

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)

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
(перший (бакалаврський) рівень)

на тему Розробка режиму прокатки штаби розмірами 0,5×1050 мм зі сталі 08Ю на неперервному стані холодної прокатки 1680

Виконав: студент 3 курсу, групи 6.1360-с

*Савельєва Валерія Андріївна*

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

Металургія

(шифр і назва)

Керівник Белоконь Ю.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Кругляк Д.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2023 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 перший (бакалаврський) рівень  
перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність 136 металургія  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма металургія  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри **МТЕТБ**

Ю.О. Белоконь

“ 29 ” 12 2022 року

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

Савельєва Валерія Андріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) Розробка режиму прокатки штаби розмірами 0,5×1050 мм зі сталі 08Ю на неперервному стані холодної прокатки 1680

керівник роботи (проєкту) Белоконь Юрій Олександрович д.т.н, професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 29.12.2022 року №1894-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) 19.05.2023

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) Визначення режиму прокатки штаба 0,5×1050 мм, сталь – 08Ю, підкат – 2,3 мм, стан – НСХП 1680

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина, Механічна частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
*Креслення, презентаційний матеріал 14 слайдах (на 14 сторінках)*

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Загальна частина</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Технологічна частина</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Механічна частина</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 03.01.2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>15.05-21.05.23</i>	
2	<i>Реферат</i>	<i>15.05-21.05.23</i>	
3	<i>Загальна частина</i>	<i>20.03-26.03.23</i>	
4	<i>Технологічна частина</i>	<i>27.03-09.04.23</i>	
4	<i>Механічна частина</i>	<i>10.04-16.04.23</i>	
5	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>17.04-23.04.23</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>04.06.2023</i>	

Студент \_\_\_\_\_ *В. А. Савельєва*  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ *Ю.О. Белоконь*  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі 95 с, 13 рис., 3 табл., 27 джерел.

ХОЛОДНА ПРОКАТКА, РЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНИЙ ВІДПАЛ, СТАЛЬ, КОВПАКОВА ПІЧ, МУФЕЛЬ, ШТАБА, КОНВЕКТОРНІ КІЛЬЦЯ, ХОЛОДНОКАТАНИЙ РУЛОН, ВОДНЕВА АТМОСФЕРА

Мета роботи – розробка заходів для підвищення продуктивності та зниженню витрат ковпакових печей у цеху холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь».

Метод розрахунків – стандартні методики розрахунків у прокатному виробництві

Виконаний розрахунок раціональних режимів деформації і енергосилових параметрів прокатки штаби товщиною 0,5x1050 мм зі сталі 08Ю на неперервному стані холодної прокатки 1680. Проаналізовано і систематизовані основні фактори, що визначають показники роботи цеху холодної прокатки. В роботі запропоновані продовжити подальше впровадження печей «Ебнера» на ділянці термічної обробки ЦХП. Відпал рулонів у ковпакових печах фірми «Ебнер» економічно вигідний, відпалені рулони мають більш якіснішу поверхню, у процесі експлуатації ковпакових печей фірми «Ебнер» виконуються розробки для ще більшого покращення отриманих результатів відпалу.

## ЗМІСТ

Вступ .....	6
1 Загальна частина.....	7
1.1 Загальна характеристика цеху.....	7
1.2 Досвід застосування ковпакових печей .....	9
1.3 Автоматизація ділянки відпалу цеху холодної прокатки .....	18
1.4 Застосування нових методів в процесах відпалу .....	20
2 Технологічна частина .....	40
2.1 Розрахунок раціонального режиму прокатки і енергосилових параметрів прокатки штаби товщиною 0,5x1050 мм зі сталі 08Ю .....	40
2.2 Розрахунок продуктивності прокатного стану НСХП 1680.....	57
2.3 Практична цінність отриманих результатів .....	60
3 Механічна частина.....	71
3.1 Розрахунок на міцність станини робочої кліті.....	71
3.2 Розрахунок тихохідного натискного механізму .....	77
4 Охорона праці та техногенна безпека.....	84
4.1 Система охорони праці на ПАТ «Запоріжсталь».....	84
4.2 Вимоги безпеки для робітників термічного відділення.....	85
Висновки .....	91
Перелік джерел посилання .....	93

## ВСТУП

З огляду на, що ковпакові печі ще значний час будуть залишатися основним засобом для одержання відпаленого холоднокатаного листа в Україні і той факт, що створено сучасну водневу технологію відпалу, що різко підвищує конкурентноздатність ковпакових печей до агрегатів безперервного відпалу, а також зрослі винятково жорсткі вимоги до зниження питомих витрат енергоносіїв, технічне переозброєння відділення ЦХП здобуває першорядне значення. Більшість азотних ковпакових печей фізично зношені і морально застаріли. Переоснащення цього величезного парку вимагає створення більше гнучкої технології відпалу: воднево-азотної.

В основному ковпакові печі застосовуються в тих випадках, коли тривалість циклу термообробки дуже велика, і служить для масової термообробки (ТО), тому в пічному відділенні розташовують велика кількість печей (стендів), іноді кілька сотень штук. Найбільш тривалим у циклі термообробки є період охолодження, що в 2-3 рази перевищує період нагрівання і витримки, (це стосується печей з азотним середовищем радянського виробництва, на сучасних печах період охолодження в кілька разів менше періоду відпалу). Тому один нагрівальний ковпак обслуговує кілька стендів .

ПАТ "Запоріжсталь" має у своєму складі цех холодного прокату з відділенням ковпакових печей для термообробки рулонів по азотної, і водневої (білої) технології відпалу: 285 стендів відпалу в азотному середовищі й 18 стендів відпалу у водневому середовищі. Також у цей момент ведуться роботи з введення в експлуатацію нового блоку №12 вітчизняного виробництва із сучасною технологією охолодження захисного середовища в спец. холодильниках.

# 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

## 1.1 Загальна характеристика цеху

Цех холодної прокатки (ЦХП) призначений для виготовлення холоднокатаної продукції з вуглецевої, легованої і нержавіючої сталі розмірами:

- листи холоднокатані: 0,5 - 2,0×850 - 1500×1400 - 3800 мм;
- листи гарячекатані труєні: 1,0 - 3,0×1000 - 1500×1800 - 4200 мм;
- штаба холоднокатана в рулонах: 0,5 - 2,0×850 - 1550 мм.

