____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

_____*Комаровський Вітілій Валерійович* _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Удосконалення технологічних режимів роботи ливарно-прокатнихагрегатів для забезпечення стабільної якості гарячекатаного прокату
керівник роботи (проєкту)_____*Бондаренко Юлія Володимирівна к.т.н, доцент*____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *27 лютого 2025* року № *319*-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____*01.12.2025*_____

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) . *Виконані розрахунки режиму деформації та енергосилових параметрів прокатки. Розроблено раціональний режим деформації штаби с розмірами 1,0×1200 мм підкату* $h_п$*=18мм.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Аналітично-пошукова частина, Дослідно-розрахункова частина, Експериментальна частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки, Перелік джерел посилань.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал 13 слайдах (на 13 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1 Аналітично-пошукова частина	*Бондаренко Ю.В., доцент*	
Розділ 2 Дослідно-розрахункова частина	*Бондаренко Ю.В., доцент*	
Розділ 3 Експериментальна частина	*Бондаренко Ю.В.доцент*	
Розділ 4 Охорона праці та техногенна безпека	*Бондаренко Ю.В.доцент*	

7. Дата видачі завдання *28.02.2025*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	*Вступ*	*до 07.09.2025*	
2	*Реферат*	*до 07.09.2025*	
3	*Аналітично-пошукова частина*	*до 12.09.2025*	
4	*Дослідно-розрахункова частина*	*до 12.10.2025*	
5	*Експериментальна частина*	*до 14.11.2025*	
6	*Охорона праці та техногенна безпека*	*до 21.11.2025*	
7	*Висновки*	*до 28.11.2025*	

Студент _____ *В.В.Комаровський*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) *Ю.В. Бондаренко*

Нормоконтроль *Ю.О. Бєлоконь*

Реферат

Кваліфікаційна робота магістра : 92 с., 27 рис., 5 табл.; 13. джерел.

ПРОКАТКА, ШИРОКОШТАБОВИЙ СТАН, ДЕФОРМАЦІЯ, ШТАБА, РЕЖИМ ОБТИСКУ, СТАЛЬ 08ПС, ЯКІСТЬ ПРОКАТУ, ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ, ВАЛКИ, МІЦНІСТЬ, ЗУСИЛЛЯ ПРОКАТКИ

Об'єкт дослідження – НШСГП 2000.

Метою випускної роботи магістра є аналіз технологічних особливостей прокатки штаб прокатки слябів для забезпечення стабільної якості гарячекатаного прокату

Методи розрахунків – стандартні методики розрахунків у програмних комплексах Excel. Розрахунки, а також аналіз роботи стану на основі реальних виробничих даних.

Матеріал дослідження – сталь 08пс.

Проведено аналіз технологічних процесів на стані третього покоління НШСГП 2000 та діючих комплексів з ЛПА. Були виділені недоліки та переваги даних станів. У порівнянні із традиційними комплексами МНЛЗ-ШСГП ливарно-прокатні агрегати мають переваги: краща якість виготовленої продукції, зниження енергетичних і економічних витрат, компактність.

Результати досліджень можуть бути використані у листопрокатних цехах металургійних підприємств для підвищення ефективності виробництва.

ЗМІСТ

ВСТУП……6

1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА…….……7

1.1 Практичні аспекти проблеми формоутворення широкої сталевий листової продукції……..……...7

1.2 Аналіз відомих методів опису формоутворення листового прокату при прокатуванні у вертикальних та горизонтальних валках.…….……14

1.3 Передумови створення ЛПА…….....36

1.4 Аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів процесу редагування штаб на роликових правильних машинах…….....44

1.5 Недоліки й переваги розглянутих станів……..…..47

2 ДОСЛІДНИЦЬКО –РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА…….53

3.ЕКСПЕРИМЕТАЛЬНА ЧАСТИНА…….……64

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА…….74

4.1 Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища…….....74

4.2 Заходи з поліпшення умов праці у цеху гарячої прокатки……..…..77

4.3 Заходи з електробезпеки……...86

4.4 Заходи з пожежної та техногенної безпеки……..…..88

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ…….……90

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ …… 91

ВСТУП

Темпи розвитку машинобудування та інших галузей промисловості формують усі зростаючі потреби у високоякісних конструкційних матеріалах. Насамперед це стосується листового прокату. На всіх етапах його виробництва від прокатки слябів до виправлення форма та розміри листового прокату мають вирішальне значення для реалізації всіх інших якостей. Набуває особливої актуальності отримання геометрії прокату, що відповідає вищому світовому рівню та застосовності для лазерної або плазмової обробки. Потрібно зменшувати поперечну різнотовщинність широких сталевих штаб і забезпечувати мінімальне відхилення деталей від площинності після лазерного або плазмового різання. Такі високі конкурентні якості досягаються удосконаленням технологій виробництва сталевого листового прокату, головним чином за рахунок підвищення ефективності його формоутворення.

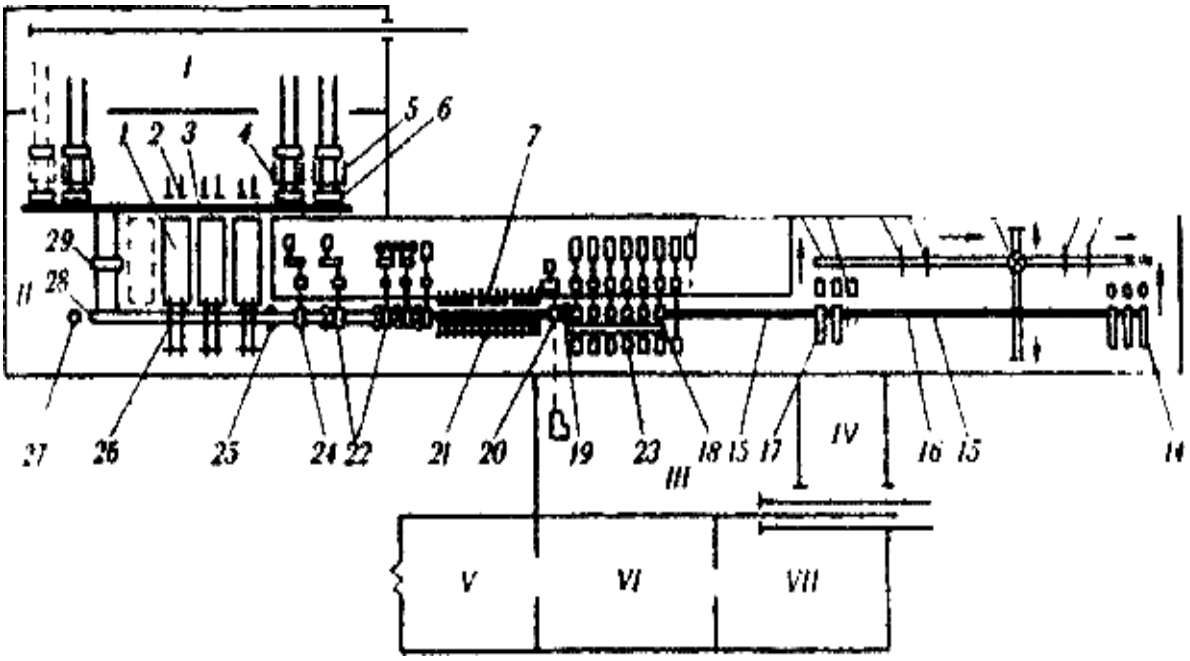
Використання ШСГП в комплексі з ЛПА вирішує основні проблеми: безпеку безперервного розливання, висока зовнішня й внутрішня якість штаб, узгодження роботи встаткування в умовах низької швидкості лиття й високої швидкості прокатки. Успіхи в створенні сучасних МНЛЗ із високим рівнем автоматизації й керування дозволили з урахуванням досягнень у виплавці чистої сталі, попередження її забрудненні при безперервному розливанні й ушкодження металу при кристалізації, направляти литі заготівлі без огляду в безперервний стан (прямий прокат), зберігаючи тепло лиття. Лінія лиття й прокатки має високу гнучкість із погляду виробничої потужності й дозволяє одержувати продукцію таких розмірів і з таких марок сталі, прокатка яких не може бути забезпечена на звичайних листових станах. У результаті забезпечується можливість організації ефективного виробництва продукції.

1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА

1.1 Практичні аспекти проблеми формоутворення широкої сталевий листової продукції

Найважливішою умовою розвитку металургійної галузі є виробництво конкурентоспроможної високорентабельної металопродукції. Сталевий листовий прокат був і залишається одним із затребуваних видів сортаменту чорної металургії, на який зберігається великий попит у різних галузях машинобудування, будівельної індустрії, автомобільної галузі, нафтогазовій та трубній промисловості та обробних галузях. Одночасно зі зростанням споживання листової сталі безперервно підвищуються вимоги до її якісних показників. Найважливішими показниками якості на всіх етапах виробництва від прокатки слябу до виправлення сталевого листа є його форма та розміри. Формоутворення кожному етапі виробництва характеризується різними особливостями і визначає реалізованість всіх властивостей листової металопродукції. Найбільша частка виробленого листового прокату посідає безперервні широкосмугові стани гарячої прокатки (НШСГП) [1–5] і сягає 65–70 %. Такого широкого поширення НШСГП набули за рахунок високої продуктивності, можливості отримувати різноманітний сортамент за марками сталі та профілерозмірами з високою точністю по геометрії та з відповідністю заданим механічним властивостям смуг. За всі роки існування НШСГП зберігають загальну конфігурацію: ділянка нагрівальних печей, чернова група клітей, проміжний рольганг, чистова група, рольганг, що відводить, і моталки. Одна з основних тенденцій сучасного розвитку НШСГП пов'язана з постійним розширенням сортаменту для забезпечення потреб у трубних, суднобудівних, надміцних сталях, сталях для машинобудування та автомобілебудування, а також зі зростанням його продуктивності. Прагнення

розширювати сортамент на безперервних широкосмугових станах гарячої



I - склад слябів; II - проліт стану; III - ділянка підігріву валків;

IV - насосна станція; V - майстерня ревізії підшипників кочення;

VI – вальця шліфувальна майстерня; VII- склад валків; 1 нагрівальна піч; 2 - штовхач слябів у печі; 3 - завантажувальний рольганг, 4 - візок для слябів; 5 - штовхач слябів у стола; б - піднімальний стіл; 7 - скидач не до катів; 8 - чистова кліть № 8 (штриховими лініями показані нагрівальна піч і чистова робоча кліть № 8, намічувані до установки); 9 - конвеєри рулонів; 10 – кантувач рулонів; 11 - маркірувальник рулонів; 12 – рулонно-зв'язувальна машина; 13 - підйомно-поворотний стіл; 14 - друга група моталок; 15 - системи охолодження штаб на рольгангах, що відводять; 16 - рольганги, що відводять; 17 - перша група моталок; 18- чистова група клітей; 19 - чистовий роликовий окалиноломач; 20- летучі ножиці; 21 - кишеня для недокатів і товстих штаб, 22 - чорнові чотиривалкові універсальні кліті; 23 - механізми для зміни валків; 24 - чорнова кліть; 25 - вертикальна кліть; 26 - приймач слябів; 27 - стаціонарний упор; 28 - прийомний рольганг для слябів; 29- передатний візок для слябів.

Рисунок 1.1 – Схема розташування встаткування стану 2000:

прокатки насамперед обумовлюється економічною складовою – процес прокатки характеризується меншим витратним коефіцієнтом металу та витратами енергії порівняно з виробництвом аналогічної продукції на товстолистових прокатних станах

Останнім часом товщину розкату збільшують до 45 - 80 мм, що дозволяє прокочувати на безперервних станах штаби товщиною до 30 мм високої якості. Для відрізки переднього кінця товстих розкатів сконструйовані спеціальні летучі ножиці барабанного типу. Для прокатки товстих штаб на сучасних станах установлюють спеціальні моталки, розраховані на змотування штаб товщиною до 30 мм і шириною до 2000 мм.

У чорновій групі чотиривалкові кліті 22 універсального типу (з горизонтальними й вертикальними валками). Вертикальні валки цих клітей призначені для зняття розширення металу й калібрування розмірів сляба по ширині. Обтиснення в цих клітях не перевищує 25 мм. Особливістю цього стану є наявність три клітьової безперервної групи, у якій розкат прокочують із натягом 10 - 15 Н/мм^2. Для одержання такого натягу коефіцієнт неузгодженості сусідніх клітей становить до = 1,005-1,01. Окружна швидкість у першій кліті стану v = 1,2 м/с останньої (п'ятої) кліті чорнової групи дорівнює $V_3 < 5$ м/с.

Після чорнової групи розкат з температурою 1080 – 1100 °С подають на проміжний рольганг довжиною ~ 40 м, по якому переміщується до чистової групи клітей 18. У випадку раптової зупинки клітей чистової групи, розкат із проміжного рольганга скидачем 7 передають у кишеню 21 для недокатів і товстих штаб. Перед входом у першу кліть чистової групи передні дефектні кінці відрізають на летучих ножицях 20 барабанного типу. По мірі руху розкату по проміжному рольгангу відбувається втрата тепла й температура його заднього кінця, що входити в першу кліть чистової групи пізніше переднього, буде 50 - 85°С нижче. Наявність перепаду температур по довжині (штаби) обумовлює поява поздовжньої різної товщини. Для компенсації впливу температурного клина прокатку штаби чистовій групі

виконують із прискоренням Ду = 0,05 - 0,1 м/с^2 захвату переднього кінця штаби моталкою. При такій прокатці поздовжня різнотовщиність штаби робиться мінімальною за рахунок зменшення градієнта температур і зниженні границі текучості металу.

Формоутворення на стадії чистової прокатки гарячекатаних штаб і надалі при прокатці штаб на станах холодної прокатки характеризується таким показником якості, що нормується міжнародними стандартами, як відхилення товщини δ_h від номінального (заданого) значення $h_{ном}$ по всій площі штаби. Штаба відповідає за цим показником світового рівня якості, якщо $\delta_h \leq 0{,}02h_{ном}$. Ця вимога відноситься і до такого важливого різновиду показника δ_h, як поперечна різнотовщинність:

$$\delta h_{піп} = h_з - \frac{h_{лев} - h_{пр}}{2},$$

де hз, hлів, hпр- товщина штаби в середині ширини, по лівій і правій бокових кромках.

Поперечний профіль широких сталевих штаб при прокатці прагнуть сформувати опуклої форми (рисунок 1.2). У цьому випадку виникають поперечні сили, що утримують штабу на середині бочки валків, а процес прокатки широких штаб з формуванням опуклої форми профілю протікає стійкіше, ніж при ідеально рівній формі профілю. Вимога до поперечної різнотовщинності при опуклій формі профілю hз>hлев, hз>hпр виражається нерівністю:

$$\delta h_{піп} \leq 0{,}02h_{ном}.$$

$h_{лев}$

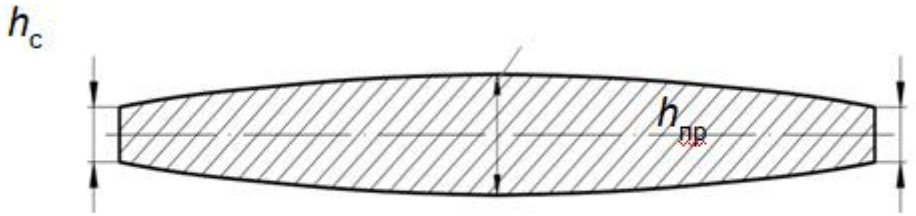


Рисунок 1.2 – Поперечний профіль штаби опуклої форми

У листопрокатному виробництві задля досягнення рівня найкращих світових стандартів з геометрії широкої сталевої продукції здійснюється модернізація обладнання та технологій прокатки, удосконалюються профільування валків, підвищуються можливості систем регулювання процесу прокатки. На точність роботи виконавчих механізмів систем регулювання процесу прокатки, таких як осьова зсувка, гідравлічний вигин, багатозонне охолодження бочок валків, а також системи автоматичного регулювання товщини і натягу штаби, надають коливання товщини підкату, знос бочок валків, неоднаковий по їх довжині, і т.д. (1.2) не завжди виконується. Також практика роботи безперервних станів показує, що освоюються технології прокатки штаб товщиною, меншою, а шириною, більшою, ніж передбачено початковими проектами [2, 4, 6], що призводить до суттєвого зростання навантаження на обладнання, в першу чергу, на основний упругодеформовані інструмент - прокатні валки. У цих умовах суттєвий вплив на точність геометрії листового прокату та стійкістьвалків, і, як наслідок, ефективність процесу формоутворення при листовій прокатці надає виконується профіль валків перед їх встановленням в прокатну кліть.

Для листопрокатного виробництва важливе значення має вирішення проблеми синтезу нових профільувань валків. При цьому для досягнення заданої форми та розмірів сталевого прокату необхідно враховувати всі технологічні можливості листопрокатних станів та забезпечувати високу стійкість валків. Крім того, важливим аспектом при вдосконаленні процесів прокатки сталевої листової продукції, крім збільшення стійкості валків, що

істотно впливає на якість продукції та продуктивність прокатних станів, є зменшення їх витратного коефіцієнта. За оцінкою низки досліджень [1-3], витрати на прокатні валки у структурі собівартості прокатного переділу досягають 15-20%. У [1] наголошується, що витрата валків на 1 т прокатної продукції характеризується досить широким діапазоном і становить від 0,05 до 25 кг/т.

Таким чином, для практики прокатного виробництва дуже актуальне розширення технологічних впливів на геометричні параметри широких сталевих штаб та листів при прокатці з одночасним зниженням витрати та підвищенням стійкості прокатних валків.

Крім точності товщини, іншим найважливішим геометричним показником листопрокатної продукції є відхилення від площинності, яке визначається як найбільша відстань від точок реальної поверхні до прилеглої площини. На рисунку 1.3 як приклад представлена неплощинність листа у вигляді крайової хвилястості (*а*) та схема вимірювання відхилень від площинності (*б*). Як правило, вимір проводиться на 1 м довжини. Питання дослідження площинності гарячекатаного листового прокату розглянуті у різних роботах, як російських, і зарубіжних дослідників [2–4]. У них запропоновано та реалізовано рішення щодо вдосконалення технологій гарячої прокатки, управління охолодженням штаби на відведеному рольгангу, налаштування режимів змотування штаби та охолодження рулонів. Всі перелічені заходи виробництва на безперервних прокатних станах з подальшим виправленням гарячекатаних штаб на сучасних роликових правильних машинах (РПМ) дозволяють отримувати штаби та листи з допустимими (таблиця 1.1) та меншими відхиленнями від площинності.

У теж час, зі сторони машинобудівних виробництв, що використовують високотехнологічні методи переробки гарячекатаного листового прокату, висуваються додаткові вимоги щодо забезпечення високої площинності та після обробки, наприклад методом лазерного або плазмового різання. На

рисунку 1.4 показаний вигин гарячекатаного листа товщиною 3 мм після розкрою на установці плазмового різання на смужки шириною 100 мм та довжиною 1 метр. Відхилення від площинності у крайових смужок у разі було близько 70 мм.

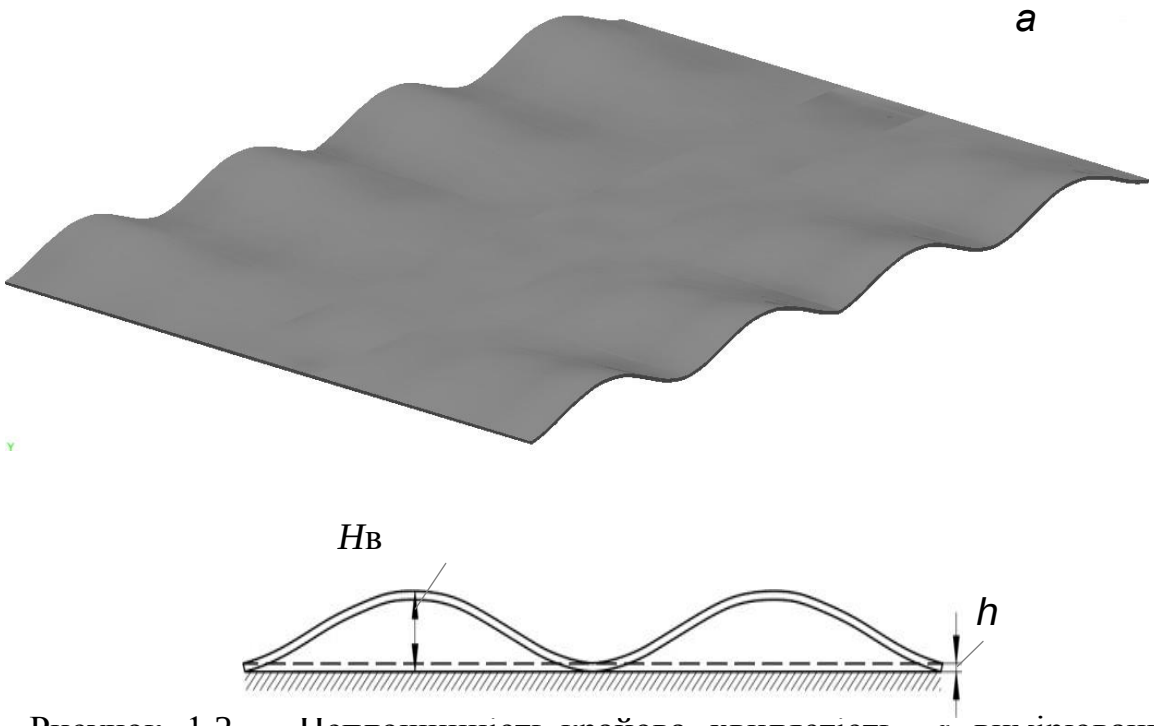


Рисунок 1.3 – Неплощинність-крайова хвилястість -*а* вимірювання відхилення від площинності Δ =*Н*в-*h* (*Н*в- висота хвилі, *h*- Товщина штаби) – *б*

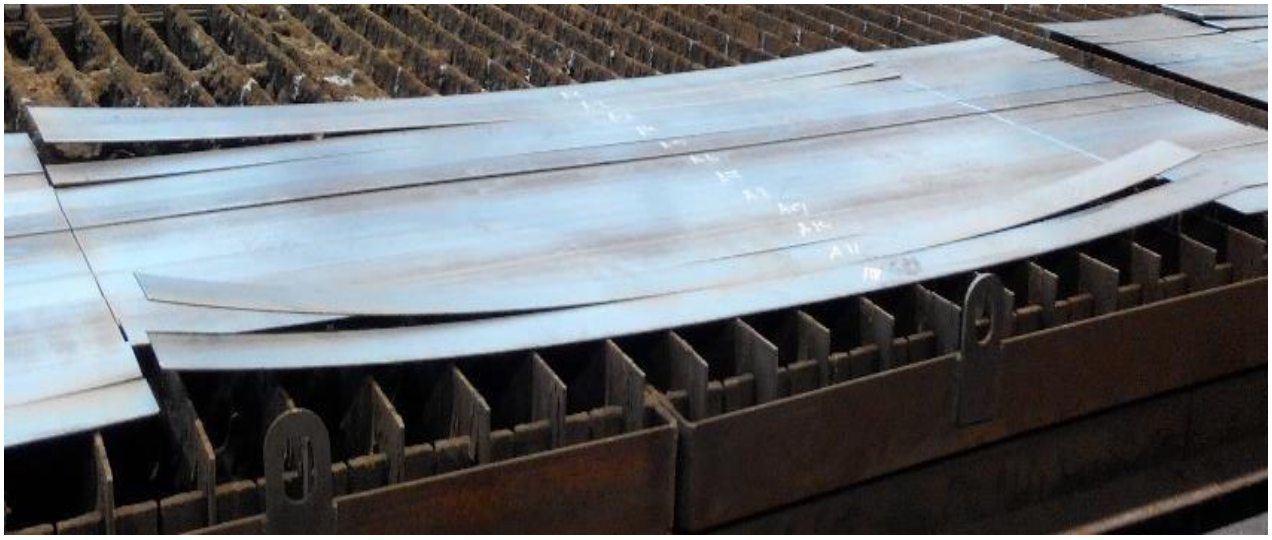


Рисунок 1.4 – Деформація гарячекатаного листа після плазмового різання

Ризик виникнення таких деформацій під час та після розкрою змушує споживачів металопрокату вимагати забезпечення площинності деталей та після високотехнологічної обробки листів. Остання обставина значною мірою підвищує актуальність подальшого дослідження процесу формоутворення широких гарячекатаних сталевих штаб та листів для досягнення суттєво нових можливостей впливу на листову металопродукцію для виключення її деформації при подальшій обробці.