У цеху холодної прокатки № 1 на неперервному чотирьохкільтовому стані 1680, двох однокільтових реверсивних станах 1680 і 1200, двадцятивалковому стані 1700 і двох неперервних вузькоштабових чотирьохкільтових станах 450 і 650 виробляється холоднокатаний лист, штаби і стрічки з вуглецевої, низьколегованої, легованої і нержавіючої сталі.

Цех оснащений засобами для дресування, поперечного і подовжного різання, що забезпечують постачання холоднокатаного прокату товщиною від 0,2 до 2,0мм, шириною від 10 до 1500 мм і довжиною листа до 4000 мм, а також рулонів масою до 14,0 тонн.

Цех складається з наступних відділень: травильне, прокатне, термічне, дресировальне, відділення нержавіючих сталей і жерсті. Схема цеху представлена на рис. 1.1.

Травильне відділення призначене для зняття окалини.

Прокатне відділення призначене для прокатки металу на задану товщину. До складу прокатного відділення входять неперервний чотирьохкільтовий стан 1680, а також реверсивні стани 1680 і 1200, і ділянка підготовки валків.

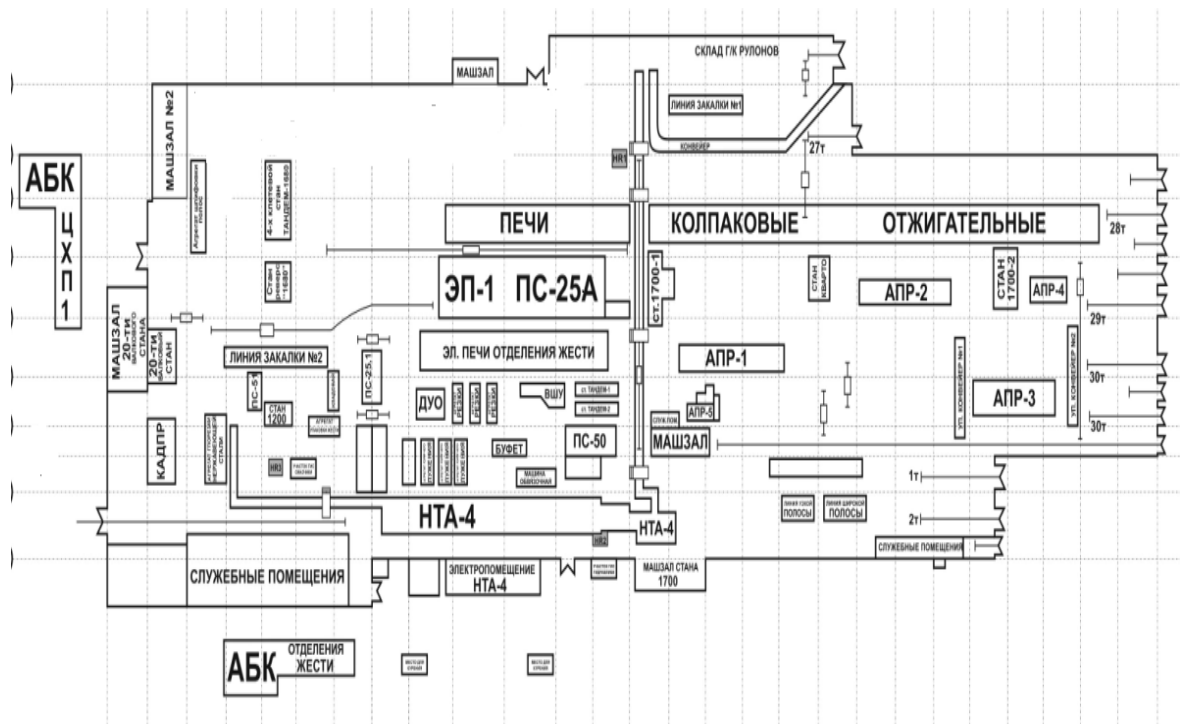


Рисунок 1.1 – План ЦХП ПАТ «Запоріжсталь»

Неперервний чотирьохквіттьовий стан 1680 складається з 4-х послідовно розташованих клітей кварто, що мають у своєму складі два опорних і два робочих валка, а також допоміжного устаткування: провідного прийомного пристрою, поворотного столу, розмотувача, моталки барабанного типу та ін. Реверсивний стан 1680 складається з кліті кварто й обслуговуючого її устаткування: конвеєра, що підводить, перекидача, розмотувача, моталки. Реверсивний стан 1200 складається з 4-х валкової кліті й обслуговуючого її устаткування, розмотувача, правильно-тягнутої машини, плоского проводкового столу, двох моталок.

Цех по виробництву нержавіючого листа оснащений комплексом агрегатів для виробництва холоднокатаного нержавіючого листа товщиною 0,8-2,0мм, що включає в себе неперервні гартівні агрегати № 1 і № 2, неперервний травильний агрегат № 3, агрегат шліфування гарячекатаних штаб; 20-валковий стан, агрегат дресирування, виправлення, різання.

У термічному відділенні проводиться відпал холоднокатаних рулонів в одностопних ковпакових печах, у захисній атмосфері.



Максимальна вага садки – 52 т (3-5 рулону). У відділення встановлено 249 стендів, які згруповані у 16 блоків. Блоки мають автономну систему подачі природного і захисного газів, повітря, електроенергії, води. Кожен стенд обладнаний циркуляційним вентилятором для створення конвекції захисного газу під муфелем. Також печі обладнані контрольно-вимірною апаратурою, що забезпечує задані режими відпалу. У лютому 2006 року введені в експлуатацію 18 нових термічних печей фірми «Ебнер», у яких виробляється відпал листового прокату для додання йому більш високих якісних характеристик. Нові печі дозволять приступити до випуску автолиста. У цих печах відпал прокату здійснюється в середовищі сухого водню, що забезпечує такі механічні властивості, як висока чистота поверхні, пластичність і висока корозійна стійкість. У цілому за рік у нових печах фірми "Ебнер" буде відпалюватися до 300 тисяч тонн прокату.

Дресирувальне відділення складається з двох дресирувальних станів 1700-1 і 1700-2, трьох агрегатів поперечного різання АПР-1, АПР-2, АПР-3 і одного агрегату подовжнього різання АПР-4, стану «кварто» і двох конвеєрів для упакування пачок металу. Дресирування забезпечує поверхневий наклеп, зменшується коробчатості і хвилястості.

Відділення жерсті складається з таких ділянок: термічного, прокатного, що складає з двох неперервних чотирьохкільтових станів 450 і 650.

Ділянка підготовки валків містить у собі два верстати для обдирання і два верстати для шліфування валків, машину для насічки поверхні, площадки для ревізії подушок і підшипників і стелажі зборки - розбирання валків.

## **1.2 Досвід застосування ковпакових печей**

Робота ковпакових печей на водневій основі забезпечує одержання унікальних по якості поверхні властивостей готового листа при низьких питомих витратах енергії й захисного газу в сполученні з високою інтенсивністю процесу. Печі з водневої технології відпалу випускаються

поруч що успішно освоюють наш ринок закордонних фірм, у їхньому числі "Ебнер" (Австрія) і "ЛОІ" (Німеччина). В Україні водневі ковпакові печі (без циркуляції атмосфери), розроблені Харківським відділенням ВНШЕТО, працюють на НЛМК при одержанні електротехнічних сталей.

Основна область застосування ковпакових печей - світла термічна обробка рулонів сталевих штаби. Ковпакові печі класифікують по кількості стіп (з листів, рулонів, бунтів) металу, які розташовують на одному стенді й накривають одним ковпаком: одне-, двох-, тристопні, багатостопні. Основним типом печей є одностопная пекти для відпалу рулонів штаби. Під муфелем розміщують кілька рулонів по висоті. Циркуляційний вентилятор подає захисний газ знизу в зазор між муфелем і рулонами. Для доступу захисного газу до торцевих поверхонь рулонів між ними встановлюють конверторні кільця, у яких є канали змінного перетину. Через ці канали захисний газ попадає у внутрішні порожнини рулонів, обмиває їх і повертається в циркуляційний вентилятор. Дослідження таких печей показали, що в найгірших умовах нагрівання і охолодження перебуває нижній рулон, тому всі розрахунки теплообміну роблять стосовно до нижнього рулону. У ковпакових печах кошу, установлену на стенді і закриту муфелем, піддають світлій термічній обробці, що включає періоди нагрівання, витримки і охолодження. У періоди нагрівання і витримки на стенд встановлюється нагрівальний ковпак, у якому є пальники. Під муфель подають захисний газ із примусовою циркуляцією для прискорення й підвищення рівномірності нагрівання. Після закінчення періодів нагрівання і витримки нагрівальний ковпак знімають і переносять на наступний стенд, а коша під муфелем починає прохолоджуватися. Для прискорення охолодження застосовують різні засоби: поливання муфеля водою, обдування муфеля повітрям під ковпаком прискореного охолодження, охолодження захисного газу у водяних холодильниках. При нагріванні металу в ковпаковій печі тепло до зовнішньої поверхні садки передається випромінюванням від муфеля і конвекцією від захисного газу, а до

зовнішньої поверхні муфеля випромінюванням і конвекцією від продуктів згоряння і випромінюванням від кладки нагрівального ковпака. При охолодженні, навпаки, тепло від садки передається конвекцією до захисного газу і випромінюванням до муфеля, а від муфеля в навколишнє середовище.

Застосування ковпакових печей для відпалу холоднокатаної смуги представлялося малоперспективним до 1980-х років. Вважалося, що майбутнє за технологією безперервного відпалу смуги. Ситуація різко змінилася з упровадженням висококонвективної технології відпалу і чистого водню як контрольоване захисне середовище в ковпакових печах, так званій технології НРН (High Performance Hydrogen — високоефективний водень). В даний час в експлуатації знаходиться більше 3000 установок відпалу НРН. Ряд наукових досліджень підтвердив, що сучасні ковпакові печі цілком ефективні і можуть розглядатися як приваблива альтернатива печам безперервної дії завдяки своїй більшій гнучкості в експлуатації, більш низьким витратам — капітальним, експлуатаційним і на техобслуговування, а також можливості модульного нарощування і поліпшення якості сталі для глибокої витяжки.

Група LOI — визнаний лідер в області ковпакових установок НРН для відпалу сталевих смуг — їй належить більше 53 % світового ринку. Однією з складових успіху можна рахувати системи охолодження п'яти типів, пропонувані фірмою LOI: традиційні повітряного (Air); форсунки (струменевого) (Jet); розбризкуванням води (Spray); байпасного (за допомогою обвідного контура) — теплообмінники в поєднанні з повітряним (Bypass) або форсункою охолодженням (Bypass + Jet). По ступеню розповсюдження в світі на системи перших типів доводиться 8 %, на систему водяного охолодження — 30 %, інше — на теплообмінники.

З повітряних охолоджувальних систем найбільш ефективна система охолодження форсунки (струменевого). Сучасні системи такого охолодження засновані на ефекті удару потоком повітря на муфель під прямим кутом, внаслідок чого обурюється ламінарний прикордонний шар і

посилюється теплообмін. При цьому коефіцієнт теплообміну в 3 рази більше, ніж при звичайному повітряному охолодженні. Ковпак охолодження форсунок оснащений двома або трьома радіально-потокowymi вентиляторами, які встановлюються у верхній частині охолоджуючого ковпака, і великою кількістю форсунок, розміщених по всій його висоті. Форсунка-охолоджуючі ковпаки також придатні для поліпшення характеристик відпалу на існуючих установках. Відомий приклад заміни системи повітряного охолодження на форсунку, внаслідок чого продуктивність (по відпалу і охолодженню) зростає на 8 %.

Охолодження розбризкуванням води є поєднанням традиційного повітряного або форсунок охолодження з розбризкуванням води на муфель. Його температуру спочатку необхідно знизити шляхом повітряного охолодження, щоб зменшити паротворення. Коефіцієнт теплопередачі водяної плівки на внутрішній поверхні вельми високий, що забезпечує кращі характеристики процесу в порівнянні з повітряним охолодженням. До якості води при такому охолодженні пред'являються строгі вимоги. Основні переваги охолодження розбризкуванням - низькі капітальні витрати і високі технологічні показники.

В районах з дуже низькими кліматичними температурами не рекомендується встановлювати могутні ковпаківі печі з охолодженням розбризкуванням води, оскільки може відбутися заledenіння цехових конструкцій унаслідок утворення водяної пари.