Вирішення всіх перерахованих проблем підвищення геометричних показників широкої сталевої листової продукції, стійкості деформуючого робочого інструменту та економії матеріальних ресурсів передбачає виявлення та розкриття нових закономірностей формоутворення листового прокату на всіх етапах виробництва з розробкою комплексу технічних та технологічних рішень щодо вдосконалення процесів листопрокатного виробництва.

1.2 Аналіз відомих методів опису формоутворення листового прокату при прокатуванні у вертикальних та горизонтальних валках.

Питанням теорії формоутворення листового прокату при прокатці у вертикальних та горизонтальних валках, а також дослідженням

нерівномірності деформації по довжині та ширині гуркотів присвячені роботи І.М Павлова, А.І. Целікова, М.М. Саф'яна, А.М. Мелешко, В.В. Мельцера, Г.Е. Аркуліса, П.І Полухіна, Р.Л. Шаталова, В.М. Салганіка, І.П. Шабалова, А.М. Пєсіна, І.П. Мазура та інших авторів. У роботах розглядаються різні аспекти формоутворення при виробництві товстолистового прокату та прокатці в чорновій групі безперервних широкоштабових станів. Тим не менш, через складне формоутворення слябу питання прогнозування величини зміщення поверхневих дефектів від крайок розкочування в напрямку середини ширини, а також розробки нових режимів прокатки та використання наявних резервів стану для зменшення бічного обрізу широких сталевих штаб вимагають подальшого розвитку.

З одного боку, збільшення обрізу металу на НШСГП пов'язане з різним розширенням вільних кінцевих ділянок у порівнянні з рештою гуркоту, що призводить до його різноширинності і, як наслідок, до збільшення бічної та кінцевої обрізи. При обтисканні слябу в кліті з вертикальними валками приконтактне потовщення неоднаково по його довжині: висота напливів зменшується від меж зон процесу, що встановився, до торців слябу. Різна величина потовщення кромок по довжині гуркоту призводить до різної величини розширення при подальшій прокатці в горизонтальному проході та отримання різноширинного гуркоту. У цьому випадку відбувається завуження головних та хвостових ділянок гуркоту.

Зниження різноширинності на безперервних сучасних станах вирішується на основі застосування змінного обтиснення у вертикальних валках зі зменшенням величини деформації на кінцевих ділянках слябу.

З іншого боку, втрати металу пов'язані зі зростанням величини бічного обрізу через зміщення дефектів від кромок у напрямку середини ширини розкочування. Такими дефектами можуть бути бульбашки, тріщини та інші поверхневі дефекти, що розташовуються на бічних гранях слябу і не виявлені та не віддалені зі слябу після безперервного розливання. Незважаючи на наявну значну кількість робіт з дослідження зміщення дефектів від крайок у

напрямку середини ширини гуркоту, це питання через вплив великої кількості технологічних факторів до кінця не розкрито. У роботах [2,3] показано, що на ділянках поверхні товстих листів і штаб, що обрізалися через переход металу з бічних граней безперервнолитих слябів на широку поверхню, у більшості випадків відзначається підвищене дефектоутворення, наприклад, у вигляді тріщин. На рисунку 1.5 показаний зовнішній вигляд розкочаного підкіркового міхура на прокаті. Підкірковий міхур розташовувався в ребровій зоні слябу.

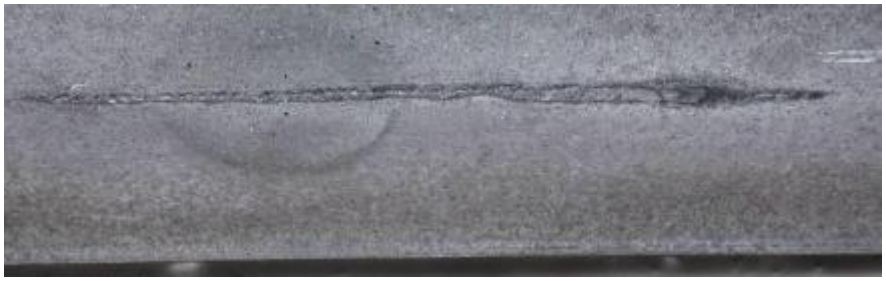


Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд розкоченого підкіркового міхура на прокаті

Ширина смужок переходу металу з вузької грані на широку залежить від величини деформацій у вертикальних та горизонтальних валках, від форми калібрування вертикальних валків, умов тертя та інших факторів. При значному переході металу дефекти залишаються на кромках листового прокату після обрізки або потрібно збільшувати бічну обріз металу. У роботі [4] на основі промислового експерименту встановлено, що використання увігнутих бічних граней слябу з одночасним зменшенням бокового обтиснення у вертикальних валках забезпечує менше зміщення дефектів прикромочних до поздовжньої осі розкату. Авторами робіт [5–7] показано ефективність використання вертикальних валків з ящиковими калібрами за рахунок зниження деформації в ребрових зонах слябу та зменшення усунення дефектів до середини широких граней.

Останнім часом при дослідженні складної формозміни гуркоту при чергуванні обтискань у вертикальних і горизонтальних валках, аналізі

поведінки дефектів при чорновій прокатці перевага надається методу кінцевих елементів. У роботах [9] використано кінцево-елементне моделювання для встановлення основних закономірностей трансформації поверхневих поздовжніх та поперечних тріщин слябу у дефекти поверхні широкоштабового прокату при деформації у горизонтальних валках чорнової групи стану. У роботах [2–4] наводяться результати чисельного дослідження процесу прокатки у трьох універсальних клітях чорнової групи за різних обтискання у вертикальних валках і постійних обтискання у горизонтальних валках. Допущення про сталість вибраних обтискань у горизонтальних валках вимагає подальшого дослідження та моделювання процесу деформації слябу у чорновій групі стану 2000. Крім того, необхідно враховувати, що прокатка у чорновій групі НШСГП включає п'ять проходів у вертикальних та горизонтальних валках.

Виконаний аналіз відомих методів опису формоутворення показав, що не всі аспекти процесу прокатки слябу у вертикальних і горизонтальних валках розглянуті комплексно і глибоко і потрібно подальше вивчення закономірностей на основі чисельного моделювання та експериментальних промислових досліджень для вдосконалення процесу прокатки на безперервному широкоштабовому стані та збільшення виходу придатний металопродукції.

Проблеми моделювання формоутворення поперечного профілю листового прокату та підвищення технологічного впливу на профіль при прокатці.

Аналіз особливостей моделювання формоутворення поперечного профілю листового прокату

Поперечний профіль широких сталевих штаб формується в вертикальної осьової площини у просторі між утворюючими бочок верхнього та нижнього робочих валків. Початковий стан утворюючих робочих валків, що контактують з металом, змінюється при прокатці під впливом наступних факторів:

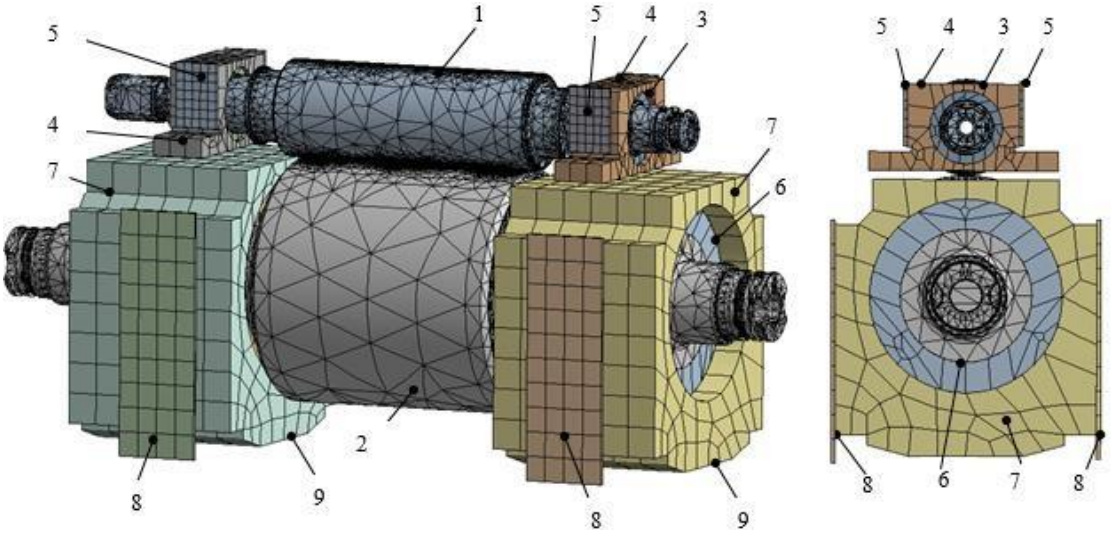
- пружних деформацій, спричинених силою прокатки;
- теплового профілю бочки, що виникає через те, що середня частина бочки нагрівається від контакту з металом більше, ніж торцеві ділянки бочки, вільні від штаби;
- Зношування бочки, що збільшується у функції пробігу.

Пружні деформації валкових систем істотно впливають на нормовані показники точності поперечного профілю штаб, що прокочуються: поперечну різнотовщинність, клиноподібність, місцеві потовщення і неплощинність. Відомі методи розрахунку пружних деформацій валків листових станів [8–10] описують напружено-деформований стан валкової системи та штаби, що прокочується, і відрізняються урахуванням різних факторів, а також прийнятими припущеннями. При розгляді пружних деформацій валкової системи кварто, що є найпоширенішою в клітках штабових і листових станів, їх складовими є прогин осей робочих і опорних валків, взаємне пружне стиск опорних і робочих валків у міжвалковому контакті і пружне стиснення робочих валків. Відомі аналітичні методики розрахунку цих параметрів виконані такими відомими вченими як А.І. Ціліков, П.І. Грудьов, С.С. Чепуркін , О. Еміке, К. Лукас, П.І. Полухін, Л.І. Боровик, В.П. Полухін, Г.Г. Григорян, Ю.Д. Желєзнов, А.В. Третьяков та Е.А. Гарбер, А.А. Будаква та Ю.В. Коновалов. У роботах В.В. Мельцера, В.М. Салганік розроблено матричний метод розрахунку пружних прогинів валкової системи кварто при симетричному навантаженні, який надалі розвивався та використовувався у широко відомих дослідженнях П.П. Польцева, М.І. Рум'янцева, С.М. Бєльського.

Розвиток теорії розрахунку валкових систем на основі аналітичних моделей спрямовано на збільшення числа факторів, що враховуються, при цьому характер дії навантажень наближається до реальних умов прокатки і контактної взаємодії валків між собою і робочих валків зі штабою. Все це призводить до суттєвого ускладнення математичного апарату, що обумовлює труднощі оцінки його адекватності та застосовності на практиці.

Останнім часом при дослідженні особливостей деформацій та напруженого стану валкових систем застосовуються обчислювальні середовища кінцево-елементного аналізу [1-6]. У цьому розглядаються різні розрахункові схеми валкових систем.

У роботах [2-3] розглянута тривимірна кінцево-елементна модель валкового вузла (рисунок 1.6), що включає не тільки підшипникові опори, а й подушки і контактуючі з ними планки, що закріплюються у вертикальних площинах вікон станин прокатної кліті, при цьому умови контактної взаємодії подушок.



а **б**

Рисунок 1.6 – Звичайно-елементна модель нижньої пари валків кліті кварто: *а*– загальний вигляд;*б*- Вигляд з непривідної сторони: 1 – робочий валок; 2 – опорний валок; 3 – підшипники робочого валка; 4 – подушки робочого валка; 5 – планки, що закріплюються на опорних площинах корпусів, встановлених у вікнах станин; 6 – підшипники опорного валка; 7 – подушки опорного валка; 8 – планки, що закріплюються у вертикальних площинах вікон станин; 9 – грані подушок опорних валків, що знаходяться в контакті з натискними пристроями

У моделі нижньої пари валків нижні грані подушок опорного валка 9 жорстко закріплені, так як у реальній кліті вони спираються на плоскі поверхні натискних клинових пристроїв, встановлених на нижніх поперечках станин. Також жорстко закріплені грані планок 5 і 8, з'єднані нерухомо з вертикальними площинами вікон станин. Така схема закріплень, як і в реальній кліті кварто, дає можливість шийкам робочих валків з підшипниками та подушками переміщатися по вертикалі і повертатися відносно нерухомих вертикальних опорних поверхонь вузла станин, долаючи тільки сили тертя ковзання, а подушки опорних валків обмежені у вертикальних переміщеннях контактом з нажим.

На поверхні контакту моделі робочого валка з металом, що прокочується, налаштовується розмір кінцевих елементів і створюється впорядкована сітка.

До моделі робочого валка з боку штаби прикладається сила, розподілена за площею осередку деформації, ширина якого визначається шириною штаби, що прокочується. Довжина осередку деформації розраховується заздалегідь однією з відомих методик [8].

Крім того, у роботі [3] була виконана оцінка точності одержуваних результатів. Незважаючи на досить високу точність цього методу, він має низку недоліків - високою трудомісткістю розрахунків, відсутністю можливості обліку опукло-увігнутих профільувань валків та осьового зсуву робочих валків, що використовуються на сучасних широкоштабових станах.

Автори [4-5] розглядали спрощені схеми фіксації шийок валків та не враховували профілювання валків. У роботі [4] схема фіксації шийок валків (рисунок 1.7) є спрощеною: підшипники опорного та робочих валків замінені нерухомими кільцевими сегментами 1 та 2 з кутом охоплення 90°. У контакті бочок робочого та опорного валків враховується можливість взаємного відносного усунення в осьовому напрямку шляхом завдання коефіцієнта тертя ковзання, що дорівнює 0,1. У контакті робочого валка зі штабою сила прокатки розподілена по всій площі осередку деформації.

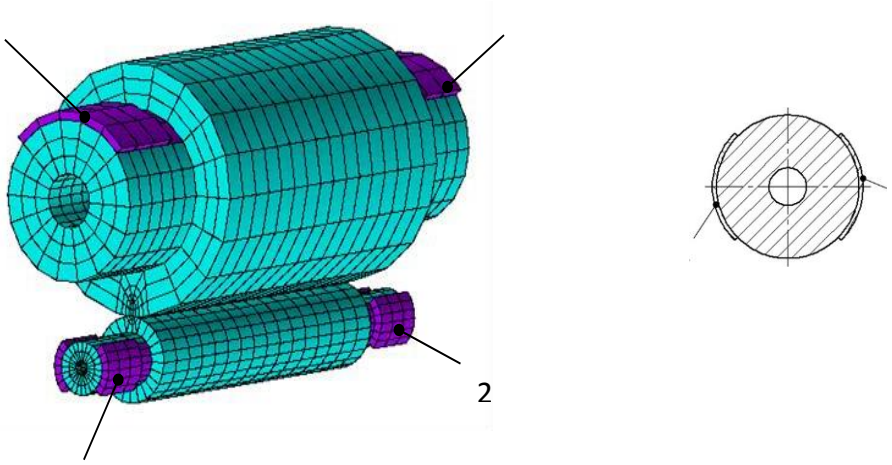


Рисунок 1.7 – Звичайно-елементна модель валкового вузла кліті кварто, запропонована у роботі [4]:*а*– загальний вигляд; *б*– переріз шийки робочого валка

У роботі [5] була розроблена кінцево-елементна модель валків кліті кварто (рисунок 1.8) для дослідження впливу зусиль протизгинання робочих валків на поперечну різнотовщинність штаби, що прокочується. При цьому було прийнято припущення про сталість прогину робочого валка від дії зусилля прокатки і враховані площини симетрії щодо штаби, що прокочується, поздовжнього перерізу і серединної площини валкової системи.

Крім перерахованих недоліків, авторами робіт не було виконано оцінку впливу прийнятих схем валкових вузлів на точність результатів розрахунку.

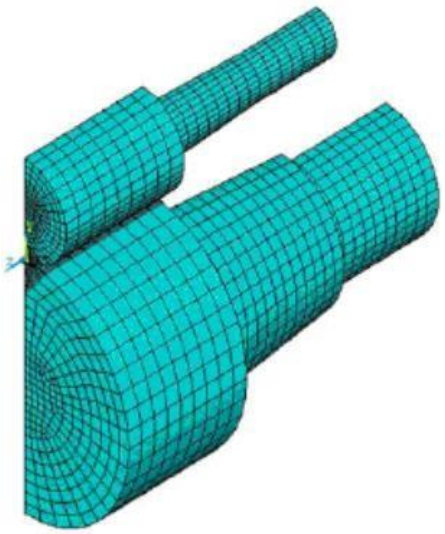
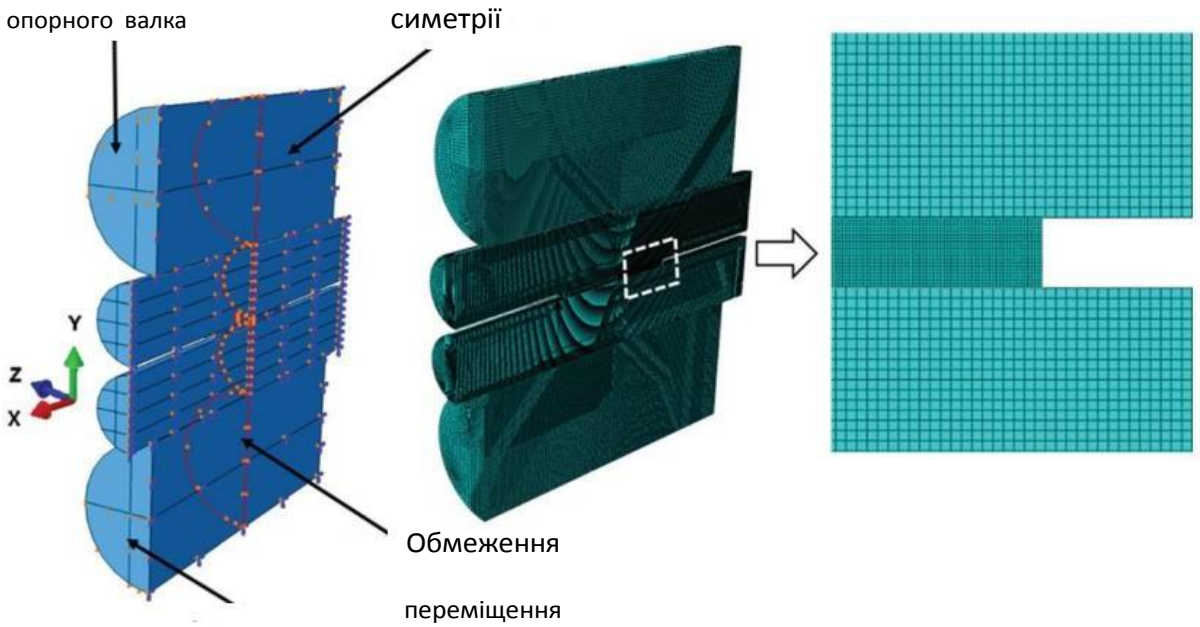


Рисунок 1.8 – Звичайно-елементна модель валків кліті кварто

Створена в роботі [5] модель валкового вузла (рисунок 1.9) характеризується площиною симетрії по вертикалі з відсутністю переміщення точок, що належать цій площині, у негативному напрямку осі*Z*. З моделі було виключено підшипникові опори валків та розміщено штабу між робочими валками. Для нижнього опорного валка було обмежено переміщення осями*X*і*Y*верхній опорний валок переміщався вниз на величину обтискання при прокатуванні. При цьому досліджувався вплив розподілу напруг у міжвалковому контакті при різному осьовому зміщенні робочих валків з опукло увігнутими профільуваннями.

У роботі [5] обґрунтовується, що розроблена кінцево-елементна модель дозволяє враховувати несиметричність профільувань та їх вплив на профіль штаби, що прокочується. Недолік моделі пов'язується з неможливістю врахування коректного прогину валків, у тому числі через виключення підшипникових опор.

У ряді робіт зарубіжних авторів [7-8] наводиться опис результатів досліджень деформацій та напруг валкових систем кварто з різними профілюваннями, але без розкриття опису розрахункових схем моделей, що розробляються.



Переміщення по осі*Y*

Рисунок 1.9 – Звичайно-елементна модель валкової системи кварто, описана у роботі [8]

Що ж до обліку двох інших чинників щодо поперечного профілю штаби, то теплові профілі бочок валків отримують експериментальним шляхом, наприклад з допомогою вимірювання температури бочок валків тепловизионной камерою, або визначають з урахуванням теоретичного описи теплових процесів прокатки, досить докладно освітлених роботах д.т.н. Е.А. Гарбера зі співавторами. Зношування поверхневого шару бочок валків залежить від великої кількості факторів, різних для кожного діючого стану. До основних факторів слід віднести: зносостійкість матеріалу та технологію виготовлення валків, режими їх перешліфування, температурно-деформаційні та швидкісні режими прокатки, нормативи міжперевалочних періодів, інтенсивність охолодження валків. Тому створення універсальної методики прогнозування зносу, придатної всім станів, недоцільно. Коректніший підхід - отримання на кожному стані статистично достовірних профілактограм зносу по довжині бочки валків. Аналіз досліджень з

моделювання зношування валкових систем підтверджує, що прогнозування зношування найбільш адекватно відображається з використанням стохастичних моделей.

Наведений аналіз публікацій показав, що для вирішення питання підвищення точності формування поперечного профілю широких штаб і листів потрібен розвиток розрахунку пружних деформацій валкових систем з можливістю обліку різних конструктивних параметрів валків і технологічних впливів сучасних станів.

Аналіз профілювань валків у листопрокатному виробництві як фактора технологічного впливу на профіль листового прокату та методів їх моделювання

Профілювання є одним із факторів технологічного впливу на геометричні показники листового прокату і, по суті, має забезпечувати компенсацію впливу пружних деформацій, зношування, теплового розширення валків на поперечний профіль листового прокату. Поперечний профіль при прокатці також формується під впливом виконавчих механізмів систем регулювання, таких як осьове зсув, гідравлічний вигин, багатозонне охолодження бочок валків, системи автоматичного регулювання товщини і натягу штаби, розвиток яких здійснюється на основі розширення діапазонів регулювання, підвищення їх швидкодії.

Значимість профілювань валкових систем кварто пов'язана не тільки з можливістю розширення діапазону регулювання геометричних показників листового прокату, що реалізується виконавчими механізмами управління процесом прокатки, але і з їх істотним впливом на розподіл напруг у міжвалковому контакті, рівномірність зношування поверхонь бочок валків і, як наслідок, на стійкість валків.

Насправді застосовують різні профілювання валкових систем залежно від типу стану та умов його роботи. На безперервних листових станах можуть використовуватися як універсальні профільування, придатні для прокатки всіх типорозмірів і марок сталей, так і профілювання, що

відрізняються за клітями. Прикладом універсальних профілювань є опукло-увігнуті профілювання або CVC-профілювання валкових систем кварто з осьовим зсувом робочих валків. Систему профілювання CVC (Continuously Variable Crown – кривизна, що безперервно змінюється), розробила фірма SMS group (SMS Demag AG, SMS Schloemann Siemag AG) [4-5]. Принцип дії цієї системи показано рисунку 1.10.