Принцип байпасного охолодження полягає у відведенні частини потоку захисного газу, що проходить підлогу муфелем, для охолодження в обвідному контурі, оснащеному зовнішнім газовим/водяним теплообмінником. Швидкість охолодження в байпасній системі можна змінювати в широких межах. Муфель також охолоджується зовні за допомогою охолоджуючого ковпака (паралельно-потокowe або форсунка охолодження).

У разі байпасного охолодження можна використовувати гладкостінні муфелі, вартість які значно менше гофрованих, а термін служби майже удвічі довше, ніж при охолодженні розбризкуванням, оскільки вони піддаються дії повітря, а не води [8].

Аналіз роботи ковпакових печей показав, що їх систему опалювання невчинена, а інжекційні пальники мають такі недоліки, як залежність продуктивності і стійкості роботи від тиску, вузькі межі регулювання. Крім того, вони володіють короткими, зосередженими факелами, що приводять до погіршення експлуатаційних характеристик і виходу муфелей з ладу.

Значна енергоємність металургійного виробництва при відносно високій вартості енергоресурсів обумовлює виняткову важливість енергозбереження на всіх переділах. Велика кількість ковпакових печей робить неможливою їх швидку заміну на нові агрегати, що реалізують більш прогресивну водневу технологію. Тому необхідно удосконалювати існуючі агрегати і технології на основі їх модернізації і реконструкції, розробки і упровадження методів і засобів, що забезпечують підвищення ефективності їх роботи, і перш за все зниження енерговитрат.

Робота будь-яких печей в значній мірі залежить від роботи сожигательних пристроїв. Таким чином, зниження витрати природного газу при роботі ковпакової печі може бути досягнутий застосуванням досконаліших горелочних пристроїв. На існуючих нагрівальних ковпаках печей термічного відділення ЛПЦ-5 ММК, включаючи і ковпаки, розроблені фірмою «Ебнер», пальничні пристрої розташовані тангенціально по колу в нижній частині ковпака. На нагрівальних ковпаках старої конструкції 16 інжекційних пальників розташовано в два яруси в шаховому порядку.

На нагрівальних ковпаках фірми «Ебнер» 10 дводротяних пальників також розташовані в два яруси. Площа контакту муфеля і факела визначається розмірами перетину факела і кутом, під яким він направлений по відношенню до циліндрової поверхні муфеля. При тангенціальному розташуванні пальників, як інжекційних, так і дводротяних, простір

можливих тангенціальних і близьким до них напрямів осі пальника обмежено. Цей обмежений простір «ковпак - муфель» (радіус внутрішньої поверхні футеровки ковпака 1505 мм, радіус муфеля 1150 мм) не дозволяє рівномірно і активно використовувати факел пальничного пристрою, що приводить до неефективної організації теплообміну.

Для інтенсифікації теплообміну необхідно прагнути збільшення поверхні контакту між факелом і муфелем в системі теплообміну «муфель – продукти» згорає внутрішня поверхня ковпака». Це можна забезпечити за рахунок зміни орієнтації пальника на похило-тангенціальну. При такому розташуванні пальника її вісь направлена тангенціально до поверхні муфеля і нахилена вниз на деякий кут  $\varphi$ .

Збільшити поверхню контакту можна також за рахунок збільшення довжини факела. Проте, одним з недоліків інжекційних пальників, вживаних в нагрівальних ковпаках в ЛПЦ-5, є мала довжина факела. Крім того, коефіцієнт витрати повітря інжекційних пальників напряму залежить від витрати газу через пальник і часто приймає небажані значення. При цьому необхідно врахувати, що коефіцієнт витрати повітря визначається в першу чергу ступенем змішення палива і окислювача, який у свою чергу залежить від схеми змішення і кінетичної енергії потоків, що закінчуються.

Для забезпечення максимального змішення природного газу з потоком повітря необхідно забезпечити максимально можливу енергію газового потоку. В даному випадку енергія газового потоку є функцією швидкості подачі газу. Найістотніше збільшення енергії забезпечується за рахунок досягнення надкритичних швидкостей газового потоку, що досягаються в основному за рахунок застосування сопел Лавалю. Для подібної ж мети служать сопла з центральним тілом. Вони значно коротше за звичайні сопла Лавалю, простіше у виготовленні і, на відміну від останніх, дають дуже невелике зниження відносного імпульсу при тиску значно нижче за розрахунковий, оскільки через відсутність стінок в надзвуковій частині не відбувається перерозширення газу.

Розроблений високошвидкісний пальник з центральним тілом (ПЦТ) відповідає цим вимогам. Конструкція сопла пального пристрою аналогічна соплу з центральним тілом турбореактивного двигуна (ТРД). В такому соплі газ закінчується з кільцевого каналу між центральним тілом і обичайкою. Розмір критичного перетину між крапками А і С може регулюватися подовжнім переміщенням центрального тіла. В цілях забезпечення надкритичних швидкостей закінчення газового потоку використовується сопло з центральним тілом, в якому вихідний перетин утворений вихідним конічним соплом 9 і відповідним йому найбільшим перетином центрального тіла специфічної форми з двостороннім конусом 1, який забезпечує якнайповніше зменшення що закінчується через сопло газового потоку з ежектуючим повітрям. Газ, проходячи через вхідний патрубок, потрапляє в газовий тракт розрахованої довжини і через вихідне конічне сопло 9 закінчується з надзвуковою швидкістю. Потрапляючи на поверхню вихідного конуса центрального тіла 1, він ежектуює повітря, що подається через повітряну трубу 2. Наставний гвинт 4 служить для точного позиціонування центрального тіла за допомогою штока 7 з метою створення надкритичної швидкості закінчення газового потоку з сопла. Для центрування положення газового каналу служать чотири лопаті 8.