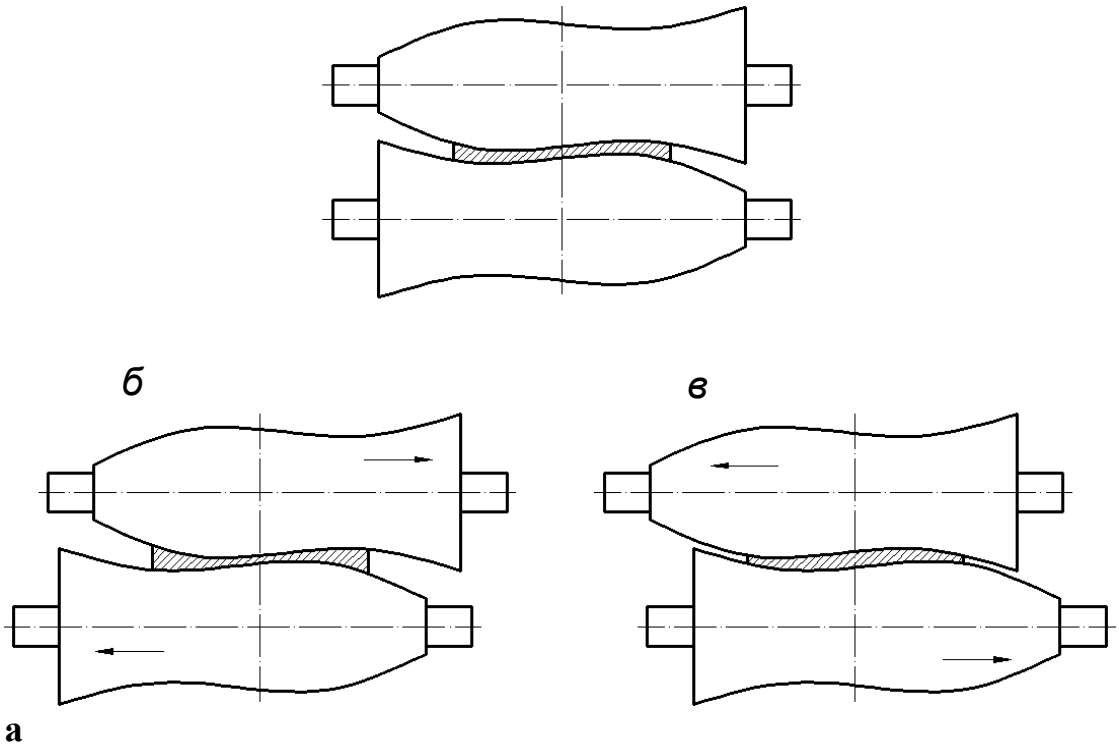


Рисунок 1.10 – Принцип дії системи CVC

При зустрічному осьовому переміщенні за схемою*б*(верхній валок – праворуч, нижній – ліворуч щодо вихідного положення рисунка 1.10,*а*) поперечний профіль штаби в осередку деформації без урахування дії силових, теплових факторів, а також зношування бочок стає увігнутим ($\delta h_{піп}<0$), тобто. коефіцієнт витяжки її в середині стає більшим, ніж у бічних кромок. При зустрічному осьовому переміщенні за схемою рис 1.10 *в* (верхній валок – ліворуч, нижній – праворуч) поперечний профіль штаби стає опуклим ($\delta h_{піп}> 0$), тобто. коефіцієнт витяжки її в середині стає меншим, ніж у бічних кромок.

Системи CVC представлені у двох варіантах виконання, що відрізняються профілем бочки опорних валків [3]. У першому варіанті профіль бочки опорних валків циліндричний, у другому варіанті, званому CVC плюс, бочки опорних валків виконують опукло-увігнутими. Зміна діаметра валка у системі CVC за довжиною бочки може становити 0,3 – 1,5 мм.

Для розрахунку та виконання профілю CVC найчастіше його виражають у вигляді полінома третього ступеня:

$$R(x) = R0 + a1x + a2x2 + a3x3, \qquad (1.3)$$

де x- поточна координата в осьовому напрямку валка. Початок осіхдля верхніх валків знаходиться на кромці бочки валка з боку обслуговування, а для нижніх – на кромці бочки валка з приводу;$R(x)$ – радіус у точціx;$R0$– радіус у положенніx=0;$a1$,$a2$,$a3$- Поліноміальні коефіцієнти. Поліном третього ступеня дозволяє точно описати радіус у точках.xiз кроком10мм. Подальше збільшення ступеня полінома, що описує профільування, недоцільно, оскільки поліном третього ступеня і так проходить через усі точки.

У ряді робіт [3-10] пропонуються рішення щодо використання поліномів 4-го або 5-го ступеня. У роботах [7-10] представлені результати досліджень з розробки опукло-увігнутого профілю опорного валка з використанням полінома 5-го ступеня для зниження нерівномірності міжвалкових тисків під час роботи з опукло-увігнутим профілем робочого валка, що описується функцією (1.3). У роботі [10] описаний алгоритм шліфування робочих валків у гарячому стані при різниці температур у середині та по краях бочки, що перевищує 25 °С. Для запобігання виникненню локальних відхилень при шліфуванні валків через те, що крива, що описує тепловий профіль валка, має парний ступінь, а профіль валка описаний непарною функцією (1.3) третього ступеня, запропоновано

підвищити ступінь опукло-увігнутого профілювання до четвертого. Це тим, що з суперпозиції кривих мають різну ступінь, результуюча крива має ступінь високу їх.

Вирішальне значення зниження витрати валків відводиться технології перешліфування, спрямованої відновлення їх працездатності і що регламентує глибину сошлифованного шару після кожної установки валка в робочу кліть.

У публікаціях, присвячених експлуатації валків станів гарячої прокатки [5-7], розглядаються питання регламентації величини знімання робітникашару при шліфуванні, спрямовані на зниження їх витратного коефіцієнта У роботі [10] описаний спосіб, що включає роботу валка в кліті, визначення величини зношування і 0,2-0,3 довжини дуги контакту опорного валка з суміжним робочим валком, в [6] пропонується підтримувати відношення твердостей робочого і опорного валків рівним 1,02–2,35 при погонному зусиллі їх взаємного притискання 0,4–1,7 т/мм, а перешліфування встановлюється в межах 0,3-0,6 мм і 2,5-7,5 мм відповідно. У [2] для виключення викрішок при максимальному використанні ресурсу робочого шару бочки, а також припалів і зниження твердості бочки валків внаслідок перегріву при шліфуванні обгрунтовані регламентована величина знімання поверхневого шару за кожен прохід не більше 0,05 мм і подача на валок питомою витратою не менше 0,5 · 10-3м^3/с. Також у роботі [11] проаналізовано низку заходів щодо підвищення стійкості опорних валків у частині примусового «відпочинку» після глибоких перешліфування, оптимізації маршрутів переміщення валків по клітинах безперервних станів. Додатково в [7] запропоновано знімання за перешліфування підтримувати рівним 0,6-1,8 мм, а після 2-4 завалок в кліть валок піддають профілактичному перешліфування з величиною знімання 2-4 мм. [10] запропонована експлуатація опорного валка, що включає чергування операцій циклічного навантаження опорного валка при роботі в кліті з термічною обробкою та визначенням числа циклів навантаження до

проведення термічної обробки, виходячи з максимального значення збільшення твердості опорного валка, виміряного після (0,1–0,3)·106циклів навантаження чи контактів опорного валка з робітником. При цьому термічну обробку ведуть шляхом нагрівання до температури 110–130^{o}С та витримки при цій температурі протягом 22–26 год або шляхом вилежування опорного валка при температурі 5–35^{o}С протягом 5-6 діб.

Для підвищення зносостійкості опорних валків у процесі експлуатації на станах холодної прокатки застосовувалася технологія поверхневого їх деформаційного зміцнення [2]. Деформаційне зміцнення дозволяло знизити схильність опорних валків безперервних станів до фарбування за рахунок створення поверхневому шарі зміцнюваного валка залишкових стискаючих напруг. У цьому зростає величина коефіцієнта запасу міцності матеріалу валка, знижується нерівномірність твердості бочки валка. Для реалізації технології поверхневого зміцнення не потрібне виготовлення спеціального обладнання: зміцнення здійснюється безпосередньо в кліті стану під час перевалок опорних валків. Теорія та технологія поверхневого зміцнення докладно розглянута у роботі [4].

Аналіз існуючих рішень щодо підготовки опорних валків до нової робочої кампанії показав, що жодне з них не враховує показників його роботи в прокатній кампанії, що розрізняються за клітями безперервного стану, що підвищує витратний коефіцієнт валків. Більшість способів не враховують кількість циклів навантаження валка за прокатну кампанію, що призводить до нераціонального витрачання робочого шару бочки опорних валків. Крім того, способи експлуатації опорних валків, що вимагають виконання періодичних операцій термообробки або додаткового зміцнення, призводять до зростання витрат виробництва та собівартості прокату. При цьому виконаний огляд публікацій показав, що для вирішення питання зниження витрати робочого шару бочки за шліфування та збереження високої стійкості опорних валків потрібна оцінка та прогнозування таких

найважливіших показників, як зношування та збільшення твердості бочки після прокатної кампанії.

Відповідно до термінології ГОСТ 27674-88 знос являє собою результат зношування, що розглядається як процес відділення матеріалу з поверхні твердого тіла при терті, що проявляється у поступовій зміні розмірів та (або) форми тіла та вираженого у встановлених одиницях. Характерними видами зносу опорного валка є:

- механічне зношування за рахунок тертя з робочим валком у міжвалковий контакт;
- абразивне зношування за рахунок залучення частинок окалини та продуктів руйнування валків у міжвалковий контакт;
- втомне зношування за рахунок навантаження при циклічно повторюваному впливі при контакті з робочим валком.

Зношування валків пов'язане не тільки з умовами процесу прокатки, як зазначалося в п. 1.3.1 і представлено в роботах [3-6], але і з неоднорідністю розподілу твердості матеріалу робочого шару валка, викликаної з її зниженням у процесі роботи, внаслідок структурних змін.

Варто зазначити, що опорні валяння останнього покоління характеризуються незначним зносом. Як приклад на рисунок 1.11 представлені результати вимірювання радіального зносу нижніх опорних валків першої та останньої клітей чистової групи НШСГП стану 2000 після прокатної кампанії об'ємом 270 тис. т. Основним критерієм при визначенні величини знімання з таких валків під час перешліфування. У цьому випадку твердість бочки після шліфування не повинна перевищувати 2–3 одиниць за шкалою Шора порівняно з вихідною твердістю бочки опорного валка, виміряного перед початком експлуатації на стані [2, 3]. Важливе питання зміцнення бочки опорних валків за кампанію під час прокатування різного обсягу металу з різною швидкістю та іншими показниками процесу прокатки досі не вирішено. Відсутні закономірності зміни твердості поверхні бочки

опорного валка, що визначають параметри перешліфування, можливість досягнення високого напрацювання валка та збільшення обсягу прокатної кампанії.

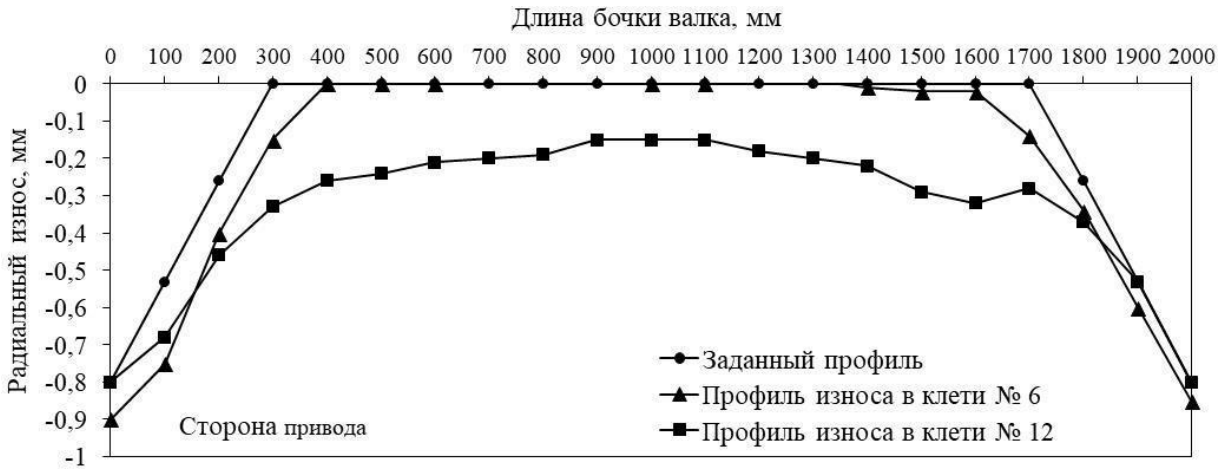


Рисунок 1.11 – Профілограми зносу опорних валків чистової групи табору 2000

Для підвищення ефективності технологічних процесів безперервної прокатки та розробки ресурсозберігаючих режимів виробництва широкого сталевого прокату в першу чергу потребує вирішення завдання щодо раціональної експлуатації листопрокатних валків. Важливе значення набуває можливість оцінки параметрів стану робочого шару опорних валків при різній інтенсивності їх роботи по клітях та втомному навантаженні за прокатну кампанію. Такий підхід до аналізу та оцінки до стану робочого шару бочки опорних валків раніше не застосовувався.

Огляд досліджень циклічного знакозмінного деформаційного впливу на широкий сталевий листовий прокат

Особливості циклічного знакозмінного деформаційного впливу на штабу

Поліпшена площинність конструкційного гарячекатаного листового прокату визначає його більш високий рівень технологічних і споживчих властивостей. Посилення вимог може зростати в 2-3 рази порівняно з відхиленнями від площинності, викладеними в стандартах (таблиця 1.1).

Водночас, гарячекатані листи, виготовлені без відхилень від площинності, при різанні за складним контуром на установках лазерного або плазмового різання втрачають площинність і викривляються через наявність у металі залишкових напруг, нерівномірно розподілених за обсягом (рисунок 1.12). Ризик виникнення таких деформацій під час та після розкрою може призводити до появи тріщин у деталях та пошкодження обладнання. Це вимагає встановлення взаємозв'язку впливів на листовий прокат при його виробництві та площинністю деталей, одержуваних при розкрої широких сталевих гарячекатаних листів лазером або плазмою.

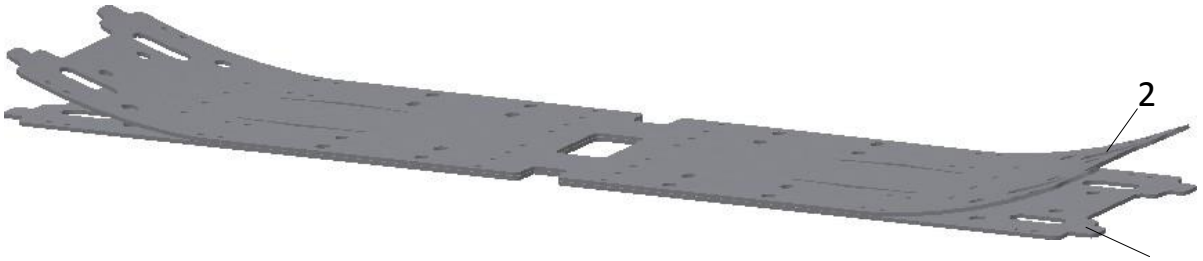


Рисунок 1.12 – Деталі, одержувані викройкою листів за складним контуром: 1 – без відхилення від площинності; 2 – з відхиленням від площинності внаслідок релаксації залишкової напруги

Завершальною стадією виробництва сталевого гарячекатаного прокату є його виправлення. Найпоширенішим і найширше застосовуваним способом є спосіб деформування штаби при проходженні її через два ряди верхніх і нижніх роликів, розташованих у шаховому порядку (рисунок 1.13).

Верхній ряд роликів має нахил за рахунок різних переміщень першогоy_2та останньогоy_8роликів. Формозміна штаби відбувається на основі її багаторазового вигину з цикловим впливом розтягують і стискаючих

зусиль на поверхневі волокна з напругами, що перевищують межу плинності матеріалу, при цьому внутрішня частина штаби або нейтральне волокно не піддається деформації.

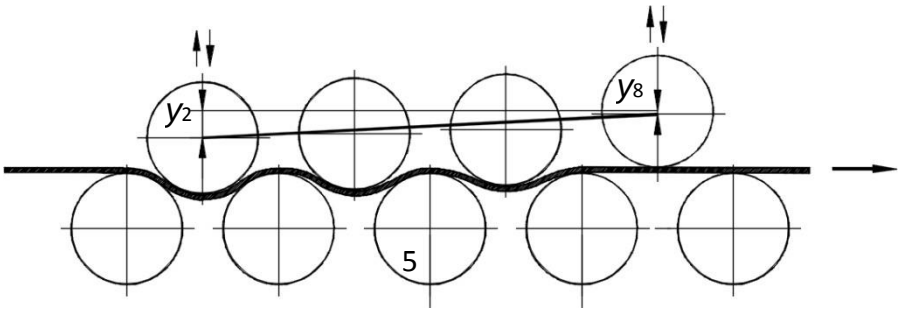


Рисунок 1.13 – Схема 9-роликової правильної машини

Процес пружнопластичного вигину дозволяє усувати різні відхилення від площинності. Для збільшення впливу на виправлення неплощинності правильна роликова машина (РПМ) оснащується опорними роликами.

Кожен робочий ролик 1 (рисунок 1.14) по довжині контактує з блоками опорних роликів 2. Нерухомі опорні ролики встановлені у верхній частині машини, а рухомі – у нижній. За наявності у вихідній смузі витягнутих волокон усередині (короб) необхідно розтягувати штабу на ділянках, де присутні волокна меншої довжини (тобто там, де дефект не спостерігається) – це схема «*а*» Вплив опорних роликів на робітник. І, навпаки, за наявності витягнутих волокон за кромками (хвиля) необхідно впливати опорними роликами за схемою «*б*», Витягуючи волокна середньої частини для досягнення ними довжини волокон дефектних ділянок. Такі технологічні впливу на штабу призводять до ефективного виправлення дефектів форми за рахунок вирівнювання витяжок металу по ширині, але нерівномірність деформації по товщині прокату при проходженні через ролики машини призводить до появи залишкових напруг.

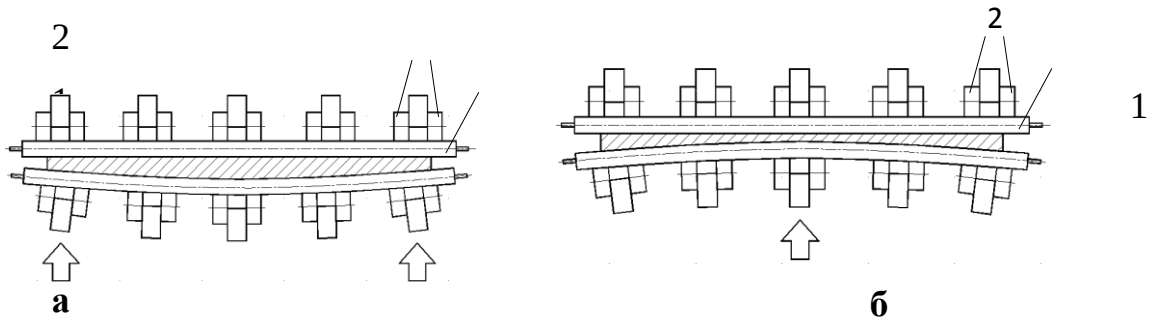


Рисунок 1.14 – Схеми впливу опорних роликів для усунення локальних дефектів:*а*- Короба; *б*– хвилі

Дослідження неоднорідності напружено-деформованого стану матеріалу є одним із важливих напрямків розвитку теорії обробки металів тиском. Виникнення залишкових напруг пов'язане з неоднорідними деформаціями в суміжних обсягах матеріалу тіла і істотно впливає на властивості готової металопродукції [1-4]. Є багато робіт російських і зарубіжних дослідників, присвячених формуванню залишкових напруг під час обробки металів у різний спосіб. У [3-4] приділяється увага питанням впливу залишкових напруг, що виникають у поверхнево зміцнених зразках та деталях, на опір втоми. Частина робіт присвячена дослідженню формування залишкової напруги при обробці різанням, шліфуванням, зварювання, наприклад [2]. У роботах [3-5], що належать до дослідження лазерного різання сталевих листів, розглядається питання про внесення напруг лазером, але не оцінюється вигин матеріалу під впливом внутрішніх напруг. І питання прогнозування залишкових напруг у процесі циклічного знакозмінного навантаження у взаємозв'язку з високотехнологічною обробкою листового металу залишається відкритим.

Практика роботи листопрокатних цехів показала, що, незважаючи на неврівноваженість по товщині і ширині поздовжньої залишкової напруги, листи, що пройшли правку через РПМ, не втрачають площинності після їх поперечного різання механічним способом - ножицями або пилками. Це тим, що перешкодою до втрати площинності є пружний опір листа, створюване поперечними нормальними напругами. На рисунку 1.15 показаний як приклад правий прикромочный ділянку поперечного перерізу листа, що має тенденцію до утворення хвилястості через неврівноваженість по товщині поздовжніх напруг, і схема розподілу по товщині на цій ділянці поперечних напруг. Зі схеми видно, що при відхиленні бічної кромки листа від контрольної плити в ньому з'являються поперечні нормальні напруги (знизу розтягують, зверху стискають). Ця напруга тим більше, чим більше крайка відхилилася від контрольної плити, тому вони й сприяють збереженню площинності листа.

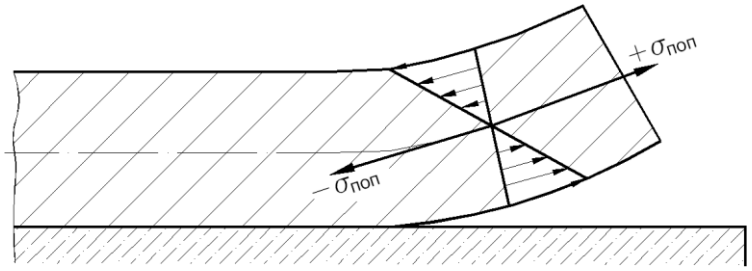


Рисунок 1.15 – Схема розподілу поперечних нормальних напруг у прикрімковій ділянці штаби, що має хвилястість,викликану нерівномірним розподілом за товщиною поздовжніх залишкових напруг

Коли ж лист піддається викрійці лазером або плазмою на задані розміри, через значне нагрівання зони різу, опір поперечних напруг зменшується і вирізаний виріб втрачає площинність. Для забезпечення площинності одержуваних деталей після обробки листів високотехнологічними методами виникає необхідність оцінювати якість правки не тільки через показники площинності штаби, але і враховувати ступінь поширення пластичної деформації по товщині і розподілу залишкових напруг.

Перед чистовою групою встановлений окалиноломач 19 роликового типу для збиття вторинної (повітряної) окалини. У чистовій групі встановлені чотиривалкові кліті (два приводні чавунні робочі валки з вибіленою поверхнею із твердістю більше 70 HSD і діаметром 800 мм і два сталевих опорних валка зі Ст. 9ХФ і довжиною бочки L - 2000 мм. [1]. Як відомо опорні валки великого діаметра з високим моментом опору вигину, знижують прогин робочих валків і, разом з тим, поперечну різну товщину штаб. Менший діаметр робочих валків забезпечує деформацію металу з порівняно невеликими лещатами й довжиною дуги контакту.

Режим деформації штаб у клітях чистової групи обумовлений кількістю клітей, товщиною й хімічним складом штаби повинний забезпечити[3]:

– потрібну температуру кінця прокатки;
– силу прокатки, меншу по величині, чим допустима сила;

– потужність прокатки, не перевищуючу потужність установлених приводів;

– поперечна різна товщина і площинність готової штаби повинна відповідати стандартам і технічним умовам (ТУ).