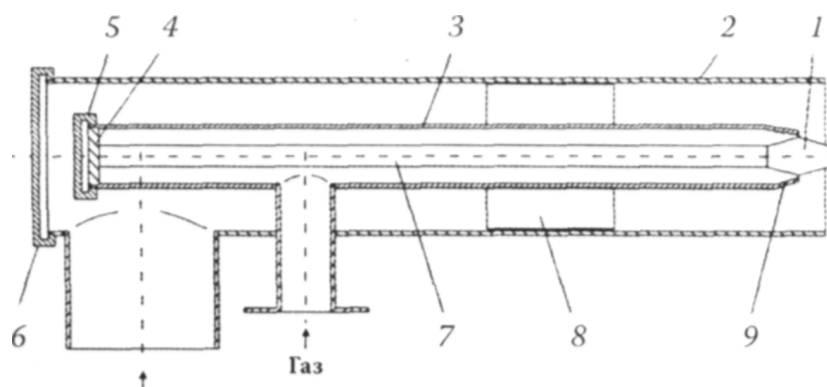


Рисунок 1.2 – Схема пального пристрою з центральним тілом ПЦТ-К: 1 - центральне тіло з двостороннім конусом; 2 - труба повітряного тракту; 3 - труба газового тракту; 4 - наставний гвинт; 5 - герметична кришка газового тракту; 6 - кришка повітряного тракту; 7 - шток; 8 -центруючі лопаті; 9 - конічне сопло газового тракту

У відсутності вогняного стенду для випробування пальничних пристроїв було вирішено проводити дослідження в термічному відділенні ЛПЦ-5, використовуючи паливо і повітря безпосередньо з працюючої ковпакової печі. Це дозволяло використовувати можливості зміни витрат палива і повітря відповідно до існуючих режимів відпалу. Випробування пальничного пристрою проводили зовні робочого простору ковпакової печі, тому програма випробувань передбачала дослідження роботи пальника ГЦТ-К при використуванні різного роду насадок, імітуючих протитиск в печі, а також при використуванні імітатора пальничного каналу ковпакової печі.

У разі створення невеликого протитиск при витраті палива менше номінального вдалося отримати стійке горіння палива при достатній довжині факела. Вона відповідала розрахунковій довжині, отриманій на основі моделювання аеродинаміки газового тракту, і складала близько 500-600 мм. Збільшення витрати палива до номінального при одночасному збільшенні витрати повітря не приводить до порушення стійкості процесу горіння. При цьому формується більш раціональна форма факела без зриву полум'я. Голубий колір полум'я факела свідчить про те, що горіння палива відбувається з коефіцієнтом витрати повітря, близькому до одиниці. Температура факела приблизно 1300-1400 °С. Кут розкриття отриманого факела складає 15°-18°, що добре узгоджується з результатами фізичного моделювання аеродинаміки газового тракту. Таким чином, пальник ПЦТ-К забезпечує спалювання палива при коефіцієнті витрати повітря близькому до одиниці, характеризується стійкістю горіння факела (без зриву полум'я). Температура факела тороїдальної форми лежить в межах 1300-1400 °С. Невеликий кут розкриття факела 15°-18° дозволяє розташовувати його в обмеженому просторі «ковпак -муфель» без прямого контакту з поверхнею муфеля [9].

В процесі відпалу кількість тепла, яке переноситься захисним газом у торцевих поверхнях рулонів в стогоні, залежить від величини переміщуваних об'ємів газу; і його температури, а теплопередача від нагрітого газу до



холодного металу визначається товщиною і шириною смуг, якістю їх намотування в рулони (густина, розкид витків), рухом газу під муфелем і в межвиткових просторах рулону, а також розподілом по каналах конвекторних кілець і кришок.

Про рух захисного газу можна судити по величині надмірного тиску в різних точках подмуфельного простору. В справжній статті розглядається характер тиску газу при використуванні конвекторних кілець і кришок різних конструкцій в декількох варіантах формування садки з 22 — 24-т рулонів (зовнішній діаметр — в межах 2000 мм, діаметр внутрішнього отвору 600 мм) смуги шириною 1020 мм

Для всіх варіантів формування садін з чотирьох рулонів надмірний тиск захисного газу в цеховому газопроводі був однаковим: 1,08 - 1,13 кПа. а тиск газу при непрацюючому і працюючому відцентровому вентиляторі на штуцері вихлопного патрубку стенду печі складав відповідно 0.65 і 1,13 кПа. Тиск виміряли тільки при працюючому вентиляторі моделі УЦВ 132201000 ПС продуктивністю 3,3 м<sup>3</sup>/с. Для проведення роботи в стінці спеціально підготовленого муфеля передбачили п'ять щілистих отворів розмірами 15x150 мм уздовж вертикальної складової на рівнях конвекторних кілець і під дахом муфеля. Отвори ущільнили листовою гумою за допомогою металевих рамок і болтів з гайками; в ній зробили крізні надрізи для введення в канали конвекторних кілець змірної металевої трубки діаметром 8 мм, сполученої з U-образним водяним манометром гумовою трубкою завдовжки 2700 мм Вільний кінець трубки вводили з таким розрахунком, щоб, пройшовши по каналу конвекторного кільця він опинявся в центральній частині осьового каналу стопи рулонів. Це положення відповідало початку визначення тиску захисного газу. Чергове вимірювання тиску починалося після переміщення трубки до стінки муфеля на 50 мм, що відповідало розмітці на поверхні трубки [10].

## 1.2 Автоматизація ділянки відпалу цеху холодної прокатки

Складовою будь-якого технологічного процесу є автоматизація. Об'єктом автоматизації стала ділянка відпалу, який складається з трьохстендових двозонних ковпакових електропечей встановленою потужністю 245 кВт кожна. Нагрівачі розміщені в ковпаку. Кількість печей більше двадцяти. Партія металу з декількох рулонів ("садка") масою до 12 т поміщається під муфель. Щоб уникнути зіткнення відпаленого металу з навколишньою атмосферою простір під муфелем продувається захисним газом протягом всього періоду обробки, включаючи ступінь охолодження. Для контролю температури усередині ковпака використовуються термоелектричні перетворювачі типу ХА (К), розміщені у верхній і нижній зонах ковпака. Для відпалу експериментальних садків металу ряд печей обладнаний можливістю підключення додаткових гнучких термопар, які встановлюються між рулонами металу. Графік відпалу може бути багатоступінчатим. Тривалість етапів термічної обробки (нагріву, витримки і охолодження) залежить від маси садки, марки металу і розмірів смуги; загальна тривалість всіх етапів термічної обробки досягає в деяких випадках 100 ч. Від типу відпаленого металу залежить і температура нагріву садки на кожному етапі. Графік відпалу також називається циклограмою. Час охолодження металу є складовою частиною циклограми.