Регулювання міжвалкового зазору в процесі прокатки штаби виконують електромеханічними й гідравлічними натискними пристроями, а центрування штаби по осі стану здійснюють керованими бічними лінійками, а також системою проти згину.

Сучасні широкоштабові стани працюють із керуючими обчислювальними машинами (УВМ), які управляють не основними операціями технологічного процесу[3]:

– реєстрація й облік;
- спостереження за металом, регулювання й оптимізація;
- режим нагрівання;
- темп прокатки;
- температура кінця прокатки;
- температури змотування;
- профіль і форма штаби;
- ширина штаби;
- посадкою й видачею слябів з печі;
- міжвалковими зазорами в чорновій і чистовій групах;
- транспортними засобами, ножицями й моталками.

Для одержання після прокатки рівновісного зерна фериту, дрібнодисперсну структуру й необхідні механічні властивості металу штаби випускають із чистової групи із граничними значеннями температур. Так, для стану 2000 при прокатці штаб зі сталей 08кп, 08пс, 10пс температура кінця прокатки винна бути в межах 860 - 900°С, а обтиснення в останній кліті при v = 20 м/с становить 15 - 20%. Після виходу з останньої кліті штабу прохолоджується в душируючій установці на рольгангу 15. При цьому температура штаби при змотуванні на моталку становить 550 – 650 °С. Такий

режим прокатки й душирування забезпечує високий ступінь штампування металу. На рольгангу, що відводить, за чистовою групою клітей штаби прохолоджуються водою зі швидкістю 6 - 50 °С/сек. Кількість охолоджуючої води регулюється залежно від розмірів перетину готового розкату, його температури, марки сталі, швидкості розкату, що рухається, і може досягати 14, 0 тис. $м^3$/ч.

За станом установлені дві групи моталок по трьох у кожній;

- перша - для штаб товщиною 1,2 - 8 мм;
- друга - для штаб товщиною 4 - 16 мм.

1.3 Передумови створення ЛПА

У цей час тонкий і середній лист виготовляють головним чином на широкоштабових станах гарячої прокатки четвертого й п'ятого поколінь. Еволюція розвитку йшла по шляху збільшення числа клітей чистової групи, підвищення швидкості прокатки, автоматизації, удосконалювання способів і систем регулювання товщини й профілю гарячекатаного листа. Зростала маса рулонів. Велика увага приділялася збільшенню КПД, економії енергії й ресурсозбереженню при гарячій прокатці.

Однак сучасний стан технології ШСГП характеризується, як досягнувший рівня насичення у своєму розвитку. У зв'язку із цим слід привести короткий аналіз вимог, пропонованих до цих станів, а також результати тих розв'язків, які сприяли створенню й впровадженню ЛПА [6].

Основними причинами появи ЛПА стали погіршення якості й подорожчання видобутку сировинних ресурсів, підвищення цін на енергоресурси й жорсткість вимог екології [8].

Ливарно-прокатні агрегати (ЛПА), що здійснюють принцип безперервного виробництва металургійної продукції від розплаву сталі до готового прокату, почали створюватися в період промислового поширення технології безперервного лиття заготовок.

Історія створення ливарно-прокатних агрегатів (ЛПА), що здійснюють принцип безперервного виробництва металургійної продукції від розплаву сталі до готового прокату, бере початок з 1970-х років [8], тобто в період широкого промислового поширення технології безперервного лиття. У цей час у світі діє досить багато міні-заводів на базі ЛПА, що роблять сортовий довгомірний прокат (у тому числі на території колишнього СРСР - у Молдові й Білорусії). Уже в 70-ті роки вони зайняли провідні позиції в даній області завдяки своїй ефективності, гнучкості й високої продуктивності. Це дозволило їм працювати із прибутком навіть в умовах різкого зниження цін на сталь.

Перший вітчизняний дослідно-промисловий комплекс, що об'єднує плавильну піч і безперервний (планетарний) стан був введений в експлуатацію наприкінці 70-х років минулого сторіччя на заводі «Електросталь». Сортамент продукції, що випускається, – коло діаметром 8…15 мм із різних (у тому числі й легованих) марок сталі.

Однак найбільш значимою подією останніх десятиліть у чорній металургії є створення технології виробництва гарячекатаної сталевої штаби на основі тонкослябового виливка.

Доцільність створення такої технології диктувалося можливістю одержання плоскої заготовки з розмірами близькими до розмірів кінцевої продукції. У порівнянні із традиційним способом виробництва листового прокату ЛПА з тонкослябовою машиною безперервного лиття забезпечує [6]:

- зниження питомих капітальних витрат ;
- скорочення часу будівництва й освоєння;
- зниження собівартості прокату на ;
- зниження енергетичних і матеріальних ресурсів;
- поліпшення екологічних умов;
- скорочення часу виконання замовлень.

Інтенсивні роботи зі створення міні-заводів на базі тонкослябових ЛПА проводяться практично всіма провідними закордонними фірмами з початку

80-х років. З 1983 р. як у нашій країні, так і за кордоном розробляються нові технології розливання за назвою “розливання з розмірами, близькими до кінцевих”. Мотивом цієї діяльності є безсумнівне бажання знизити загальну величину обтиснення, необхідного для виробництва тонкої гарячекатаної штаби.

ЛПА практично одночасно почали розробляти п'ять фірм: «Шлеман-Зімаг» (ФРН), « Маннесманн-Демаг» (ФРН), «Даниєлі» (Італія), «ФЕСТ-Альпине» (Австрія) і ВНИИМЕТМАШ (СРСР) [6].

Причому вирішальний внесок у розробку ЛПМ для листового прокату внесли фірми « Шлеман-Зімаг» (ФРН) - SMS і «Ньюкор» (США). Перша - як розроблювач технології й устаткування тонкослябового ЛПМ, друга - як фірма, що вирішилась на промислове впровадження розробленого ЛПМ, що пройшов випробування тільки на пілотній установці.

Роботи над створенням ЛПМ на фірмі SMS були початі в 1980 р [6]. В 1985- 1986 р.р. проводили досвідчені розливання металу на знову створеної МНЛЗ у сляби перетином 5040х1200 мм і 50х1600 мм при швидкості розливання V= l,2-4 м/хв. Підписання контракту з фірмою «Ньюкор» на поставку ЛПМ (Csp-compact Strip Production - компактне виробництво штаби) відбулося в 1987 р. В 1988 - 1989 р.г. - будівництво установки CSP у м. Крофордсвіллі (США, штат Індіана) і в 1989 р. - її пуск. Перший ливарно-прокатний агрегат по виробництву гарячекатаної штаби з тонких слябів був зданий в експлуатацію влітку 1989 р. на заводі фірми Nucor steel у м. Кроуфордсвіилл, шт. Індіана, США. Агрегат виконаний на основі технології CSP (Compact Strip Production - компактне виробництво штаби), розробленою фірмою Schloemann-Siemag, Німеччина. В 1991 р. проектна потужність ЛПМ (830 тис.т/рік) була освоєна. В 1992 р. уведений у дію другий ЛПМ у м. Хікмені (США, штат Арканзас) також на заводі фірми «Ньюкор». Із січня 1992 р. на заводі фірми Arvedi у м. Кремона (Італія) експлуатується агрегат, виконаний за технологією ISP (Inline Strip Production - потоковий спосіб виробництва штаби) - розробка фірми Mannesmann Demag, Німеччина.

Основними перешкодами в сполученні технологічних процесів лиття й прокатки є:

– невідповідність виробничості машини безперервного лиття заготовок і безперервного стану;

– невідповідність максимальної швидкості лиття тонких слябів і необхідної швидкості прокатки (швидкість витягування заготовки 1…5 м/хв, а швидкість прокатки в першій кліті станів звичайної конструкції 30 м/хв);

– проблема збереження тепла штаби, що повільно рухається.

Поява ЛПА, що рентабельно працюють і при річним виробництві листової продукції менш 1 млн.т, дозволило почати будівництво й листопрокатних міні-заводів.

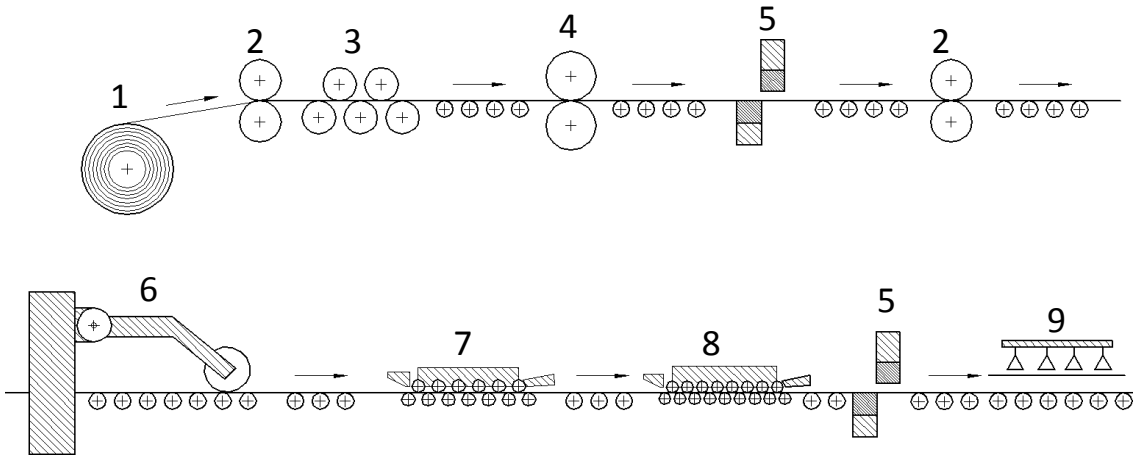
Часто коефіцієнт проникнення пластичної деформації називають коефіцієнтом пластифікації, а відсоток товщини, що досяг межі плинності, просто пластифікацією.

Різні машини для редагування можуть забезпечувати різний рівень пластифікації матеріалу. Розтяжні машини, що проробляють всю товщину сталевого листа, дають пластифікацію близьку до 100%. При використанні згинально-розтяжних машин пластична деформація проникає практично на всю товщину штаби та пластифікація становить понад 90%. Роликові правильні машини забезпечують у середньому пластифікацію у 60–70 % [8, 9], але за певних співвідношень конструктивних параметрів обладнання та тонкого налаштування машин можна досягати пластифікації більше 80-90%.

Правка прокату на роликових правильних машинах є найбільш поширеним способом завдяки високій продуктивності та ефективності виправлення дефектів, а також можливості варіативного розташування РПМ, як у лінії обробки прокату, так і у вигляді окремого агрегату по виправленню. РПМ для редагування штаб, як правило, встановлюються в лінії агрегатів поперечного різання. Приклад схеми агрегату поперечного різання (АПР) гарячекатаних штаб шириною від 900 мм до 1850 мм та товщиною від 1,5 мм до 12 мм представлено рисунку 1.17.

Машина попередньої редагування 3 використовується для усунення дефекту

рулонної кривизни та грубих дефектів площинності, вона включає зазвичай до п'яти роликів більшого (в 2-3 рази) діаметра в порівнянні з РПМ 7 і 8, встановленими далі в лінії для остаточного виправлення різного сортаменту або послідовного застосування за схемою: РПМ 7 – зменшує дефект, а РМП 8 – його виправляє.



1 – розмотувач рулонів; 2 – ролики, що тягнуть; 3 – машина для попередньої редагування; 4 – машина для сухого очищення штаби;5 – гільйотинні ножиці; 6 – кромкообрізні ножиці; 7 – тринадцятироликова машина; 8 – сімнадцятироликова машина;9 – листоукладач

Рисунок 1.17 – Схема агрегату поперечного різання

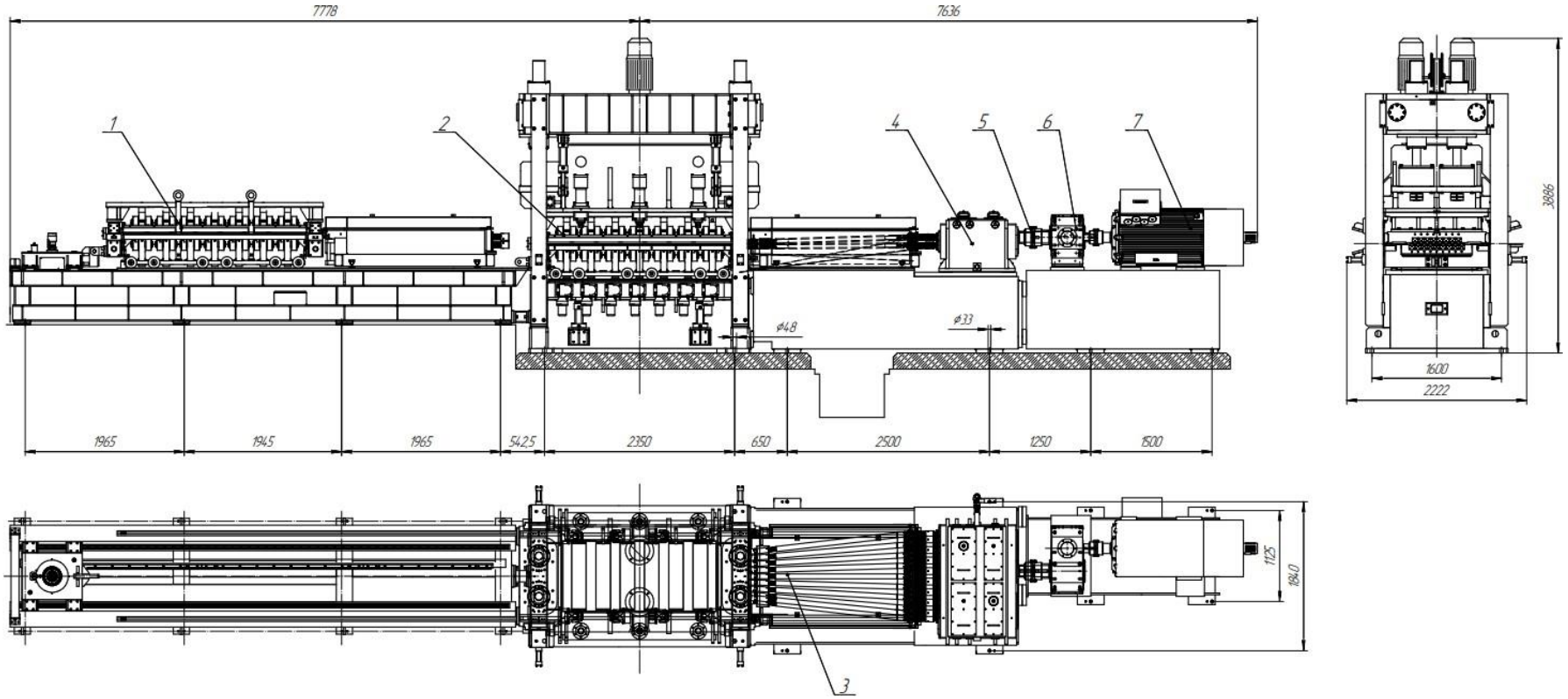
На рисунку 1.18 представлений загальний вигляд 17-роликової правильної машини, призначеної для виправлення штаб товщиною 1,5-6 мм. Швидкість виправлення становить 0,5-1 м/с. Діаметр роликів D=70 мм, крок роликівt=1,1D=77 мм.

У рух ролики наводяться від приводу, що складається з електродвигуна, редуктора, шестерінної кліті та 17-ти карданних валів. Нахил верхнього ряду роликів здійснюється шляхом вертикальних переміщень верхньої рухомої траверси вузла станини РПМ від чотирьох позиційно керованих гідроциліндрів.

Робочі та опорні ролики виготовляють із марок сталі 9Х, ШХ15, 12ХН2А і мають підвищену міцність, високу твердість та опірність зношування. Бочки роликів піддають поверхневій загартування з нагрівання струмами промислової або високої частоти до твердості *HRC* 55–65.

Ефективність знакозмінної деформаційної дії на штабу визначається різним співвідношенням основних конструктивних параметрів роликових правильних машин (*D*- Діаметра роликів,*t*– кроку між роликами одного ряду та*n*– числа роликів), а також налаштування роликів машини.

Питання вибору оптимальних співвідношень конструктивних параметрів РПМ досі недостатньо досліджені, незважаючи на велику кількість наукових наук робіт з розрахунку та дослідження процесу правки, наприклад, [4-6]. Так, зазначалося, що значення оптимальних параметрів РПМ вибирають на підставі практичних даних в залежності від товщини листів, підданих редагуванню на даній машині. Крок роликів запропоновано приймати рівним*t*=1,1*D*.



1 – змінна касета; 2 - 17-роликова правильна машина; 3 – карданні вали; 4 - шестеренна кліть; 5 – муфта; 6 – редуктор; 7 – електродвигун

Рисунок 1.18 – Загальний вигляд лінії РПМ

Ролики однієї з РПМ були перешліфовані з діаметра 80 мм до діаметра 74 мм, крок між роликами в машині залишився незмінним*t*=88 мм. Було зафіксовано, що вихідна штаба має дефекти неплощинності 30 мм на 1 м довжини, після виправлення на РПМ з роликами*D*=80 мм до їх перешліфування мала неплощинність 3–4 мм, а після перешліфування роликів до*D*=74 мм неплощинність штаби після редагування склала 10–15 мм на 1 метр довжини. Що ще раз підтверджує висновок, отриманий у роботі [4] на основі досвіду експлуатації РПМ – чим менше крок роликів, тим вища якість виправлення. Також зазначається, що діаметри роликів потрібно вибирати максимально можливими в межах кроку роликів і запропоновані формули визначення мінімального та максимального діаметрів роликів:

$$D_{\min} \text{-} h \text{-} \sqrt{\frac{E}{\text{-}T}} \text{-} 20h; \qquad (1.11)$$

$$D_{\max} \approx 40h, \qquad (1.12)$$

де E та $\sigma_т$– модуль пружності та межа плинності матеріалу штаби.

Від кількості роликів залежить якість правки, на основі досвіду експлуатації РПМ в роботі [85] для правки листів завтовшки*h*від4 мм пропонується застосовувати машини з числом роликів 9–11, для виправлення штаб*h* менше 4 мм - машини з 13-17 роликами, а в деяких випадках для особливо якісної редагування - машини з 19-29 роликами.

Швидкість виправлення вибирають залежно від продуктивності машини та товщини листів. Знову ж таки в роботі [5], на підставі практичних даних рекомендовано приймати наступні значення швидкості редагування: для тонких листів (0,5–4 мм) 6–0,5 м/с; для товстих листів (4-30 мм) при холодному виправленні 0,5-0,1 м/с. При цьому в [6] зазначається, що ефективність редагування знижується при зростанні швидкості і при постійних налаштуваннях роликів, а для збереження ефективності

редагування зі збільшенням швидкості процесу необхідно збільшувати перекриття роликів.

Усі перелічені вище рекомендації мають загальний характері і грунтуються на практичних даних без урахування детального моделювання процесу редагування на РПМ з різними конструктивними параметрами.

Тому, безумовно, важливим є продовження досліджень закономірностей пружнопластичного вигину на багатороликовій машині.

1.4 Аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів процесу редагування штаб на роликових правильних машинах

Моделювання процесів циклічного знакозмінного навантаження штаб та листів присвячені відомі роботи А.А. Корольова, А.І. Целікова, І.В. Недорезова, А.З. Слоніма, В.М. Шінкіна, Р.Л. Шаталова, А.Є. Шелеста, В.М. Салганіка, M. Grüber, R. Kaiser та інших авторів.

Відмінна риса теоретичних досліджень процесу багаторазового знакозмінного вигину в роликових правильних машинах, виконаних вітчизняними авторами, полягає в тому, що розробки засновані на гіпотезі плоских перерізів та припущенні одновісного напружено-деформованого стану.

Діяльність А.І. Целікова, В.В. Смирнова [1] наводяться рівняння з визначення деформацій волокон при пружнопластичному вигині ділянки штаби між двома опорами та залежність згинального моменту від сумарної кривизни штаби. А.А. Корольовим в [2] запропоновано методику розрахунку процесу правки та визначення зусиль на ролики при правці штаби на основі рівнянь моментів. О.З. Слонім, Л.А. Сонін в [3] узагальнили і систематизували матеріал за технологією виправлення листового прокату, навели різні емпіричні формули з визначення діаметра, кроку та числа роликів РПМ. Розглянуто методику розрахунку встановленого процесу

редагування, заснована на схемі редагування прокату для випадку, коли між двома роликами лист вигинається третім роликом. А.Є. Шелестом та іншими авторами в виконано моделювання вигину листів при правці за аналогією вигину балки на двох опорах, навантаженої посередині зосередженим навантаженням. Розглянуто схеми вигину листа на ролику при точковому контакті, частковому контакті, при повному торканні листом роликів листоправильної машини та визначені радіуси кривизни нейтральної лінії листа та відносна деформація листа при правці. У роботахВ.М. Шинкіна пропонується математичний метод визначення таких параметрів холодного виправлення сталевих штаб, як кривизна нейтральної лінії штаби при правці, залишкова кривизна листа після правки в залежності від радіусу робочих роликів, кроку між роликами правильної машини, величини обтискання листа верхніми роликами та товщини листа, а також модуля Юнга, межі плинності та модуля зміцнення металу. Модель холодного виправлення товстих аркушів, викладена у роботах В.М. Салганіка, Д.А. Зайцева [9, 10], базується на елементах моделей описаних у [4-7]. У роботах Є.А. Максимова, Р.Л. Шаталова представлена модель кінематичних параметрів осередку деформації при вигині листа під час редагування, заснована на опис фрагмента вигину листа з поворотом його торців на певний кут.

У всіх вище перерахованих дослідженнях не розкривається визначення протяжності зон пружної та пластичної деформацій у поперечному перерізі штаби. У ряді робіт не враховуються такі фактори, як тертя при виправленні, швидкість редагування, особливості поведінки матеріалу при знакозмінному деформування, відсутні порівняння розрахункових значень параметрів процесу редагування з виміряними експериментально, що впливає на достовірність розроблені математичні моделі.

Один із підходів до дослідження процесу редагування, запропонований зарубіжними авторами в [3-7], полягає у поділі вихідного листа на смужки шириною. Якщо аркуш із дефектом «короб», то крайові смужки мають меншу довжину порівняно з центральними (рисунок 1.19,*а*), і навпаки, якщо

лист має «хвилю» по краях, то крайові смужки мають велику довжину по порівняно з центральними (рисунок 1.19,*б*). Для кожної смужки визначаються точки контакту з роликами та обчислюється відхилення смужки під кожним роликом, а також довжина смужки з використанням апроксимації сплайнами, на на підставі чого розраховується пластична деформація кожної смужки після виправлення.

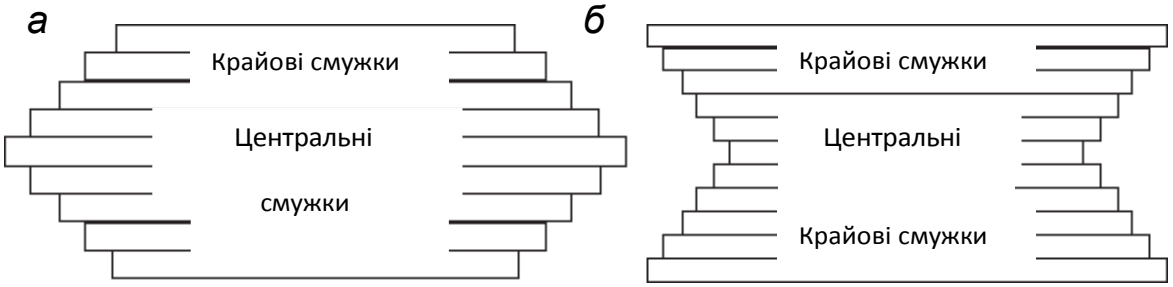


Рисунок 1.19 – Поділ листа на смужки шириною з дефектами : *а*- Короб; *б*– хвиля

Результати робіт авторів [3-6] ґрунтуються на виміряній топографії аркуша до і після редагування, при цьому не розглядаються питання розподілу напруг при редагуванні і після редагування, що впливають на подальше відхилення аркушів при подальшій їх обробці.