Після закінчення відпалу ковпак знімається і переноситься на наступний стенд, де під муфелем знаходиться підготовлена до відпалу садка. Садки металу, що пройшло термічну обробку, залишається на стенді, де остигає разом з муфелем на повітрі до 150 - 200°C. АСУ ТП ділянки відпалу виконує наступні функції:

- збір і відображення інформації;
- дистанційне керування;
- автоматичне регулювання;
- діагностику стану устаткування;

- видачу аварійної і попереджувальної сигналізації;
- архівацію даних;
- створення і видачу звітів про наявність металу і діяльності ділянки за поточні зміну і доба;
- передачу даних на сервер підприємства для формування звітів про рух металу по ділянці відпалу.

Система має трьохрівневу структуру. Перший рівень включає датчики, первинні перетворювачі і виконавчі механізми. Другий рівень включає управляючі контролери з платами введення-виводу і іншим допоміжним устаткуванням. Третій рівень складається з операторських станцій. Перший і другий рівні зв'язані між собою за допомогою уніфікованих сигналів. Другий і третій рівні обмінюються інформацією за мережним стандартом RS - 485. Взаємодія між основною (ведучою) і резервною (відомою) станціями здійснюється через сіть передачі даних стандарту Ethernet. Один контролер прочитує поточні значення входних сигналів і управляє виконавчими механізмами двох печей. Поточні значення параметрів передаються контролером на операторську станцію, де вони обробляються і архівуються. Всі програми по збору даних з датчиків і управлінню виконавчими механізмами, управляюча циклограма, а також система аварійного відключення печей знаходяться в контролері. У разі втрати зв'язку контролера з управляючою станцією контролер веде процес самостійно відповідно до введеною раніше циклограми до повного її виконання. Для переходу на стадію охолодження контролер здійснює відключення печі. Відключення печі проводиться також при значному відхиленні процесу відпалу від регламенту або виході з ладу основних датчиків. Для рівномірного навантаження трансформаторів, що живлять печі відпалу, до ПО контролера реалізована програма оптимізації послідовності включення печей.

Взаємодія персоналу з системою здійснюється через станції оператора, розташовані в приміщенні операторської АСУТП. в цьому ж приміщенні

знаходяться шафи контролерів. Одна з операторських станцій є основною (ведучою), інша (відома) виконує функції додаткового робочого місця. Основна станція здійснює обмін інформацією з контролерами, архівує дані, формує аварійні і попереджувальні повідомлення, звіти про роботу ділянки за поточні зміну і доба, а також довідку про наявність металу на ділянці відпалу і складі. З основної станції вводиться і при необхідності коректується управляюча циклограма. Окрім циклограми оператор процесу (старший терміст) вводить основні дані (паспорт) по кожному завантаженому протягом зміни рулону (маса, ширина, товщина, марка металу і т.д.). На підставі цієї інформації формуються звітні документи про діяльність ділянки відпалу [13].

### **1.3 Застосування нових методів в процесах відпалу**

Ефективність теплообміну в печі, тобто посилення передачі теплоти захисним газом від муфеля до металу і навпаки, визначається у великій мірі інтенсивністю і схемою циркуляції газу. Він подається циркуляційним вентилятором від низу до верху, нагрівається від муфеля і по конвекторним кільцях поступає у внутрішню порожнину стопи рулонів і далі на всмоктується вентилятором.

В термічному відділенні листопрокатного цеху № 5 ВАТ ММК прийнята наступна схема упаковки металу для відпалу: між рулонами укладають конвекторні кільця з внутрішнім отвором діаметром 750 мм, а на верхній рулон кладеться кришка з отвором діаметром 300 мм, яка забезпечує додаткову циркуляцію захисного газу (варіант 1), при цьому випереджаючим по нагріву є саме він, а відстаючим — нижній рулон. Щоб прискорити його прогрів і забезпечити рівномірний нагрів по всьому об'єму садки, застосували схему упаковки з кришкою з внутрішнім отвором діаметром 300 мм під верхнім рулоном (варіант 2).

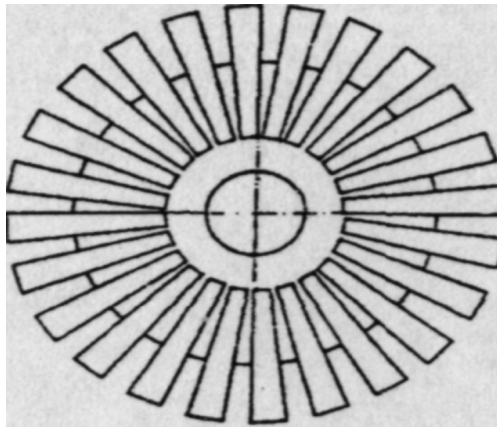


Рисунок 1.3 – Конвекторна прокладка з кільцевою вставкою

На дослідченому стенді з розміщенням рулонів по 23 т кожний і оснащенням додатковими термопарами для вимірювання температури по товщині намотування рулонів і висоті садки провели експерименти по відпалу металу з різною упаковкою [17].

Технологія виробництва тонкого високоякісного листа для глибокої витяжки передбачає гаряче прокатки сталі на смугу товщиною 2-4 мм, холодне прокатки з сумарним обтисканням 50-70 %, Рекристалізаційний відпалі дресирування для усунення майданчика текучості на кривій розтягування. Рекристалізаційний відпал рулонів холоднокатаних смуг проводиться в ковпакових печах за двохступеневим режимом (з попередньою витримкою при 550 °C перед нагрівом до 680-700 °C) і значною мірою визначає кінцеві механічні властивості листової сталі і її кристалографічну текстуру. Велика тривалість відпалу (десятки годинника) і наявність значного градієнта температури по перетину рулону визначають трудність оптимізації режиму відпалу рекристалізації за наслідками промислових експериментів.

Досліджені закономірності формування структури і текстури холоднокатаної сталі 08Ю при лабораторному моделюванні відпалу в ковпакових печах, для оптимізації режиму відпалу запропонований математичний опис кінетики повернення і рекристалізації.

Лабораторне моделювання відпалу рекристалізації холоднокатаної сталі можна проводити двома шляхами:

- а) прямим відтворенням в лабораторних умовах режиму нагріву, витримки і охолодження рулону в ковпакових печах;
- б) ізотермічному відпалом при певних температурах, які забезпечують ті ж структурні перетворення, що і при нагріві (охолодженні) із заданою швидкістю.

Оскільки в лабораторних умовах температуру ізотермічного відпалу регулювати значно простіше, ніж швидкість нагріву або охолодження, то другий спосіб є переважним.

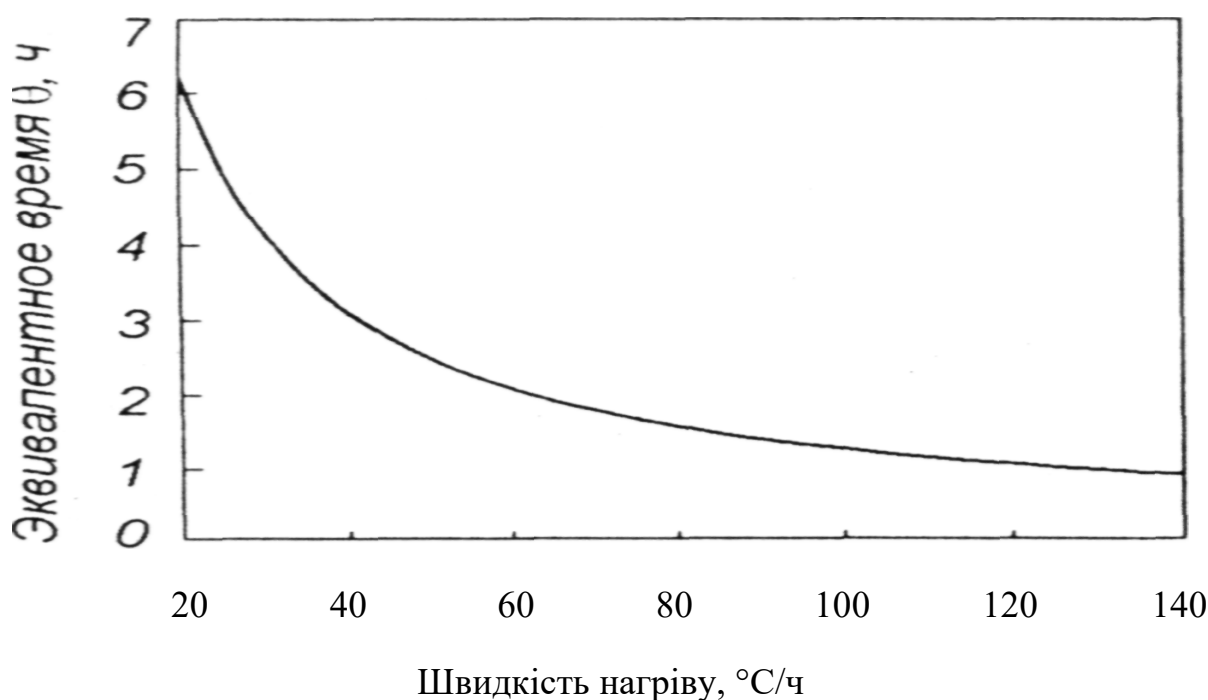


Рисунок 1.4 – Залежність приведенного до  $t_0 = 500^{\circ}\text{C}$  еквівалентного часу повернення  $\Theta$  від швидкості нагріву рулону  $W$  з  $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$  до  $t_2 = 550^{\circ}\text{C}$

Температура початку рекристалізації холоднодеформованих низьковуглецевих сталей перевищує  $550^{\circ}\text{C}$ , тому слід чекати, що в процесі нагріву і витримки на першому ступені відпалу ( $500\text{-}550^{\circ}\text{C}$ ) рекристалізації в холоднокатаному металі одержують розвиток тільки процеси повернення.

Подальший нагрів і витримка металу на другому ступені відпалу приводять до розвитку первинної і збірної рекристалізації фериту [18].

Разом з тим, отриманий результат не тільки підтверджує правильність підходу і вибраної генеральної лінії на реконструкцію діючих газових печей відпалу прокату. Він став можливим також унаслідок застосування раціональних умов планування і проведення комплексу робіт по модернізації діючого устаткування.

Це підтверджується нижче наведеним практичним прикладом незначущого фактичного впливу деяких проведених в ЦХП-1 заходів, що забезпечують можливості використання при відпалі рулонів і садки збільшеної маси і прямо направлених на підвищення продуктивності стендів печей відпалу інтенсивним шляхом.

Так, печі (стенди) №16-60 (блоки стендів 2, 3 і 4, введені в експлуатацію, відповідно, в 1972, 1971 і 1964 роках), в 1987-1990 рр. були реконструйовані з метою забезпечення можливостей збільшення маси садки до 45-50 т (4-5 рулонів в стопі).

Аналогічні умови для збільшення маси садки рулонів були створені також і на стендах блоків 15-19 за рахунок збільшення висоти муфелей до 5650 мм (як на стендах блоків 2-4), і на стендах блоків 5-10 за рахунок збільшення висоти муфеля до 5100 мм. Проектна висота муфеля 4650 мм залишилася лише на стендах блоків 11-12.

При цьому очікувалося збільшення середньої продуктивності одного стенду по всьому відділенню приблизно на 20 % (на 0,1 т/год), що підтверджують результати багаторічної роботи блоку №2, на якому такі показники із збільшенням маси садки рулонів були досягнуті. Середня продуктивність одного стенду і середня маса садки рулонів в термічному відділенні за останні більш ніж 20 років змінилася практично трохи.

Встановленими основними причинами недостатньої реалізації викладеного вище заходу є не тільки зовнішні чинники типу підвищення вимог до якості прокату, особливо до якості його поверхні, у тому числі по

наявності таких поверхневих дефектів, як "злам", "сажа". Є і "внутрішні причини", які прямо і комплексно впливають на ефективність модернізаційних заходів, що проводяться на окремих технологічних ділянках переділу.

Якість прокату визначається хімічним складом сталі і умовами обробки на металургійному переділі, у тому числі і режимами термообробки, які повинні призначатися залежно від складу сталі і від умов підготовки структури прокату до термообробки.

При цьому, вище вказані особливості побудови кризової технології виробництва високоякісного холоднокатаного прокату з низьковуглецевої сталі (наприклад, що виготовляється по ДЕСТ 16523 і аналогічного йому, виключаючи холоднокатаний прокат з підвищеними вимогами по штампованості категорії витяжки ОСВ і особливо ВОСВ за ДЕСТ 9045) допускають застосування швидкості його нагріву ( $V_{\text{нагр}}$ ) при відпалі рекристалізації не менше 80-120 °С/год.