У решті досліджень зарубіжних авторів переважає підхід до моделювання процесу знакозмінного деформування, заснований на методі кінцевих елементів. У багатьох публікаціях розглядається процес редагування на основі експериментальних та чисельних досліджень циклічних випробувань пластини на вигин, порівняння різних моделей зміцнення матеріалу, що дозволяють враховувати вплив ефекту Баушингера при низькій циклічній деформації, а також питання управління кривизною листа після редагування шляхом переміщення останнього верхнього ролика.

У роботах [4-6] наводяться результати моделювання, лабораторних досліджень та розробки програмного продукту для автоматизованого проектування технологічних режимів налаштування багатороликових правильних машин для редагування листового прокату в холодному стані з

можливістю розрахунку перекриттів робочих роликів, а також визначення енергосилових параметрів процесу редагування та кривизни прока. Однак у роботах не досліджуються залежності розподілу внутрішніх напруг по товщині та ширині штаб від параметрів обладнання та технологічних параметрів процесу і не торкаються проблеми, пов'язані з оцінкою внутрішніх напруг.

Огляд досліджень циклічного знакозмінного деформаційного на широкий сталевий листовий прокат показав, що питання забезпечення їх високої площинності при подальшій високотехнологічній обробці лазером або плазмою за рахунок розробки технологічних режимів обробки сталевої штаби при її виробництві на металургійних підприємствах раніше не вирішувалося. У зв'язку з цим, реалізація завдання комплексного дослідження та розвитку теорії пружнопластичного вигину при правці гарячекатаних штаб на багатороликовій машині для досягнення істотно нових можливостей впливу на листовий прокат із забезпеченням мінімальних відхилень при розкрої лазером або плазмою має велике наукове та практичне значення.

1.5 Недоліки й переваги розглянутих станів

Ще на початку 90-х років по відношенню до перспектив виробництва гарячекатаної листової продукції були різні, найчастіше суперечливі оцінки. Одна з точок зору полягала в тому, що значимість традиційних станів гарячої прокатки штаби зменшується, і вони повинні бути збережені й призначені тільки для прокатки важкодеформуючих сталей. Масове виробництво більшості марок сталі повинне здійснюватися на сполучених тонкослябових ливарно-прокатних агрегатах.

Як показав представлений аналіз стану сучасного листопрокатного виробництва, будівництво широкоштабових станів, що реалізують

традиційну технологію гарячої прокатки, і реконструкція діючих агрегатів не дозволяють досягти значного поліпшення якості продукції й знизити витрати енергоресурсів і матеріалів на тонну придатного (ефективність традиційного прокатного виробництва практично досягла стадії насичення). Це є найважливішим стимулом для розвитку тонкослябових ЛПА.

Удосконалення технології лиття в першу чергу було спрямовано на зменшення товщини заготівлі з метою виключення з виробничого ланцюжка найбільш енергоємних процесів - прокатки й нагрівання заготівлі. Більше тісне з'єднання двох етапів процесу вдалося реалізувати саме в сполучених тонко слябінгових ливарно-прокатних агрегатах, що дозволило одержати наступні економічні переваги:

- знизити капіталовкладення;
- скоротити час проходження металу в циклі виробництва;
- збільшити оборотність капіталу й знизити складські витрати;
- забезпечити економічне виробництво партій малого розміру;
- знизити витрати енергії.

У цей час якість гарячекатаної штаби з агрегатів для виливки тонких слябів уже не відрізняється від якості штаби, одержуваної традиційним способом. Завдяки оптимальним умовам завдання тонкого слябу в прокатну групу сполученого ливарно-прокатного агрегату (рівномірний розподіл температури по всій довжині й ширині тонкого слябу) досягається навіть трохи краща, чим при традиційній технології, точність по товщині, профілю й ширині штаби.

Слябінгова технологія виробництва штаб має ряд недоліків, у числі яких:

- невелика швидкість лиття заготівлі; необхідність установки великої кількості клітей для пластичної деформації металу в кінцеву штабу;
- значні втрати електроенергії на здійснення пластичної деформації;

– порівняно більші втрати металу у вторинну окалину на «протязі всього ланцюга перетворення сляба в штабу.

Прагнення до усунення цих недоліків привело до створення ливарно-прокатних комплексів (ЛПК), що роблять штабу й з слябів (товщиною 25 - 30 мм).

Успіхи в створенні сучасних МНЛЗ із високим рівнем автоматизації й керування дозволили з урахуванням досягнень у виплавці чистої сталі, попередження її забрудненні при безперервному розливанні й ушкодження металу при кристалізації, направляти литі заготівлі без огляду в безперервний стан (прямий прокат), зберігаючи тепло лиття [7].

Можливість виливки тонких слябів, зниження загальної гарячої деформації й одержання готової гарячекатаної листової сталі в єдиній технологічній лінії означало появу нової стадії розвитку металургії - ЛПК.

При переході до сучасних МНЛЗ криволінійного (радіального) типу значно ускладнилася технологія розливання й конструкція машин. При створенні ЛПК вирішували основні проблеми: безпеку безперервного розливання, висока зовнішня й внутрішня якість штаб, узгодження роботи встаткування в умовах низької швидкості лиття й високої швидкості прокатки.

Тонкослябовий ЛПА на даному етапі розвитку металургії - агрегат для виробництва гарячекатаних штаб загального призначення при обсязі виробництва до 800 тис. т у рік. Їхнє створення визнається недоцільним лише в наступних випадках [6]:

- при відсутності стовідсоткової гарантії якості слябів, що виливаються;
- при необхідній продуктивності понад 1,5 млн т у рік;
- при виробництві гарячекатаного листа з легованих, електротехнічних марок сталі й підкату для цехів жерсті.

За таких умов краще будівництво традиційних станів з товстослябовими МНЛЗ.

Призначення технологічної лінії тонкослябових ЛПА, реалізованих на металургійних міні-заводах - виготовлення гарячекатаної штаби максимально широкого сортаменту, здатної конкурувати по якості із продукцією металургійних комбінатів при менших витратах на виробництво.

У порівнянні із традиційними комплексами МНЛЗ-ШСГП ливарно-прокатні агрегати мають наступні головні переваги:

- зниження питомих капітальних витрат до 81 % при використанні однострумкової й до 70 % при двухструмковій тонкослябовій МНЛЗ;
- скорочення часу будівництва й освоєння проектної потужності;
- зниження витрат на оплату праці і виробничих витрат на тонну готової продукції;
- компактність, тобто відносно невелика довжина технологічної лінії й площа, займана ЛПА;
- максимальна наближеність до споживачів виробленої продукції.

Лінія лиття й прокатки тонких слябів має високу гнучкість із погляду виробничої потужності й дозволяє одержувати продукцію таких розмірів і з таких марок сталі, прокатка яких не може бути забезпечена на звичайних листових станах. У результаті забезпечується можливість організації ефективного виробництва щодо малих партій продукції для умов регіонального ринку шляхом вибору найбільш підходящої для конкретних умов будівництва схеми міні-заводу або реконструкції діючого підприємства. Так, наприклад, розробка й впровадження технології CSP відкрило нові можливості у виробництві гарячекатаних штаб у діапазоні товщин менше 2 мм, одержуваних усього лише кілька років тому вийнятково в процесі холодної прокатки.

Уже перший досвід експлуатації описаного в пункті 1.1.3. ЛПМ дозволив виявити його недоліки [8].

Недоліки однострумкового ЛПМ фірми SMS:

- велика довжина прохідної печі;
- мала ємність буфера;

- можливий зсув слябу з осі руху в печі;
- неможливість редукування слябів у лінії прокатки;
- недостатнє завантаження прокатного стану (приблизно на 60%);
- неможливість видалення з технологічної лінії слябів з дефектами й використання холодного посаду їх після ремонтів.

Із представлених матеріалів видно, що в ЛПМ фірми Danieli багато в чому використані елементи ЛПМ фірми SMS. У зв'язку із цим збереглися й зазначені вище недоліки, але деякі з них були враховані..

При розробці й конструюванні нової тонкослябової МНЛЗ фірма Danieli сформулювала в такий спосіб:

– висока якість поверхні й структури матеріалу слябів;

– висока гнучкість відносно сталей, що розливаються, і експлуатаційної швидкості лиття, тобто широкий діапазон можливостей без якого-небудь погіршення якості слябів і без збільшення ризику прориву рідкого металу;

– оптимізовані умови експлуатації;

– одержання готового продукту з високими механічними властивостями.

Ці вимоги були виконані завдяки проведенню наступних конструктивних заходів [8].

1. Розроблена нова концепція кристалізатора для швидкого лиття. Застосований так званий H2-кристалізатор (мідна пластина з наповнюваним каналом великого обсягу, спрофільованим таким чином, щоб запобігти появі внутрішніх напружень, і комплект формуючих валків, розташованих безпосередньо за кристалізатором).

2. Оптимізоване підведення рідкої сталі від проміжного ковша до кристалізатора шляхом спеціального виконання погружного сталерозливного стакану й штанги стопора.

3. Застосоване "м'яке" обтиснення злитка із ще рідкою серцевиною з використанням системи визначення положення вершини рідкої серцевини заготовки.

4. Застосований захист від проривів рідкого металу.

5. Використана спеціальна система видалення окалини.

6. Виконане оптимізоване регулювання рівня рідкого металу в кристалізаторі.

7. Оптимізований режим хитання кристалізатора.

8. Застосовані охолоджувані ролики по всій довжині литого-безперервно-литого зливка. Виконане математично кероване охолоджування слябу водоповітряним туманом.

Реалізація цих заходів дозволила фірмі Danieli створити машину безперервного лиття тонких слябів, що характеризується високою якістю продукції й продуктивністю.

2 ДОСЛІДНИЦЬКО – РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Розрахунки кінематичних і енергосилових параметрів для одержання штаби з розмірами 1,0×1200 сталь 08пс

Вихідний сляб Н = 18 мм.

Розрахунки припустимих кутів захвата.

Допустимо, що мінімально можлива температура при ході в чистовій групі клітей буде рівна t=1000 ºС.

Становимо таблицю попередніх обтиснень

В 1й кліті ε=50%

$$\Delta h_5 = \varepsilon \quad h_{пр} = 0{,}5 \quad 18 = 9 мм$$

В 6й кліті ε=9%

$$\Delta h_6 = h_к \quad \frac{1}{1 \quad \varepsilon} \quad 1 \quad = 1 \quad \frac{1}{1 \quad 0.09} \quad 1 \quad = 0.09 мм$$

$$\Delta h\Sigma = h_{пр} \quad h_к \quad \Delta h_5 \quad \Delta h_{10} = 18 \quad 1 \quad 9 \quad 0.25 = 7{,}75 мм$$

Тоді $\Delta hi / \Delta h\Sigma = 0.085 + 0.089(9 - ni)^{1.3}$

$$\Delta h_2 / \Delta h\Sigma = 0.085 + 0.089(9-6)^{1.3} = 0.456$$

$$\Delta h3 / \Delta h\Sigma = 0.085 + 0.089(9-7)^{1.3} = 0.304$$

$$\Delta h_4 / \Delta h\Sigma = 0.085 + 0.089(9-8)^{1.3} = 0.174$$

$$\Delta h_5 / \Delta h\Sigma = 0.085 + 0.089(9-9)^{1.3} = 0.085$$

$$\Delta h_2 = 7{,}75 \quad 0.456 = 3{,}53 мм$$

$$\Delta h_3 = 7{,}75 \quad 0.304 = 2{,}35 мм$$

$$\Delta h_4 = 7{,}75 \quad 0.174 = 1{,}34 мм$$

$$\Delta h_5 = 7{,}75 \quad 0.085 = 0.65 мм$$

$$h_1 = 18 \quad 9 = 9 мм$$

$$h_2 = 9 \quad 3{,}536 = 5{,}464 мм$$

$$h_3 = 5{,}464 \quad 2{,}357 = 3{,}107 мм$$

$$h_4 = 3{,}107 \quad 1{,}349 = 1{,}758 мм$$

$$h_5 = 1{,}758 \quad 0{,}659 = 1{,}099 мм$$

Розрахунки швидкостей.

У чистовій групі йде безперервна прокатка v_6=20м/с.

$$vi = v_6 h_6 \ / \ hi$$

$$v_5 = 20 \quad 1 / 1{,}09 = 18{,}19 м / с$$

$$v_4 = 18{,}19 \quad 1{,}099 / 1{,}758 = 11{,}37 м / с$$

$$v_3 = 11{,}37 \quad 1{,}75 / 3{,}1 = 6{,}43 м / с$$

$$v_2 = 20 / 5{,}46 = 3{,}66 м / с$$

$$v_5 = 20 / 9 = 2{,}22 м / с$$

$$h_5 = 18 \quad 9 = 9 мм$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{H} = \frac{9}{18} = 0.5$$

$$\varepsilon_2 = \frac{3.536}{9} = 0.39$$

$$\varepsilon_3 = \frac{2.35}{5.46} = 0.43$$

$$\varepsilon_4 = \frac{1.34}{3.10} = 0.43$$

$$\varepsilon_5 = \frac{0.65}{1.75} = 0.37$$

$$\varepsilon_6 = \frac{0.09}{1.099} = 0.09$$

$$t_н = 1000 \ ºC$$

Температуру в клітях чистової групи знаходимо по формулі [2]:

$$ti = tnn \quad \frac{\frac{tnn \quad t\kappa}{hnn}}{\frac{hnn}{h\kappa} \quad 1} \quad \frac{hnn}{hi} \quad 1$$

$$tk = 682 + 0.35ti\hat{e} \; - 241 \cdot 10^3 / h_{10} \cdot v_{10} = 682 + 0.35 \cdot 1000 - 241 \cdot 10^3 / 1 \cdot 1200 = 831°C$$

$$t_1 = 1000 \quad \frac{\frac{1000 \quad 831}{18}}{\frac{18}{1} \quad 1} \quad \frac{18}{9} \quad 1 \quad = 990°C$$

$$t_2 = 1000 \quad \frac{\frac{1000 \quad 831}{18}}{\frac{18}{1} \quad 1} \quad \frac{18}{5.46} \quad 1 \quad = 977°C$$

$$t_3 = 1000 \quad \frac{\frac{1000 \quad 831}{18}}{\frac{18}{1} \quad 1} \quad \frac{18}{3.107} \quad 1 \quad = 952°C$$

$$t_4 = 1000 \quad \frac{\frac{1000 \quad 831}{18}}{\frac{18}{1} \quad 1} \quad \frac{18}{1.758} \quad 1 \quad = 908°C$$

$$t_5 = 1000 \quad \frac{\frac{1000 \quad 831}{18}}{\frac{18}{1} \quad 1} \quad \frac{18}{1.099} \quad 1 \quad = 847°C$$

$$t_6 = 831°C$$

Таблиця – 2.1 Режим деформації штаби 1×1200 сталь 08пс

№ кліті	H мм	h мм	Δh мм	ε, %	V м/с	tºc
1	18	9	9	50	2,22	990
2	9	5,46	3,53	39,3	3,66	977
3	5,46	3,10	2,35	43,1	6,43	952
4	3,10	1,75	1,34	43,4	11,37	908
5	1,75	1,09	0,65	37,5	18,19	847
6	1,09	1	0,09	9	20	831

Розрахунки енергосилових параметрів прокатки.

1я кліть Δh = 9 мм

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{632{,}5 / 2 \quad 9} = 53{,}35мм$$

$$hcc = \frac{H + h}{2} = \frac{18 + 9}{2} = 13{,}5мм$$

$$l_d / h\tilde{n}\eth = 53{,}35/13{,}5 = 3{,}952$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta h}{\acute{I}} = \frac{9}{18} = 0.5$$

$$u = \frac{2222 \quad 0.5}{53{,}35} = 20{,}82c^{\ 1}$$

Границя текучості металу Ст.08пс [9]:

Хімічний склад	%
Кремній (Si)	0,05-0,17
Марганець (Mn)	0,35-0,65
Мідь (Cu)	0,25
Арсенум (As)	0,08
Нікель (Ni)	0,25
Сірка (S)	0,04
Вуглець (З)	0,05-0,11
Фосфор (P)	0,035
Хром (Cr)	0,10

Вуглецевий коефіцієнт

N = C+Si+Mn+Cr+Ni+Cu+Al=0,11+0,5+0,25+0,25+0,08+0,1 =1,29%

Базова границя текучості:

Якщо N≤5:

$$\sigma_{T\delta} = 80 + 25[1 \quad ((5 \quad N) / 4.5)^{1.8}] = 80 + 25[1 \quad ((5 \quad 1{,}29) / 4.5)^{1.8}] = 87{,}34H / мм^2$$

$$kt = 1.66 \quad 1.1 \quad \frac{990{,}07}{400} \quad 2^{\ 0.7} = 1{,}01$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43\left(1 - 6.3\left(0.5 - \varepsilon\right)^2\right) = 1 + 0.43\left(1 + 6.3\left(0.5 - 0.5\right)^2\right) = 1.43$$

$$ku = 1{,}03 + 0{,}1 \cdot \left(\left(\ln u\right) - 2.3\right)^{1.5} = 1.03 + 0.1 \cdot \left(\left(\ln 20.82\right) - 2.3\right)^{1.5} = 1.093$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \quad kt \quad k\varepsilon \quad ku = 87.34 \quad 1.01 \quad 1.43 \quad 1.093 = 137.88H / мм^2$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{t^\circ}{400} - 2\right)^2 = 0.27 - 0.1\left(\frac{990}{400} - 2\right)^2 = 0.25$$

$$kv = 0.76 + 0{,}82(1 - 0{,}1 \cdot \nu)^2 = 0{,}76 + 0{,}82(1 - 0{,}1 \cdot 2{,}22)^2 = 1{,}25$$

$$k\varepsilon = 1 + 0{,}43\left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}5)^2\right) = 1{,}43$$

$$ke = 0.85 + 0.5 \cdot \varepsilon = 0.85 + 0.5 \cdot 0.5 = 1.1$$

kb = 0.75

$$kT = 1 + 0.43(1 - HSD/65)^2 = 1 + 0.43(1 - 70/65)^2 = 1.003$$

$$f = f_0 \cdot k_t \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_m \cdot k_e = 0.25 \cdot 1.256 \cdot 1.43 \cdot 1.1 \cdot 0.75 \cdot 1.003 = 0.37$$

$$fi = f(0{,}92 + 1{,}27\varepsilon) = 0{,}37(0{,}92 + 1{,}27 \cdot 0{,}5) = 0.58$$

$$\delta_{ñð} = 1.15\sigma_{Ò}(1 + 0{,}48\, fi \cdot l_d \cdot / h ñð) = 1{,}15 \cdot 137.88(1 + 0{,}48 \cdot 0{,}58 \cdot 3.95) = 226.5 Í \ / ìì^2$$

Зусилля прокатки в 1й кліті

$$P = p_{cp} \quad l_d \quad B = 226.5 \quad 0.05335 \quad 1.2 = 14.5 MH$$

$$\psi = 0{,}51 \quad \frac{l_d}{hcc}^{0.092}$$

$$\psi = 0{,}51(3.95)^{-0{,}092} = 0{,}449$$

$$M = \psi \quad l_d \quad P = 0.449 \quad 0.05335 \quad 14.5 = 0.35 MH$$

$$Nдд = 2 \quad 960 \quad M_{np} \quad v / R = 2 \quad 960 \quad 0.35 / 0.31625 = 4721.53 кВт$$

2я кліть Δh = 3,53 мм

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{316.25 \quad 3.53} = 33.44 мм$$

$$hcc = \frac{H + h}{2} = \frac{9 + 5.46}{2} = 7.23 мм$$

$$l_d / h ñð = 33.44 / 7.23 = 4.62$$

$$u = \frac{\nu \cdot \varepsilon}{l_d} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta h}{Í} = \frac{3.53}{9} = 0.39$$

$$u = \frac{3660 \quad 0.39}{33.44} = 43.01 c^{1}$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{t^\circ}{400} - 2\right)^2 = 0.27 - 0.1\left(\frac{977.22}{400} - 2\right)^2 = 0.25$$

$$kv = 0.76 + 0{,}82(1 - 0{,}1 \cdot \nu)^2 = 0{,}76 + 0{,}82(1 - 0{,}1 \cdot 3.66)^2 = 1{,}08$$

$$k\varepsilon = 1 + 0{,}43\left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}39)^2\right) = 1{,}39$$

$$ke = 0.85 + 0.5 \cdot \varepsilon = 0.85 + 0.5 \cdot 0.39 = 1.046$$

$$\text{kb} = 0.75$$

$$kT = 1 + 0.43(1 - HSD/65)^2 = 1 + 0.43(1 - 70/65)^2 = 1.003$$

$$f = f_0 \cdot k_t \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_m \cdot k_e = 0.25 \cdot 1.003 \cdot 1.08 \cdot 0.75 \cdot 1.046 = 0.21$$

$$fi = f(0{,}92 + 1{,}27\varepsilon) = 0{,}21(0{,}92 + 1{,}27 \cdot 0{,}393) = 0{,}3$$

$$kt = 1.66 - 1.1\left(\frac{977.22}{400} - 2\right)^{0.7} = 1.04$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43\left(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2\right) = 1 + 0.43\left(1 + 6.3(0.5 - 0.39)^2\right) = 1.39$$

$$ku = 1{,}03 + 0{,}1 \cdot \left((\ln u) - 2.3\right)^{1.5} = 1.03 + 0.1 \cdot \left((\ln 43.01) - 2.3\right)^{1.5} = 1.2$$

$$\sigma_{\grave{O}} = \sigma_{\grave{O}\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 87.34 \cdot 1.04 \cdot 1.399 \cdot 1.207 = 153.38 \acute{I} \ / \grave{i}\grave{i}^{\ 2}$$

$$p_{cp} = 1.15\sigma_T\left(1 + 0{,}48\ fn\quad l_d\quad / hcc\right) = 1{,}15\quad 153.38(1 + 0{,}48\quad 0{,}3\quad 4.62) = 293.84 H / мм^2$$

Зусилля прокатки в 2й кліті

$$P = p_{cp}\quad l_d\quad B = 293.84\quad 0.03344\quad 1.2 = 11.79 МН$$

$$\psi = 0{,}51(4.624)^{-0{,}092} = 0{,}44$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0.44 \cdot 0.03344 \cdot 11.79 = 0.17 \grave{I}\acute{I}$$

$$N\partial\partial = 2\quad 960\quad M_{np}\quad v / R = 2\quad 960\quad 0.17\quad 3.66 / 0.31625 = 3733.2 кВт$$

3я кліть Δh = 2,35 мм

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{316{,}25\quad 2{,}35} = 27{,}30 мм$$

$$hcc = \frac{H + h}{2} = + \frac{5{,}464 + 3{,}107}{2} = 4{,}28 мм$$

$$l_d / hcc = 27{,}3 / 4{,}28 = 6{,}37$$

$$u = \frac{\nu \cdot \varepsilon}{l_d} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta h}{\acute{I}} = \frac{2{,}35}{5{,}46} = 0.43$$

$$u = \frac{6437 \quad 0.431}{27,30} = 101,61c^{\ 1}$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{t^{\circ}}{400} - 2\right)^2 = 0.27 - 0.1\left(\frac{952,4}{400} - 2\right)^2 = 0.26$$

$$kv = 0.76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot \nu)^2 = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 6,437)^2 = 1,052$$

$$k\varepsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - 0,43)^2) = 1,41$$

$$ke = 0.85 + 0.5 \cdot \varepsilon = 0.85 + 0.5 \cdot 0.43 = 1.06$$

$$\text{kb} = 0.75$$

$$kT = 1 + 0.43(1 - HSD/65)^2 = 1 + 0.43(1 - 70/65)^2 = 1.003$$

$$f = f_0 \cdot k_t \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_m \cdot k_e = 0.26 \cdot 1,003 \cdot 1.052 \cdot 0.75 \cdot 1.0655 = 0.22$$

$$fi = f(0,92 + 1,27\varepsilon) = 0,22(0,92 + 1,27 \cdot 0,431) = 0,32$$

$$kt = 1.66 - 1.1\left(\frac{952,4}{400} - 2\right)^{0.7} = 1,1$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0.43(1 + 6.3(0.5 - 0.431)^2) = 1.41$$

$$ku = 1,03 + 0,1 \cdot ((\ln u) - 2.3)^{1.5} = 1.03 + 0.1 \cdot ((\ln 101,61) - 2.3)^{1.5} = 1.38$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \quad kt \quad k\varepsilon \quad ku = 87,33 \quad 1,1 \quad 1.41 \quad 1,38 = 188,41H / мм^2$$

$$p_{cp} = 1.15\sigma_T(1 + 0,48\ fn \quad l_d \quad / hcc) = 1,15 \quad 188,41(1 + 0,48 \quad 0,32 \quad 6,37) = 428,7H / мм^2$$

Зусилля прокатки в 3й кліті

$$P = p_{cp} \quad l_d \quad B = 428,7 \quad 0,02730 \quad 1.2 = 14,05MH$$

$$\psi = 0,51(6,371)^{-0,092} = 0,42$$

$$M = \psi \quad l_d \quad P = 0.42 \quad 0.02730 \quad 14,05 = 0.16MH$$

$$Nдв = 2 \quad 960 \quad M_{пр} \quad v / R = 2 \quad 960 \quad 0,16 \quad 6,43 / 0.31625 = 6252,79кВт$$

4а кліть Δh = 1,34 мм

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{316,25 \quad 1,34} = 20,65мм$$

$$hcc = \frac{H + h}{2} = \frac{3,107 + 1,758}{2} = 2,43мм$$

$$l_d / h\tilde{n}\eth = 20{,}65 / 2{,}43 = 8{,}49$$

$$u = \frac{\nu \cdot \varepsilon}{l_d} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta h}{\acute{I}} = \frac{1{,}34}{3{,}1} = 0.43$$

$$u = \frac{11377 \quad 0.43}{20{,}65} = 239{,}05c^{\ 1}$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{t^{\circ}}{400} - 2\right)^2 = 0.27 - 0.1\left(\frac{908}{400} - 2\right)^2 = 0.26$$

$$k\nu = 0.76$$

$$k\varepsilon = 1 + 0{,}43\left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}43)^2\right) = 1{,}41$$

$$ke = 0.85 + 0.5 \cdot \varepsilon = 0.85 + 0.5 \cdot 0.43 = 1.06$$

$$\text{kb} = 0.75$$

$$kT = 1 + 0.43(1 - HSD/65)^2 = 1 + 0.43(1 - 70/65)^2 = 1.003$$

$$f = f_0 \cdot k_t \cdot k_\nu \cdot k_B \cdot k_m \cdot k_e = 0.26 \cdot 1.003 \cdot 0{,}76 \cdot 0.75 \cdot 1.065 = 0.16$$

$$fi = f(0{,}92 + 1{,}27\varepsilon) = 0{,}16(0{,}92 + 1{,}27 \cdot 0{,}43) = 0{,}24$$

$$kt = 1.66 - 1.1\left(\frac{908{,}25}{400} - 2\right)^{0.7} = 1{,}22$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43\left(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2\right) = 1 + 0.43\left(1 + 6.3(0.5 - 0.43)^2\right) = 1{,}41$$

$$ku = 1{,}03 + 0{,}1(\ln u - 2.3)^{1{,}5} = 1.03 + 0.1(\ln 239{,}05 - 2{,}3)^{1{,}5} = 1.59$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \quad kt \quad k\varepsilon \quad ku = 87{,}33 \quad 1.22 \quad 1{,}41 \quad 1.59 = 241{,}14 H / мм^2$$

$$p_{cp} = 1.15\sigma_T(1 + 0{,}48\, fn \quad l_d \quad / hcc) = 1{,}15 \quad 241{,}14(1 + 0{,}48 \quad 0{,}24 \quad 8{,}49) = 548{,}57 H / мм^2$$

Зусилля прокатки в 4й кліті

$$P = p_{cp} \quad l_d \quad B = 548{,}57 \quad 0.0206 \quad 1.2 = 13{,}59 MH$$

$$\psi = 0{,}51(8{,}49)^{-0{,}092} = 0{,}41$$

$$M = \psi \quad l_d \quad P = 0.41 \quad 0.02065 \quad 13{,}59 = 0.12 MH$$

$$N\partial\partial = 2 \quad 960 \quad M_{np} \quad \nu / R = 2 \quad 960 \quad 0{,}12 \quad 11{,}37 / 0.31625 = 8288{,}57 кВт$$

5а кліть Δh = 0,659 мм

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{316{,}25 \quad 0{,}659} = 14{,}43мм$$

$$hcc = \frac{H + h}{2} = \frac{1{,}758 + 1{,}099}{2} = 1{,}42мм$$

$$l_d / h\tilde{n}\eth = 14{,}43/1{,}42 = 10{,}1$$

$$u = \frac{\nu \cdot \varepsilon}{l_d} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta h}{\acute{I}} = \frac{0{,}65}{1{,}75} = 0.37$$

$$u = \frac{18198 \quad 0.37}{14{,}436} = 472{,}72c^{\ 1}$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{t^{\circ}}{400} - 2\right)^2 = 0.27 - 0.1\left(\frac{847{,}27}{400} - 2\right)^2 = 0.27$$

$$k\nu = 0.76$$

$$k\varepsilon = 1{,}38$$

$$ke = 0.85 + 0.5 \cdot \varepsilon = 0.85 + 0.5 \cdot 0.375 = 1.037$$

$$\text{kb} = 0.75$$

$$kt = 1.003$$

$$f = f_0 \cdot k_t \cdot k_\nu \cdot k_B \cdot k_m \cdot k_e = 0.27 \cdot 1.003 \cdot 0.76 \cdot 0.75 \cdot 1.037 = 0.16$$

$$f\ddot{i} = f(0{,}92 + 1{,}27\varepsilon) = 0{,}16(0{,}92 + 1{,}27 \cdot 0{,}37) = 0{,}22$$

$$kt = 1.66 - 1.1\left(\frac{847{,}27}{400} - 2\right)^{0.7} = 1{,}41$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43\left(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2\right) = 1 + 0.43\left(1 + 6.3(0.5 - 0.375)^2\right) = 1.38$$

$$ku = 1{,}03 + 0{,}1(\ln u - 2.3)^{1{,}5} = 1.03 + 0.1(\ln 472{,}72 - 2.3)^{1{,}5} = 1.78$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \quad kt \quad k\varepsilon \quad ku = 87{,}33 \quad 1.41 \quad 1{,}38 \quad 1.78 = 305{,}62H / мм^2$$

$$p_{cp} = 1.15\sigma_T(1 + 0{,}48\ fn \quad l_d \quad / hcc) = 1{,}15 \quad 305{,}62(1 + 0{,}48 \quad 0{,}22 \quad 10{,}1) = 726{,}54H / мм^2$$

Зусилля прокатки в 5й кліті

$$P = p_{cp} \quad l_d \quad B = 726{,}54 \quad 0.01443 \quad 1.2 = 12{,}59МН$$

$$\psi = 0{,}51(10{,}1)^{-0{,}092} = 0{,}4$$

$$M = \psi \quad l_d \quad P = 0.4 \quad 0.01443 \quad 12{,}59 = 0.07МН$$

$$N\partial\partial = 2 \quad 960 \quad M_{np} \quad \nu / R = 2 \quad 960 \quad 0{,}07 \quad 18{,}19 / 0.31625 = 7733{,}79кВт$$

6а кліть $\Delta h = 0{,}099$ мм

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{316{,}25 \quad 0{,}099} = 5{,}595 мм$$

$$hcc = \frac{H + h}{2} = \frac{1 + 1{,}099}{2} = 1{,}049 мм$$

$$l_d \ / \ hcc = 5{,}595 / 1{,}0495 = 5{,}331$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta h}{Í} = \frac{0{,}09}{1{,}099} = 0{,}09$$

$$u = \frac{20000 \quad 0.09}{5{,}595} = 321{,}72 c^{\ 1}$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{t^{\circ}}{400} - 2\right)^2 = 0.27 - 0.1\left(\frac{831}{400} - 2\right)^2 = 0.27$$

$$kv = 0.76$$

$$ke = 0.85 + 0.5 \cdot \varepsilon = 0.85 + 0.5 \cdot 0.09 = 0{,}895$$

$$\text{kb} = 0.75$$

$$kt = 1.003$$

$$f = f_0 \cdot k_t \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_m \cdot k_e = 0.27 \cdot 1.003 \cdot 0.76 \cdot 0.75 \cdot 0{,}895 = 0.138$$

$$fï = f(0{,}92 + 1{,}27\varepsilon) = 0{,}16(0{,}92 + 1{,}27 \cdot 0{,}09) = 0{,}143$$

$$kt = 1.66 - 1.1\left(\frac{831}{400} - 2\right)^{0.7} = 1{,}48$$

$$k\varepsilon = 0{,}8 + 0{,}2 \cdot \left(1 - 178 \cdot (0{,}1 - 0{,}09)^2\right) = 0{,}996$$

$$ku = 1{,}03 + 0{,}1(\ln u - 2.3)^{1{,}5} = 1.03 + 0.1(\ln 321{,}72 - 2.3)^{1{,}5} = 1{,}677$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \quad kt \quad k\varepsilon \quad ku = 87{,}33 \quad 0{,}996 \quad 1{,}48 \quad 1.67 = 215{,}9 Í / мм^2$$

$$p_{cp} = 1.15\sigma_T(1 + 0{,}48\, fn \quad l_d \quad / \ hcc) = 1{,}15 \quad 215{,}9(1 + 0{,}48 \quad 0{,}143 \quad 5{,}331) = 339{,}13 Í / мм^2$$

Зусилля прокатки в 6й кліті

$$P = p_{cp} \quad l_d \quad B = 339{,}13 \quad 0.005595 \quad 1.2 = 2{,}27 МН$$

$$\psi = 0{,}5(5{,}331)^{-0{,}092} = 0{,}429$$

$$M = \psi \quad l_d \quad P = 0.42 \quad 0.005595 \quad 2{,}27 = 0{,}005 МН$$

$$Nдд = 2 \quad 960 \quad M_{пр} \quad v / R = 2 \quad 960 \quad 0{,}005 \quad 20 / 0.31625 = 607{,}1 кВт$$

Таблиця 2.2 Геометричні й енергосилові параметри прокатки штаб 1×1200 сталь 08пс

№ кліті	ld,мм	$ld/h_{ср}$, мм	$\sigma_т$, Н/мм^2	f	$p_{ср}$, Н/мм^2	P, МН	ψ	$M_{пр}$, МНм	N, кВт
1	53,35	3,95	137,88	0,37	333	21,3	0,44	0,51	6889,1
2	33,44	4,62	153,38	0,21	293,8	11,79	0,44	0,17	3733,2
3	27,30	6,37	188,41	0,22	428,7	14,05	0,42	0,16	6252,7
4	20,65	8,49	241,14	0,16	548,5	13,59	0,41	0,12	8288,5
5	14,43	10,1	305,62	0,16	726,54	12,59	0,40	0,07	7733,7
6	5,59	5,33	215,9	0,13	339,1	2,27	0,42	0,005	607,11

3.ЕКСПЕРИМЕТАЛЬНА ЧАСТИНА

Розвиток методів формоутворення поперечного профілю листового прокату та профілювання валків листопрокатного виробництва

3.1 Розрахунок пружних деформацій та напруг валкових систем кварто

Значний вплив на нормовані показники точності поперечного профілю штаб, що прокочуються, і листів (поперечну різнотовщинність, клиноподібність, місцеві потовщення) і неплощинність надає нерівномірність розподілу пружних деформацій валків по довжині бочки в контакті зі штабою під дією нестабільних факторів технології.

Підвищення точності розрахунку пружних деформацій валків сприяє вдосконаленню методів контролю зазначених показників та управління ними. При цьому дуже важливим є можливість оцінки напруженого стану валкових систем для підвищення їхньої стійкості, що визначає ефективність технологічного процесу прокатки, як у частині підвищення якості продукції та продуктивності, так і зниження витратного коефіцієнта прокатних валків.

Одним з перспективних методів розрахунку пружних деформацій і напруги валкових систем є метод кінцевих елементів, що дозволяє для повнорозмірної тривимірної моделі валкового вузла визначати, як напруги в різних зонах, так і переміщення будь-яких точок для знаходження утворюють робочих валків, що формують поперечний профіль штаби. На основі аналізу різних схем розрахунку валкових систем методом кінцевих елементів [7,10] розроблено варіант моделювання валкової системи кварто, що відрізняється можливістю обліку різних профільувань, конструктивних особливостей, а також умов контактної взаємодії валків та робочого валка зі штабою.

Спочатку створюється тривимірна модель валків у системі

конструкторського проектування (CAD-системі), що включає верхню або нижню пару валків. Оскільки конструкції робочої кліті передбачені спеціальні пристрої для врівноваження валків, з розгляду виключено дію гравітаційних сил. Це дозволяє в силу симетрії завдання виконати аналіз лише одного валкового напівкомплекту, наприклад, для верхніх робочого і опорного валків. Моделі валків включають бочки валків та ділянки цапф, де встановлюються підшипникові опори. p align="justify"> При створенні моделей валків використовуються їх реальні креслення, бочки моделей валків виконуються з вихідними, прийнятими за технологією профілюваннями і скосами. На рисунку 3.1 представлені можливі варіанти симетричних профілювань валків.

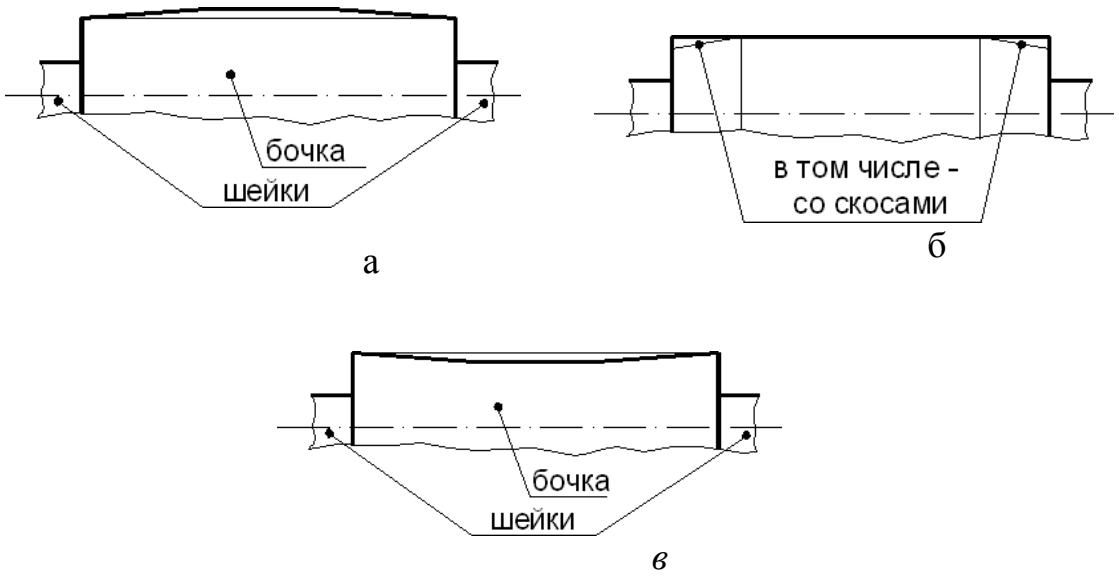


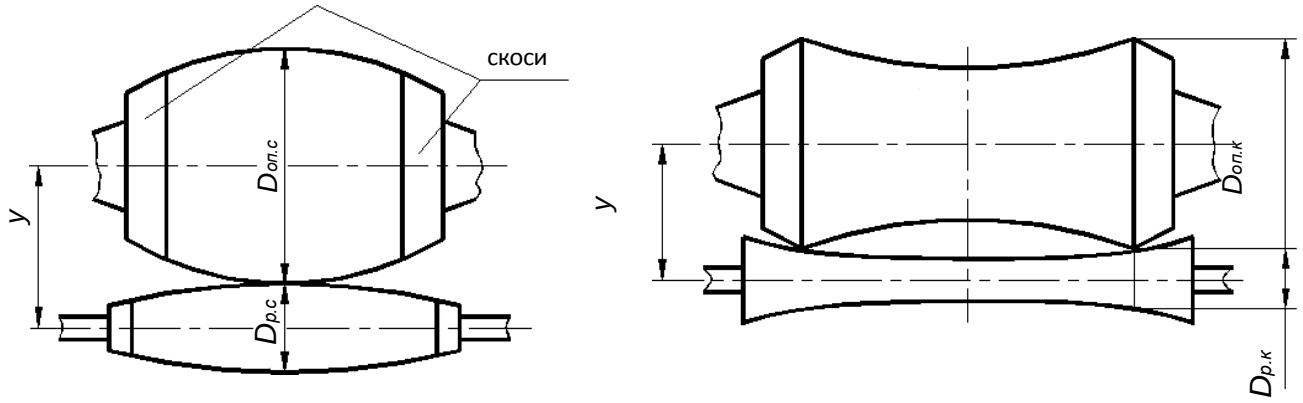
Рисунок 3.1 – Варіанти симетричних профілювань: *а*- випукла; *б*– циліндрична; *в*–увігнута

Максимальні значення опуклостей або увігнутостей у середині бочки Δ*D*шл.опта Δ*D*шл.рпри симетричних профілюваннях рівні:

$$\Delta D_{шл.оп}=D_{оп.с}-D_{оп.к};$$
$$\Delta D_{шл.р}=D_{р.с}-D_{р.к}, \qquad (3.1)$$

де *D*оп.сі *D*р.с- Діаметри в середині бочок; *D*оп.к і *D*р.к- Діаметри у країв бочок (для опорного валка - у краю активної частини бочки, без урахування скосів).

Вихідна міжосьова відстань між робочим та опорним валками *у*задається з умови, щоб до застосування робочого навантаження (сили прокатки) валки стикалися з точками профілів бочок, що належать перерізам з максимальними діаметрами (рисунок 3.2):



а **б**

Рисунок 3.2 – Міжосьова відстань у ненавантаженому стані: *а*– при опуклих профілюваннях; *б*– при увігнутих профілюваннях

– при опуклих профілюваннях:

$$y=0{,}5(D_{оп.с}+D_{р.с}), \tag{3.2}$$

– при увігнутих профілюваннях:

$$y=0{,}5(D_{оп.к}+D_{р.к}). \tag{3.3}$$

На рисунку 3.3 представлені асиметричні опукло-увігнуті профілювання бочок робітників та опорних валків, що описуються виразом (1.3). У системі опукло-увігнутих профілювань утворює верхнього опорного валка дзеркально відображає утворює верхнього робочого валка і за

відсутності осьового зміщення робочого валка (*C*=0) максимальний радіус робочого валка збігається з мінімальним опорним радіусом.

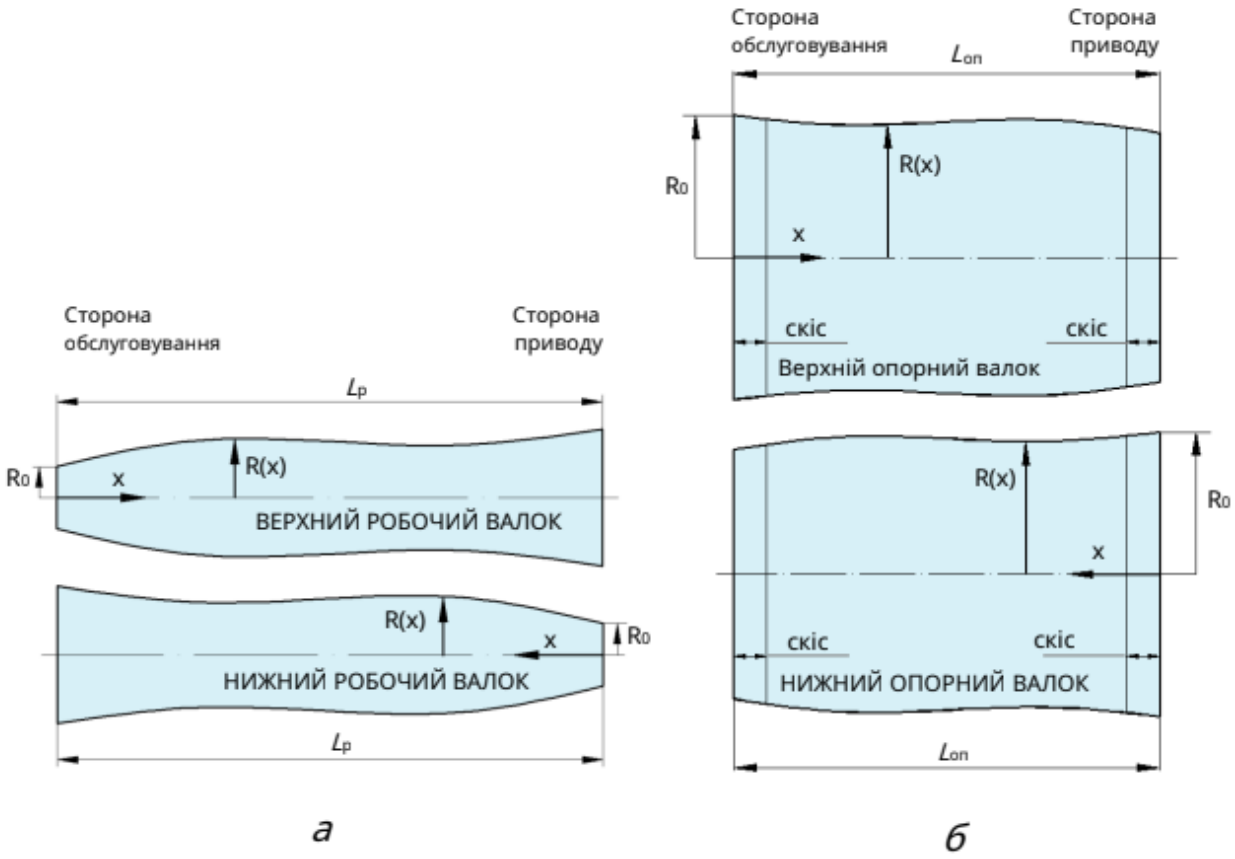


Рисунок 3.3 – Асиметричні опукло-увігнуті профілювання бочок робочих валків (*а*) та опорних валків (*б*): *x*- поточна координата в осьовому напрямку валка; *R*(*x*) – радіус у точці*x*;*R*0– радіус у положенні*x*=0;

*L*р і *L*оп- Довжина бочок робочого та опорного валківю

Тривимірна модель з CAD-системи далі імпортується в обчислювальне середовище кінцево-елементного аналізу, де створюється кінцево-елементна модель валкового вузла. На рисунку 3.4 показані створені в SIMULIA Abaqus кінцево-елементні моделі валкових вузлів:*а*- кліті чистової групи НШСГП стану 2000;*б*- кліті стану холодної прокатки 2100 з осьовим зсувом робочих валків.

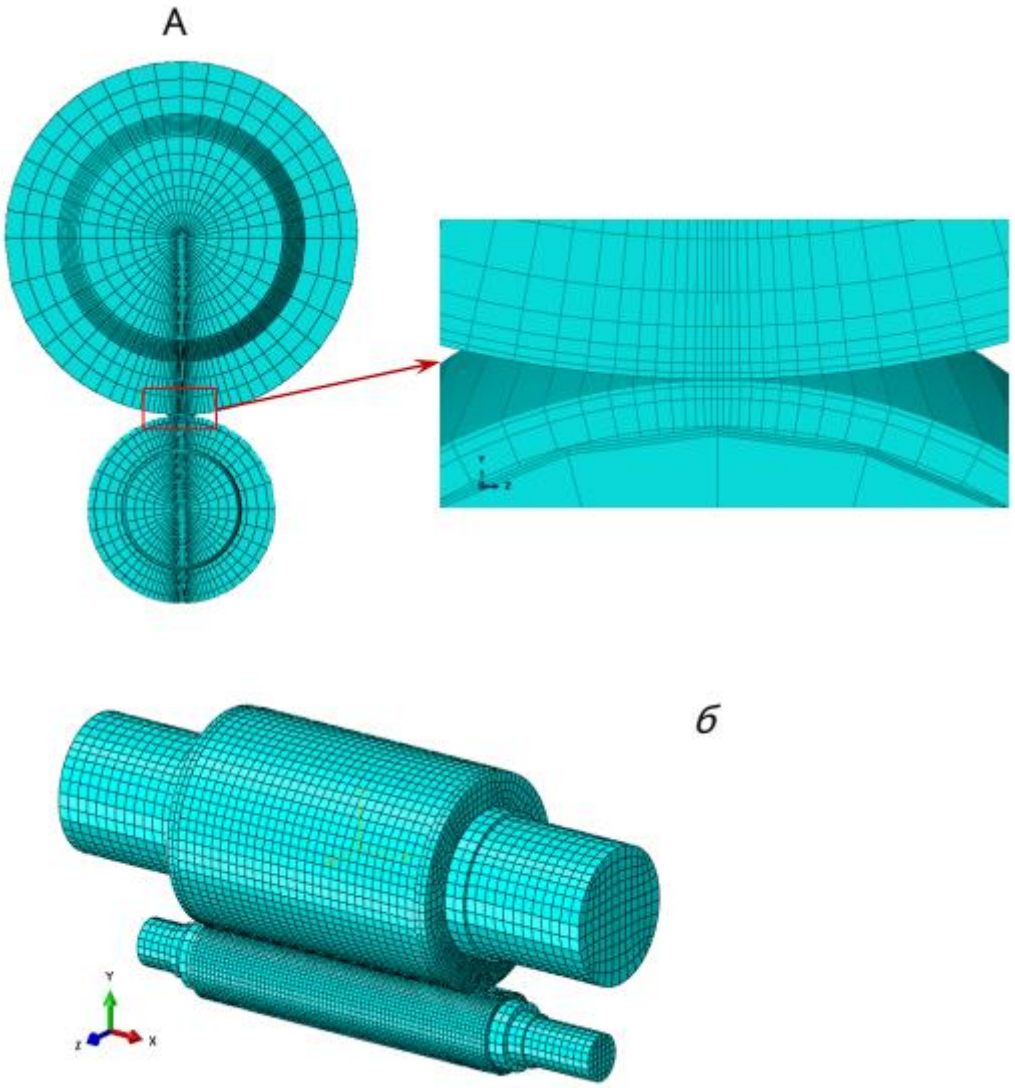


Рисунок 3.4 – Звичайно-елементна модель валкових систем різних станів: *а*– стану гарячої прокатки 2000; *б*– стану холодної прокатки

У контакті робочого та опорного валків і на бочці робочого валка в контакті зі смугою виконується подрібнення сітки, при цьому щільність сітки вибирається так, щоб подальше її збільшення не призводило до зростання значень параметрів, що аналізуються Моделювання напружено-деформованої системи реалізується, виходячи з наступних граничних умов:

- заборонено переміщення зовнішніх поверхонь цапф під підшипниками опорного валка у напрямку осей *Y*і*Z*;

– заборонено переміщення зовнішніх поверхонь цапф під

підшипниками робочого валка у напрямку осі *Z*;

– на робочий валок з боку металу діє сила прокатки, розподілена за площею осередку деформації;

- Коефіцієнт тертя в парі «робочий валок - опорний валок» дорівнює 0,2.

Значення сили прокатки набувають експериментальним шляхом або з використанням моделі розрахунку сили прокатки д.т.н. Е.А. Гарбера та д.т.н. І.А. Кожевникової [4, 5, 7, 8], що дозволяє також визначати параметри осередку деформації при холодній та гарячій прокатці, його довжину*l*з (рисунок 3.5), включаючи розмір зони пружного та пластичного обтиснення штаби –*x*1та довжину зони пружного відновлення частини товщини штаби*x*2. Ширина осередку деформації визначається шириною штаби, що прокочується.

Відповідно до публікацій з питань тертя, зношування та моделювання фрикційного контакту пари тертя «робочий валок – опорний валок» [238–243] коефіцієнт тертя у міжвалковому контакті змінюється в діапазоні 0,1–0,335 і залежить від багатьох фізико-механічних властивостей поверхонь, що контактують. При моделюванні прийнято величину, близьку до середнього значення з наведеного діапазону. Також у розрахунку прийнято, що модуль пружності матеріалу валків дорівнює *E*=2·105МПа; коефіцієнт Пуассона матеріалу валків - μ = 0,3.

На рисунку 3.6 як приклад представлені результати розрахунку напруги валкової системи кліті № 12 чистової групи стану 2000 при прокатці штаби з марки сталі 08пс шириною*b*=1320 мм із силою *P*=10 МН на основі кінцево-елементної моделі рисунок 3.4,*а*. Діаметри бочок робочого та опорного валків були взяті рівними відповідно*D*р= 800 мм та *D*оп= 1500 мм.

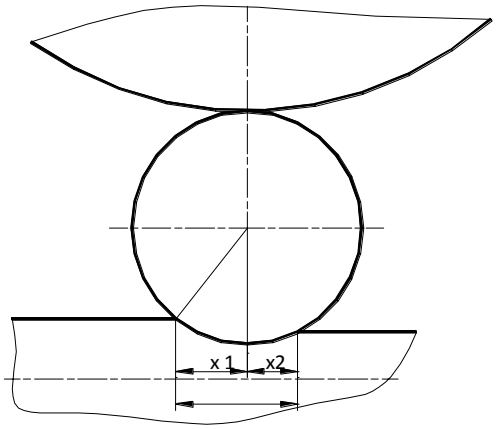


Рисунок 3.5 – Схема до завдання довжини осередку деформації: *x*1- Довжина зони пружного і пластичного обтиснення штаби, *x*2- Довжина зони пружного відновлення частини товщини штаби

Довжина контактної дуги склала 16 мм. Максимальна напруга на глибині 3 мм від поверхні становить 499 МПа, а на поверхні – 425 МПа (рис. 3.6, *а* і *в*). З розподілу напруг зсуву (рисунок 3.6,*б*) видно, що у майданчику контакту валків відбувається зміна їхнього знака й у середині майданчика контакту значення напруг дорівнює нулю. Розподіл напруги по довжині бочки опорного (рисунок 3.6, *г*) показує, що в зоні початку скосів напруги на поверхні збільшуються і становлять 460 МПа.

Порівняння результатів чисельного моделювання напруг у середині бочки та розрахунку на основі теоретичних формул, що базуються на теорії контакту двох циліндрів [9-11], показало їх відповідність. Розбіжність значень максимальних напруг вбирається у 2 %.

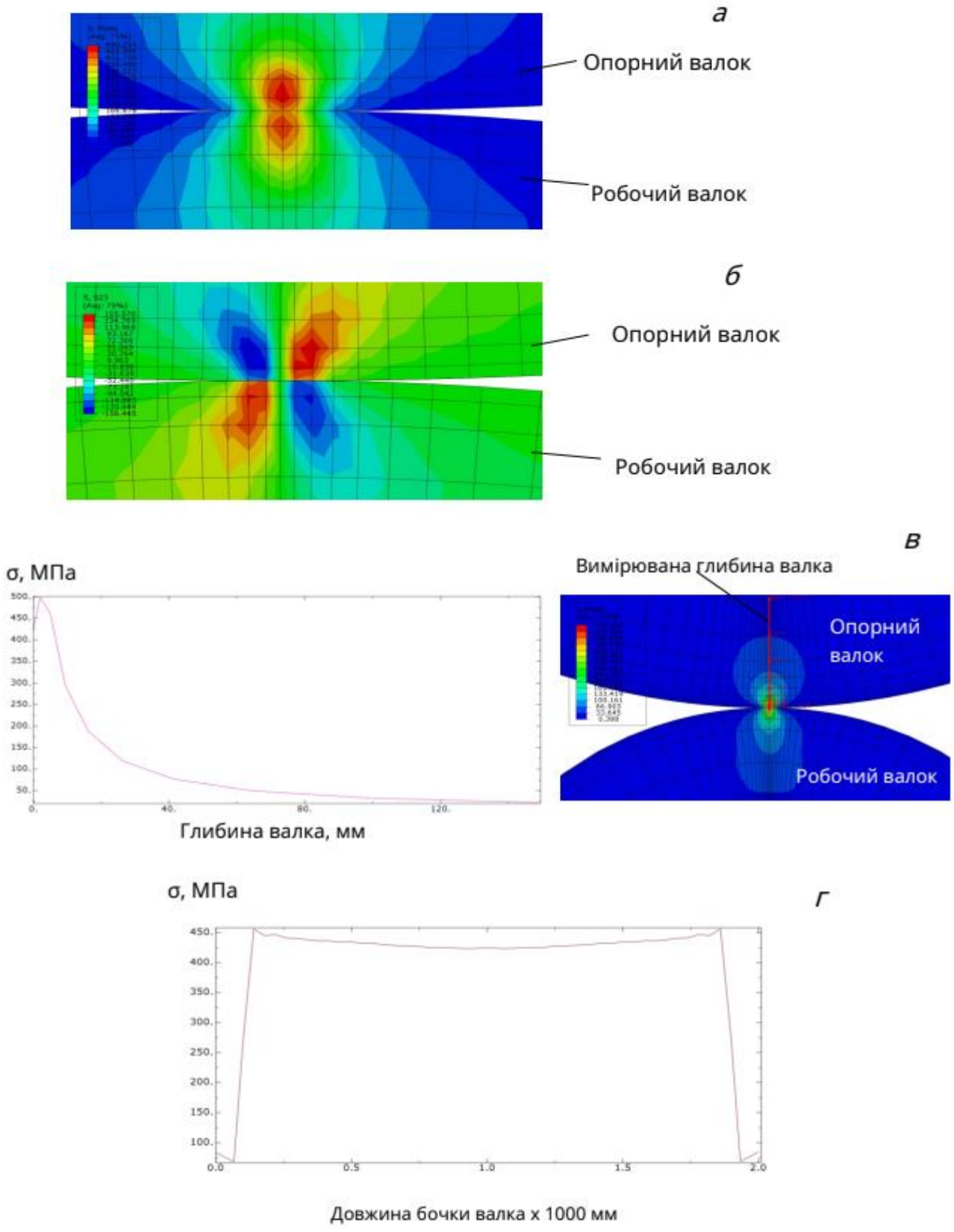
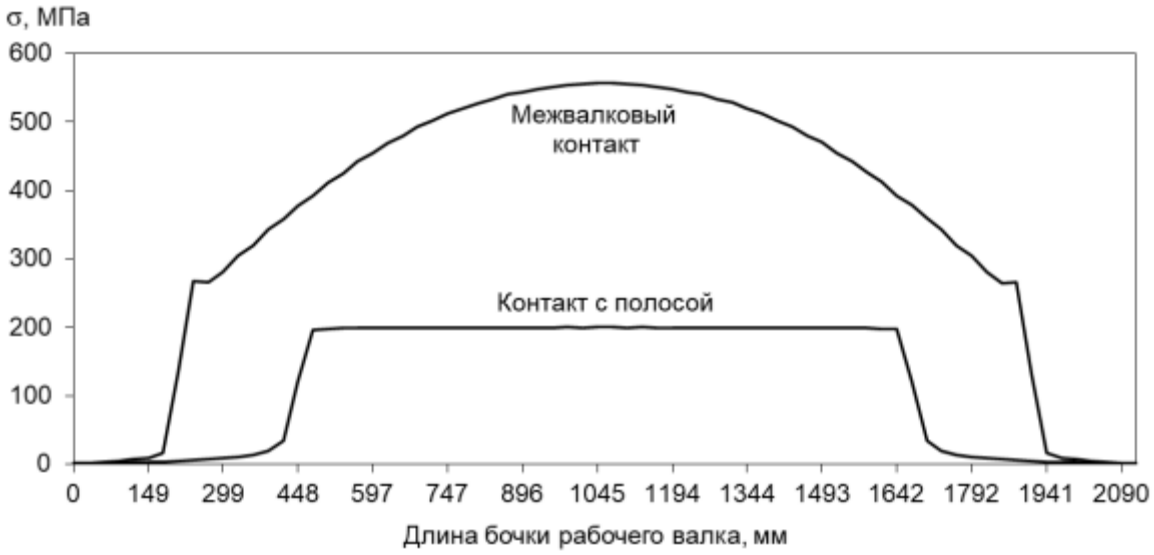
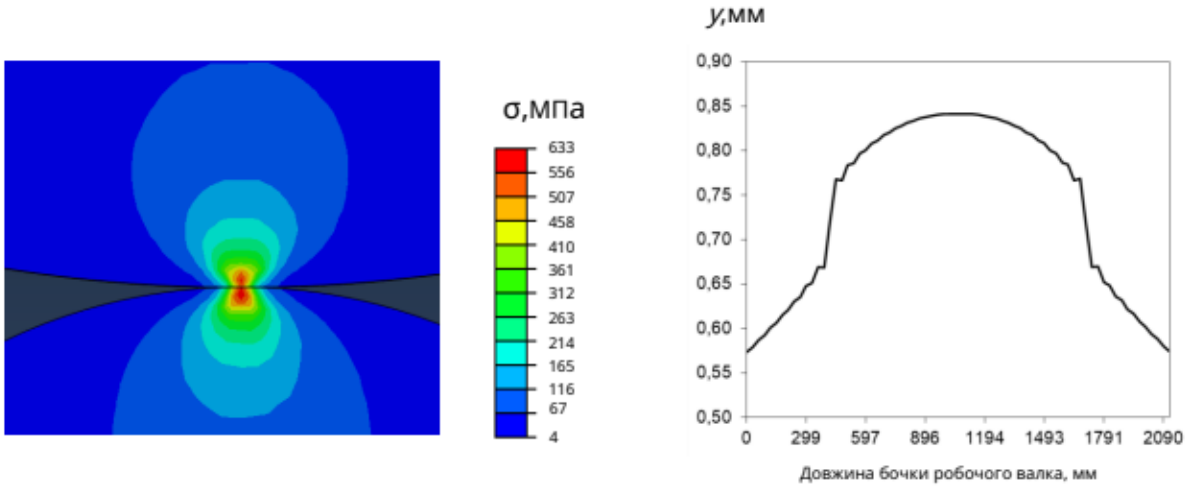


Рисунок 3.6 – Розподіл напруги, МПа в зоні контакту валків (*а*), розподіл напруг зсуву (*б*), зміна напруги по глибині опорного валка (*в*) та по довжині бочки опорного валка в середині майданчика контакту з робітником (*г*)

Результати розрахунку напруги валкової системи на основі кінцево-елементної моделі, показаної на рисунку 3.4,*б*, з опукло-увігнутими профілюваннями та циліндричними шийками опорних валків при прокатці штаби з марки сталі 08пс шириною *b*=1250 мм із силою прокатки *P*=10 МН у кліті № 2 за відсутності осьового переміщення робочих валків представлені рисунку 3.7. Діаметри бочок робочого та опорного валків були взяті рівними відповідно*D*р= 455 мм та *D*оп= 1220 мм.



а



б *в*

Рисунок 3.7 – Розподіл напруги по довжині бочки робочого валка у вертикальній осьовій площині (*а*) та в контакті валків (*б*), розподіл пружних деформацій по довжині бочки робочого валка у вертикальній осьовій площині (*в*)

Аналіз отриманих розподілів показує, що напруги, що виникають у зоні контакту робочого та опорного валків, більш ніж у 2 рази більше, ніж в осередку деформації, що пояснюється меншою шириною майданчика пружного контакту між валками порівняно з довжиною пластичного осередку деформації. Сила прокатки *P* розподіляється у міжвалковому контакті на істотно меншої площі, ніж в осередку деформації і викликає у міжвалковому контакті більш високу напругу. Також відрізняється характер розподілу напруги по довжині міжвалкового контакту порівняно з контактом по ширині штаби, міжвалковому контакті спостерігається максимальне значення в середині бочок валків. Найбільш навантажена ділянка по радіусу робочого валка (рисунок 3.7,*б*) знаходиться всередині на глибині приблизно 3 мм від поверхні і становить 633 МПа, тоді як на поверхні напруга дорівнює 556 МПа. При подальшому віддаленні від поверхні напруги швидко зменшуються і на глибині 20 мм становлять 224 МПа, на глибині 40 мм - 128 МПа далі стають незначними. Порівняння результатів чисельного моделювання та розрахунку на основі теоретичних формул показало їхню повну відповідність.

Представлений опис та результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану валкових систем відображає їх фізичні особливості та дозволяє визначати криві пружних деформацій по довжині бочки робочого валка в контакті зі смугою та виконувати аналіз нерівномірності напруг у міжвалковому контакті.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1.Аналіз потенційно небезпечних и шкідливих чинників виробничого середовища

Прокатне виробництво характеризується складністю й різноманітністю механічного встаткування, у зв'язку із чим у виробничому процесі в основному мають місце небезпечні фізичні фактори; фізико-хімічні фактори є основними тільки при нагріванні металу перед прокаткою й вогневому зачищенню поверхні прокату. Основними небезпеками в цеху є: шум, вібрація, надлишкові теплові виділення на ділянках нагрівальних пристроїв, робочої кліті стана, ножиців, рольгангів; запиленість і загазованість на деяких робочих ділянках; електронебезпечність; імовірність падіння вантажів із кранів.

При експлуатації прокатного стана існують такі небезпечні зони: зона біля валків,біля обертових шпинделів і з'єднання муфт.

Додатковими небезпечними факторами при гарячій прокатці є температурний режим нагрівання, режим прокатки, швидкість його охолодження при деформації й т.д. При різанні металу на ножицях небезпечними є локальні зони що рухаються й обертаються частин механізму.

Також до основних небезпечних і шкідливих факторів у цеху гарячої прокатки відносяться: рухомі машини і механізми, запиленість і загазованість повітря, вібрація, шум, підвищена температура повітря, електронебезпека та пожежонебезпека [12]. Якісний склад пилу наведено в табл. 4.1.

У цеху гарячої прокатки багато основних і допоміжних технологічних операцій, що супроводжуються виділенням значних кількостей пилу. Вміст

різних елементів у пилу пропорційно хімічним складом прокатуваної сталі. Пил містить: 73,96% Fe; 0,1% C; 0,51% Mn; 0,39% S; 25,04% O_2.

Таблиця 4.1 - Якісний склад пилу при прокатуванні

Найменування	Вміст (%)
Оксиди заліза	55,6 - 96,4
Оксиди кальцію	3-16,4
Оксиди магнію	1,3- 1,6
Оксиди марганцю	0,4-3
Кремнезем	5,4-19
Вільний вуглець	1,5-4

Пил, переважно фіброгенної дії, становить за фактом 22 мг/м ^{3}, в той час як, при нормативних значеннях 4,0 мг/м ^{3}. Перевищення ГДК пилу від норми становить більше 5,5 разів і відноситься до 3 ступеня шкідливості характеру праці.

Іншим фактором прокатного стану, що характеризує санітарно-гігієнічні умови праці оператора в цеху, є загазованість. Наявність різних газів в атмосфері прокатного цеху обумовлено порушеннями технологічного режиму, несправністю і недосконалістю устаткування. До основних джерел виділення шкідливих газів відносяться нагрівальні пристрої, прокатні стани, ріжучі механізми та інше технологічне обладнання.

У прольотах прокатних станів, на ділянках різання і складання металу, крім технологічних газів, в атмосферу надходить значна кількість газів, що утворюються при згорянні мастильних матеріалів (вуглекислий газ (CO_2), вуглець оксид (CO), сірчаний ангідрит SO_2)) [12].

Багато технологічних операцій прокатного виробництва супроводжуються утворенням шумів низької та високої частоти. Гучними шумами, рівень яких значно перевищує допустимі санітарні норми, супроводжується транспортування металу по рольгангах, прокатка на стані, різка на ножицях.

Окремі ручні операції в прокатних цехах поєднанні з шкідливим впливом вібрації на організм людини. Особливо небезпечні в цьому відношенні наждачна зачистка поверхні, ручне таврування металу за допомогою пневмоінструменту.

Істотне значення для санітарно-гігієнічної характеристики прокатного виробництва мають метеорологічні умови в цеху. Метеорологічні умови в цеху визначаються температурою, вологістю і швидкістю повітря. Температура повітря на гарячих ділянках прокатного цеху значно перевищує температуру зовнішнього повітря.

Швидкість повітря також впливає на самопочуття людини. У холодний період року у виробничих приміщеннях прокатного цеху оптимальна швидкість руху повітря приймається рівною 0,3 - 0,5 м/с. У літній час допускається швидкість руху повітря 0,3 - 1 м/с. Проблема створення нормальних метеорологічних умов праці в прокатному цеху вирішується в комплексі із заходами щодо зменшення тепловиділень за допомогою аерації, застосування припливно-витяжної вентиляції і кондиціонування повітря.

Аналіз карти умов праці показав, що робота вальцювальника відноситься до важкої категорії робіт, робота операторів, вальцювальників ставиться до робіт зі шкідливими і небезпечними умовами праці.

Відповідно до гігієнічної класифікації умов праці вальцювальник має право на пільгові умови на: пенсію по старості на пільгових умовах; додаткова відпустка; надбавка до зарплати; профілактичне харчування.

КЗОТ містить загальні вказівки про порядок видачі за рахунок підприємства спецодягу і запобіжних пристосувань (окуляри, маски, респіратори, мило і т.п.) всім працюючим на особливо шкідливих роботах з перебуванням у місцях де температура вище норми

Так як в цеху проводиться гаряча прокатка, то і в холодний, і в теплий період року температура повітря вище норми. Окалина, що відлітає і осколки від гарячих зливків, вібрація, виділення парів води, шум, пил, а також фізичні

фактори, зливки, що рухаються з великою швидкістю і ударами - все це є шкідливими чинниками.

На підставі проведеного аналізу пропонуються заходи щодо зменшення та виключенню цих шкідливих факторів.

4.2 Заходи з поліпшення умов праці у цеху гарячої прокатки

Перелік технічних і санітарно-гігієнічних мір захисту виробничої сфери і робочих місць наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Міри захисту від впливу небезпечних і шкідливих факторів

Небезпечний або шкідливий фактор	Захисний пристрій	Принцип дії і призначення	Місце установки
Підвищений рівень шуму	Звукоізолюючі кабіни і перегородки	Звукопоглинання і відбиття, ізоляція органів слуху	Біля джерел шуму, у приміщенні оператора
Небезпечний рівень струму	Ізоляція і огородження струмоведучих частин; заземлення й блокування	Захист від дотику до струмоведучих частин, захист від дотику до металевих частин устаткування. Захист від високих рівнів струму	Навколо струмоведучих частин, біля корпусів електродвигуна
Рухливі механізми	Запобіжники плавкі, пускачі дистанційні Кожуха, сітки, запобіжні пристрої	Захист від зіткнення із частинами, що рухаються, і механізмами.	На панелях пульта керування

4.2.1.Вентиляція і кондиціювання повітря

Для створення сприятливих умов робочим, зайнятих на гарячих роботах, а також для зниження температури, в закритих приміщеннях необхідно охолоджувати повітря у відповідних установках. Найбільш простим методом охолодження повітря є його охолодження в камерах в результаті випаровування рециркулюючої води. Випаровування водяного пилу викликає охолодження повітря, засмоктуваного в камеру вентилятором. Витрата води, що йде на випаровування в стічному резервуарі поповнюється за допомогою поплавкового клапана від водопровідної мережі.

При температурі охолоджуваного повітря близько 20-30°С в повітряноохолоджуючих камерах випаровуванням рециркулюючої води охолоджують повітря на 6 - 8 °С, а при температурі повітря близько 35-40 °С на 10-15 °С [13].

Для найбільшого охолодження повітря, що подається на пости керування прокатними станами, що подають рольгангами, ножицями і пилами гарячого різання або для обдування робочих місць, застосовуються спеціальні кондиціонери, що дозволяють подавати повітря з початковою температурою близько 13-15°С, що забезпечує температуру повітря в приміщеннях пультів керування або на робочих місцях біля 20 - 22 °С. При цьому температура холодоносія становить 6 - 8°С.

На постах управління прокатного стану застосовують охолоджене повітря спеціальних кондиціонерів з холодильними установками компресорного типу. В якості хладоагента найчастіше застосовується фреон.

Крім вентиляції з охолоджуванням повітря в літній час широко застосовується охолодження повітря зрошенням його водяним пилом, безпосередньо у робочих місць водорозпорошувальними форсунками, при цьому розпилювана вода випаровуватися в повітрі, охолоджуючи його. При зрошенні повітря невелика кількість найтоншого водяного пилу потрапляє на

одяг і на відкриті частини тіла робітників, знижуючи при цьому температуру одягу на 4 - 5 °С і температуру відкритих частин тіла на 1 - 2 °С.

Охолодження повітря зрошенням його водяним пилом можна застосовувати у нагрівальних печей, прокатних станів, ножиць і пил, в місцях таврування заготівок, у штабелів гарячих заготівок на складі, близько холодильників, змотувачів та інших пристроїв.

У зв'язку з тим, що в процесі виробництва агрегати прокатних цехів виділяють в приміщення значну кількість тепла, пилу і газів, цех має розвинену вентиляційну систему. Витяжна вентиляція служить для видалення з будівлі цеху нагрітого і забрудненого повітря і викиду його в атмосферу. Припливна вентиляція служить для подачі в цех чистого повітря замість вилученого [12].

Ступінь впливу пилу на організм людини залежить від його фізико-хімічних властивостей, токсичності, концентрації, дисперсності.

При вдиханні запиленого повітря частина пилових частинок виводиться з організму. Це обумовлено захисними рефлексами (чханням, кашлем). Інша частина пилових частинок проникає вглиб легенів, викликаючи роздратування з'єднувальних тканей, сполучних тканин, тобто розвивається пневмоконіоз.

Частинки пилу прокатного виробництва мають форму нерівномірних гранул, як правило, з одним або кількома гострими краями. Пил, що утворюється при прокатуванні і обробці металу, негативно впливає на організм людини. Медичні спостереження показують, що особи, які постійно працюють в атмосфері, яка містить зважений металевий пил, більш схильні до захворювання грипом, бронхітом, гострим захворюванням верхніх дихальних шляхів і запаленням легенів.

Цех, як правило, обладнаний системою як природної, так і механічної припливно-витяжної вентиляції.

У прокатному цеху застосовують різні способи повітрообміну, залежно від яких вентиляція підрозділяється на місцеву і загальну, або, як часто її називають загальнообмінну.

У зонах виділення шкідливих речовин застосовуються місцеві вентиляційні пристрої, такі як повітряне душування і повітряні завіси.

Повітряне душування застосовується в цеху на місцях постійного перебування робітників, що піддаються впливу інфрачервоного випромінювання інтенсивністю 350 Вт/м^2. Для усунення перегріву організму робочих припливне повітря спрямовується безпосередньо на поверхню тіла робочого у вигляді так званого повітряного обдування.

Повітряні завіси застосовують з метою запобігання надходження зовнішнього холодного повітря у виробниче приміщення через відкриті двері або ворота і захисту людей від його впливу. Повітряна завіса використовується також у прорізів в огорожі технологічного обладнання як перешкоду вибивання гарячого забрудненого повітря в приміщенні та в інших випадках, коли необхідно перекрити повітряний потік через отвір.

Витяжні зонти служать для уловлювання потоків шкідливих речовин, спрямованих вгору. Вони застосовуються, коли джерело утворення пилу, парів і газів переміщається на значній площі робочого місця, як в горизонтальній, так і вертикальній площині.

При загальнообмінній вентиляції шкідливості поширюються повітряними потоками по всьому цеху, тому роль припливної вентиляції полягає в розведенні шкідливостей до допустимих норм концентрацій.

У цеху застосовують змішану вентиляцію, тобто одночасно загальну і місцеву.

При механічній вентиляції переміщення повітря досягається за рахунок використання механічної роботи вентиляторів. При природній вентиляції переміщення повітря здійснюється під впливом різниці питомої ваги зовнішнього повітря і повітря всередині цеху, а також в результаті дії вітру.

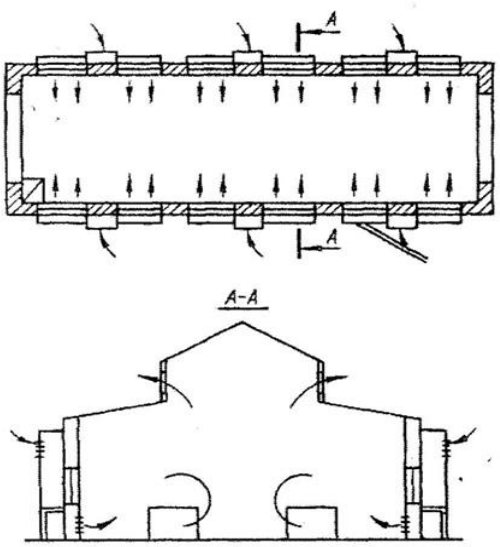


Рисунок 4.1 - Схема аерації приміщень

У прокатному цеху, повітря, нагріте від обладнання, розпеченого металу і нагрівальних пристроїв, піднімається вгору і видаляється через стулки аераційних ліхтарів на даху будівлі (рис. 4.1).

Для здійснення аерації є достатні за площею і правильно розташовані отвори для введення свіжого і видалення забрудненого повітря. У холодну пору року зовнішнє повітря вводять на висоті, з якою повітря, переміщаючись до робочої зони, нагрівається до необхідної температури в результаті перемішування з внутрішнім повітрям [13].

4.2.2.Освітлення в цеху

У цеху гарячої прокатки застосовується природне і штучне освітлення. Для освітлення приміщень, як правило, передбачають газорозрядні лампи низького і високого тиску (люмінесцентні, ДРЛ).

Норму освітленості вибирають залежно від характеристики зорової роботи, види якої по напруженості ділять на вісім розрядів. Розряд залежить від ^величини об'єкта розрізнення, а подразряд від фону і контрасту між об'єктом розрізнення і фоном (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Прийняті значення освітленості в цеху

Назва ділянки	Розряд зорової роботи	Освітленість (лк) і коефіцієнт запасу при люмінесцентних лампах			Аварійне освітлення (лк)	
		Система комбінованого освітлення	Система загального освітлення	Коефіці-єнт запасу	Для тривалих робіт	Евакуа ційне
Стан 1700	VII	-	150	1,5	10	0,5

Найменша освітленість робочих поверхонь і території підприємств, які потребують обслуговування при аварійному режимі, повинна складати 5% робочого освітлення, але не менше 2 лк всередині будівель і 1 лк для території. Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати найменшу освітленість на підлозі основних проходів, на землі і на сходах 0,5 лк у приміщенні і 0,2 лк на відкритих територіях. Правильне освітлення робочих місць в цеху має велике значення для створення безпечних умов праці.

Природне освітлення цеха здійснюється через світлові прорізи і світлові ліхтарі в даху будівель, тому його поділяють на бічне і верхнє.

Раціональним вважається природне освітлення, що забезпечує хорошу рівномірність освітлення. Освітленість, створювана денним природним світлом, змінюється в широких межах: протягом декількох хвилин вона може збільшуватися або зменшуватися в кілька разів [13].

Штучне освітлення в залежності від розташування джерела світла поділяють на загальне, місцеве і комбіноване. Загальне освітлення застосовується для освітлення прольотів цехів. Місцеве освітлення застосовується в якості додаткового при виконанні точних робіт, на пультах управління, на верстатах, при роботах, пов'язаних з ремонтом обладнання та нагрівальних пристроїв.

В освітлювальних установках прокатного цеху застосовуються лампи розжарювання і газорозрядні лампи.

Для місцевого освітлення застосовуються лампи розжарювання. З газорозрядних джерел світла в освітлювальних установках цеху застосовуються люмінесцентні лампи і ртутні лампи високого тиску з виправленою кольоровістю типу ДРЛ.

У виробничих приміщеннях прокатного цеху застосовуються світильники наступних типів: «Універсаль» і «Люцетта цільна» - переважно прямого світла відкритого типу.

Крім робочого освітлення в прокатному цеху влаштовують аварійне освітлення. Воно призначене для безперебійного обслуговування агрегатів та устаткування у разі виходу з ладу робочого освячення і діє від незалежного джерела електроенергії.

4.2.3.Захист від виробничого випромінювання

Одним з найбільш істотних факторів, що визначають несприятливі умови праці в цеху є тепловипромінювання. Для захисту робітників від тепла, випромінюваня прокатувальним металом, встановлюють водяні екрани між робочим місцем і місцем проходження гарячого металу.

Розпечений прокатуваний метал являє собою переміщувані по цеху джерела тепла. Промениста енергія на відстані їм від прокату становить до 279 - 349 Вт/м^2.

Для зменшення тепловипромінювання в цеху максимально знижують температуру джерел променевого тепла. Зниження температури джерел випромінювання тепла в прокатних цехах практично здійснюються збільшенням товщини стінок агрегатів, теплоізоляцією їх зовнішньої поверхності або охолодженням цих поверхностей.

Для захисту працюючих від тепловипромінювання встановлюють між джерелами тепловипромінювання і працюючими екрани або завіси, що затримують інфрачервону радіацію [12].

При застосуванні порожнистих екранів з циркулюючої водою або при безперервному змочуванні водою простих екранів, виконаних з листової сталі, теплове випромінювання затримується повністю.

При екрануванні необхідно залишати між поверхнею і екраном повітряний проміжок (80 - 200 мм) для вільної циркуляції повітря. Якщо за характером виробництва потрібно вести спостереження за процесами, то екрани виконуються з прозорих матеріалів або густої металевої сітки.

Водяні завіси у вигляді суцільної пелени води, а також водоструменевої або водоповітряної завіси дозволяють зменшити вплив тепловипромінювання на робочих місцях на 60 - 85%, причому видимість крізь завіси істотно не погіршується. Водяні завіси слід застосовувати, наприклад, у робочих вікон нагрівальних печей, у місцях маркування гарячого металу і т.п.

Засобами індивідуального захисту від тепловиділень є густі металеві сітки або брезентові штори зі вставленими в них синіми стеклами. Густа мідна сітка знижує теплове опромінення особи приблизно в 3-4 рази, а шторки захищають особу від тепловипромінювання майже повністю. Велике значення у боротьбі з променистим теплом і теплом, що передається конвекцією, має спеціальний одяг. Матеріал для спецодягу застосовують з незаймистих тканин, стійких проти впливу променистого тепла, міцних, м'яких, що володіють великою повітропроникністю для полегшення повітрообміну тіла людини, що працюють з навколишнім середовищем.

4.2.4.Захист від виробничого пилу

Пил при прокатуванні утворюється в результаті подрібнення окалини валками і випаровування внаслідок миттєвого збільшення тиску та підвищення температури.

Основними заходами щодо боротьби з пилом у прокатному цеху є: введення раціональних технологічних процесів, застосування ефективної герметизації і аспірації всіх джерел, зволоження пилу водою або парою; пристрій спеціальної пилоуловлювальної вентиляції від місць пилоутворення

з очищенням повітря перед викидом його в атмосферу через систему фільтрів; регулярне прибирання пилу з робочих місць спеціальними

пилососами, застосування індивідуальних засобів захисту (респіраторів, окулярів, спецодягу тощо).

Природний повітрообмін, як правило, не забезпечує нормальних умов праці на робочому місці. Тому в таких випадках застосовується вентиляція і водорозпиленя.

Найбільш простим способом знепилювання повітря є зрошення водою через форсунки. Ефективність дії пересувних душуючих установок підвищується при додаванні розпорошеної води. Для підвищення ефективності повітряного душування забезпечують високу дисперсність і правильне дозування розпилючої води. У цьому випадку з периферії повітряного струменя від агрегатів створюється завіса із дрібнорозпиленої води, що покращує метеорологічні умови на робочому місці.

4.2.5.Захист від виробничого шуму і вібрації

Зниження шуму звукоізоляцією досягається шляхом розташування оператора в звукоізолюючій кабіні, звідки він спостерігає та керує технологічним процесом, забезпеченою вікном з 2 - або 3-шаровим склінням, герметичними дверима і спеціальною системою вентиляції. Від впливу прямого звуку оператори захищаються за допомогою екранів, які розташовуються між робочим місцем і прокатним станом.

За допомогою звукоізолюючих перешкод можна знизити рівень шуму на ЗО - 40 дБА. Ефективними звукоїзоліюючими матеріалами є метали, бетон, дерево і т.п.

Для зниження шуму в приміщенні проводять його акустичну обробку, тобто наносять звукопоглинаючі матеріали на внутрішні поверхні, а також розміщують в приміщенні штучні звукопоглиначі.

Інтенсивність вібрацій деталей агрегатів, маючи великий випромінювальний шум поверхні (корпусу агрегатів, кожухів, кришок і т. п.),

зменшують таким шляхом [13]:пристрої гнучких зв'язків між цими деталями і вузлами агрегату,

що викликають вібрації;

заміна металевих деталей на пластмасові або інші матеріали; заміна підшипників кочення підшипниками ковзання у випадках, коли переважаючим шумом є шум підшипників.

Ослаблення вібрації досягається застосуванням віброізоляції віброгасильних підстав під робоче місце оператора.

Віброізоляція є засобом боротьби з вібрацією і шумом. Добре зарекомендували себе віброізолюючі опори, які застосовуються при установці виробничого обладнання. Пружинні амортизатори використовують для віброізоляції майданчиків, вентиляторів тощо.

Робітники, що працюють на машинах і агрегатах, що передають вібрацію на робочі місця, працюють у віброгасильному взутті, у разі необхідності застосовують наколінники.

Для захисту від вібрацій застосовуються способи, основними з яких є: застосування безперервних процесів замість періодичних; застосування виброизолюючих і вибропоглинаючих матеріалів і конструкцій; якісний монтаж обладнання та його динамічне балансування; застосування динамічних гасителів вібрації.

4.3.Заходи з електробезпеки

У цеху велика частина електроустаткування працює при напрузі до 1000 В. Різні контрольно-вимірювальні прилади, пристрій автоматики, штучне освітлення виробничих приміщень живляться від електричної мережі. Застосовують і висока напруга - 6 кВ.

На безпеку електрообладнання суттєво впливають умови виробничого середовища, від яких залежить стан ізоляції і електричний опір тіла людини.

Відділення станового прольоту відноситься до сухого, жаркого і запиленого приміщення, так як відносна вологість 50%, що не перевищує 60%о, температура повітря +33 °С, що перевищує на 3°С і має струмопровідний пил оксиди заліза.

Підвищена температура в приміщенні прискорює старіння ізоляції, що призводить до зниження її електричного опору і навіть до руйнування. При підвищеній температурі повітря знижується опір тіла людини внаслідок поту і зволоження шкіри.

У цеху відділення станового прольоту за ступенем небезпеки ураження електричним струмом відноситься до особливо небезпечних приміщень, оскільки температура повітря перевищує і має струмопровідні підлоги.

Практично всі приміщення, в яких встановлено електрообладнання, за ступенем небезпеки ураження електричним струмом відносимо до приміщень з підвищеною небезпекою, оскільки повітря у приміщення цеху гарячої прокатки має високу температуру, що викликає значні виділення вологи на тілі людини.

При пошкодженні ізоляції електрообладнання напруга може випадково з'явитися на металевих частинах (на корпусі, кожусі, станини і т.д.), яке в нормальному положенні не знаходяться під напругою. При зіткненні з металевими конструкціями, що опинилися під напругою, виникає небезпека ураження електричним струмом.

Нещасні випадки можливі також при дії електричного струму через дугу, безпосередньо зіткненні з відкритими струмоведучими частинами і проводами (випадковому не викликавши виробничою необхідністю, або вплив помилкової подачі напруги під час ремонтів і оглядів), при дотику до металевих частин обладнання, що випадково опинилося під напругою; при торканні струмоведучих частин за допомогою предметів з низьким опором ізоляції; при зіткненні з будівельними деталями конструкцій, що випадково опинилися під напругою; при впливі крокових напруг і ін.

Небезпека електричних поразок створює різноманітне обладнання: електричний привід, електрообладнання підйомно-транспортних пристроїв, електрифікований внутрішньозаводський транспорт, зварювальні апарати, високочастотні та освітлювальні установки, переносний інструмент і т.д.

У цехах з підвищеною температурою повітря використовують наступні заходи захисту від ураження електричним струмом [12]: захист від дотику до струмоведучих частин;захист від дотику до обладнання, що випадково опинилося під напругою; захист від струмів надмірної сили (короткого замикання);

У першому випадку застосовують огорожі та ізоляцію струмоведучих частин, розміщення їх на недоступній висоті, використання зниженої напруги. У другому випадку застосовують захисне заземлення, занулення, пристрій автоматичного відключення електроустановки.

До засобів індивідуального захисту відносяться: ізолююча штанга, ізолюючі кліщі, діелектричні боти, діелектричні рукавички, ізолюючі підставки та ін.

4.4.Заходи з пожежної та техногенної безпеки

Джерелами пожежної небезпеки в цеху гарячої прокатки є: наявність легкозаймистих і горючих рідин, горючих (природний, коксовий і доменний) газів, лакофарбових матеріалів і розчинників, промаслених матеріалів; виділення горючих сумішей і пилу в процесі виробництва на агрегатах і вентиляційних установках; іскріння в електроустановках і статичну електрику.

Усі виробничі, допоміжні та підсобні приміщення цеху повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння.

Пісок використовується для гасіння невеликих вогнищ загоряння горючих рідин (різні масла, солярки), електрокабелів, електропроводки та ін. Гасіння піском проводити накиданням його на палаючу поверхню. Пісок

також використовується для видалення невеликих патьоків горючих рідин, з метою обмеження розтікання горючих рідин при аварії, захисту цінного

обладнання від дії теплових променів при пожежі (накидання на обладнання).

Повсть використовується для гасіння невеликих вогнищ загорянь. Накидається на палаючу поверхню і ізолює її від кисню, повітря.

Вуглекислота не проводить струм, тому вона може застосовуватися для гасіння пожеж в електроустановках, що знаходяться під напругою до 1000В. У цеху використовуються ручні вуглекислотні вогнегасники ВВ-2, ВВ-3, ВВ-

5, ВВ-8 з балонами ємністю відповідно 2, 3, 5, 8 літрів.

У цеху широко застосовується повітряно-пінна установка. Вона встановлюється для гасіння пожеж в початковій стадії. Її можна успішно використовувати при займанні масла в ваннах, на ділянках потокових ліній виготовлення кріпильних виробів [13].

У цеху передбачена пожежна сигналізація типу ЕПС - електронна пожежна сигналізація, забезпечена термодатчиками і датчиками полум'я.

Поширеним видом зв'язку є пожежна електрична сигналізація, яка забезпечує прямий зв'язок пожежної охорони з об'єктом, що охороняється, не вимагаючи при цьому передачі адреси пожежі.

Пропозиції по організації гасінню пожежі при виникненні надзвичайної ситуації:

- провести розвідку та оцінити обстановку на пожежі;
- встановити наявність людей, яким загрожує небезпека, встановити напрямки та способи евакуації;
- прийняти міри до відключення електромережі;
- при виклику підрозділів пожежної охорони організувати їх зустріч, вказати місце пожежі, пояснити особливості планування будівлі, вказати місце розміщення пожежних гідрантів та пожежних водоймищ;
- допомогти працівникам пожежної охорони в діях по евакуації та захисту матеріальних цінностей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологічних процесів на стані третього покоління НШСГП 2000 та діючих комплексів з ЛПА. Були виділені недоліки та переваги даних станів. У порівнянні із традиційними комплексами МНЛЗ-ШСГП ливарно-прокатні агрегати мають переваги: краща якість виготовленої продукції, зниження енергетичних і економічних витрат, компактність.

2. Виконані розрахунки режиму деформації та енергосилових параметрів прокатки. Розроблено раціональний режим деформації штаби с розмірами 1,0×1200 мм підкату $h_п$=18мм. Визначено, що величина обтиску значно впливає на силу прокатки, крутний момент та потужність прокатки. Також значний вплив на показник тертя має температура прокатки та швидкість прокатки.

3. В експериментальній частині роботи представлено опис та результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану валкових систем,що відображає їх фізичні особливості та дозволяє визначати криві пружних деформацій по довжині бочки робочого валка в контакті зі штабою смугою та виконувати аналіз нерівномірності напруг у міжвалковому контакті.

4. Розглянуті питання охорони праці. Дана характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів та запропоновані заходи з поліпшення умов праці у цеху гарячої прокатки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Василєв Я. Д., Мінаєв О. А Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.

2. Ніколаєв В.О., Мазур В. Л. Виробництво плоского прокату. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 320 с.

3. Ніколаєв, В.А. Горяча прокатка листів та штаб. Запорожье : ЗДІА, 2013. 169 с.

4. Клименко, П.Л. Зміцненя сталі та кольорових металів при холодній та гарячій деформації. Днепропетровск : Пороги, 2011. 187 с. ISBN 978 617 518 133 1.

5. Cook, P.M. The real curves, stress rate of deformation for the steels by reduction. The Institution of Mechanion Engineer, 1957. P. 75 77.

6. Середа Б.П. Прокатне виробництво : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 312 с.

7. Середа Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.

8. Sheyko S., Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T. Thermoplastic processing of structural metallic materials. Experiments, theory and modeling. Cham: Springer, 2024. 112 p. ISBN 978-3-031-73895-1. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73896-8.

9. Laasraoui A, Jonas J. Prediction of steel flow stresses at high temperature and strain rates. *Metall. Trans. A.* 1991. No. 22. P. 1545 1558.

10. Moreira A., Junior J., Balancin O. Prediction of Steel Flow Stresses under Hot Working Conditions. *Materials Research*. 2005. Vol. 8, No. 3. P. 309 315.

11. Яковченко А.В., Пугач А.А., Ивлева Н.І. Аналіз точності відомих методів розрахунку напруга перебігу металу в залежності від хімічного

складу сталі. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2011. № 2(23). С. 69 80.

12. Голінько В.І. Основи охорони праці. *Підручник*. М-во освіти і науки України Нац. гірн. ун-т. 2-ге вид. Д.: НГУ, 2014. 271 с.

13. Чернявська В.О., Дуброва Н.Й. Основи безпечної праці. *Навч. посіб. для здобувачів проф. (проф.-техн.) освіти*. Київ: ТОВ «ПРОПАПІР», 2023. 240 с. ISBN 978-617-95300-0-5.