Проте, на комбінаті найістотніше "навантаження" по забезпеченню більшості груп якості (у тому числі і якості поверхні) холоднокатаного прокату традиційно покладають на режими його відпалу.

Зокрема, не викликає сумнівів, що відповідальними за появу дефекту "злам" є як прокатний переділ, так і термообробка. Проте, в основному, через вимушене використання недосконалого прокатного устаткування на комбінаті максимально компенсують причини появи цього дефекту на прокаті товщиною менше 0,9 мм за рахунок: застосування більш тривалого за часом режиму відпалу, використання додаткових проміжних витримок (сходинок) при нагріві і зниження температури основної витримки при відпалі. В результаті за останні більш ніж 20 років за статистичними даними з явною тенденцією до збільшення змінився загальний час відпалу: з 69,7 ч в 1977 р. (при найнижчому рівні в 1982 р. - 68 год) до 75,8 і 75,7 годин, відповідно, в 1998 і в 1999 рр. і до 78 ч в 2000 р. (найвищий рівень). При



цьому діюче до модернізації устаткування газових одностопних печей в ЦХП-1 забезпечувало  $V_{\text{нагр}}$  не більше 40 °С/год [19].

Модернізація устаткування ковпакових печей складається з двох етапів. На першому етапі передбачаються істотна модернізація діючих печей відпалу без зміни захисного газу традиційного складу (4-5 % H, і 95 - 96 % N), що використовується, і максимально можлива мінімізація витрат на упровадження заходів в основному шляхом виготовлення і монтажу нових вузлів і пристроїв своїми силами. Другий етап припускає повну заміну частини печей на сучасні і перехід на сухий водень як захисна атмосфера. При цьому основною метою модернізації є інтенсифікація процесів теплообміну при нагріві, витримці і охолодженні з обов'язковим створінням умов для забезпечення необхідної якості металопродукції, а також різке скорочення витрати енергоносіїв.

Результати заздалегідь проведеного аналізу конструктивних і технологічних особливостей діючих в ЦХП-1 засобів термічної обробки показали, що досягнення вказаної мети можливо тільки шляхом збільшення напорності газонагнітаючих вузлів, істотного поліпшення умов теплопередачі і зменшення опору практично на кожному елементі устаткування печей. В ході пошуку конструктивних рішень розробили ряд технічних заходів, опробування і реалізацію яких проводили протягом 2000 - 2002 рр., до яких увійшли наступні розробки:

- направляючий апарат, на якому поліпшена конструкція вхідної ділянки тракту завдяки використуванню організуючого газовий потік спеціального литого трактового кільця, при цьому забезпечується оптимальний розрахунковий зазор між поверхнею кільця і лопатками стендового циркуляційного вентилятора;

- робоче колесо стендового вентилятора із збільшеним числом лопаток вдосконаленої форми;

- нова конструкція конвекторних кілець з використанням каналів змінного перетину (конфузор-дифузор), що створює умови для інтенсифікації

теплообміну між газовим потоком і торцевими поверхнями встановлених в стопу рулонів (об'єм циркулюючого в печі газу збільшився з 11 до 20 тис. м<sup>3</sup>/ч);

- нагрівальні ковпаки з футеровкою з волоконних матеріалів замість легковагої шамотного цеглини. Знижена теплопровідність волоконної футеровки забезпечує зменшення температури кожуха ковпака до 70 - 80 °С проти 115 - 135 °С, а втрати тепла через кожух — приблизно в 3 - 3,5 рази, в результаті не менше ніж на 30 % зростає продуктивність нагрівальних ковпаків і стендів печей при нагріві і витримці і одночасно скорочується тривалість цих циклів відпалу і зменшується витрата природного газу. Встановлено, що завдяки тільки меншій витраті газу економічний ефект від упровадження одного ковпака складає близько 12 тис. грн. в рік (з урахуванням більш високої ціни нової футеровки), тому пошук шляхів подальшого використання потенційних можливостей нової футеровки і заходів, направлених на поліпшення теплової роботи печей, продовжується;

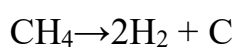
- спосіб і пристрій для примусової подачі (ежектування) повітря в зону горіння природного газу: перші результати показали, що їх застосування дозволяє забезпечити більш ефективну роботу нагрівального ковпака;

- конструкція ковпаків прискореного охолодження (КПО) садки рулонів, які застосовуються після завершення основної стадії відпалу (нагриваючи - витримка), при цьому інтенсифікація охолодження забезпечується трьома малопотужними електричними вентиляторами, що створюють примусову циркуляцію повітря у поверхні муфеля; застосування КПО разом з скороченням тривалості циклу охолодження садки рулонів на 20 - 30 % забезпечує зменшення питомої витрати електроенергії;

- конструкція окремо розташованих стендів прискореного охолодження (СПО), на яких циркулюючим повітрям охолоджуються рулони після розпаковування садки; при цьому тривалість охолодження рулонів перед дресируванням скорочується від 3 - 4 сутків до 30 - 35 годин, внаслідок чого підвищується мобільність і пропускна спроможність відділення [20].

Згідно кінетиці процесів відпалу, при високій швидкості протікання реакції виділення вуглецю стає неможливим її управління. Придушення утворення вуглецевоскладаючих з'єднань можливо шляхом зменшення кількості реагуючих речовин, які є потенційними носіями вуглецю, при забезпеченні малої швидкості протікання реакцій. При аналізі подмуфельної атмосфери встановлено, що основним реагентом, що містить вуглець і сприяючим його виділенню, є група СН (до 40 % СН<sub>4</sub>).

При 200 - 700 °С метан розкладається з виділенням вуглецю за наступною реакцією:



Зменшення ΔС можливо при зниженні змісту вуглецевоскладаючих реагентів в подмуфельному просторі.

Це досягається видуванням газоподібних вуглецевоскладаючих продуктів протягом 30 годин з початку нагріву. Параметр Δt можна збільшити шляхом уповільнення швидкості нагріву при випаровуванні з'єднань, що утворюються. Це забезпечується проміжними витримками в процесі нагріву садки. Існують ще декілька джерел виділення вуглецевоскладаючих з'єднань. Ненасичені жирні кислоти і вільні карбонові кислоти (продукти окислення становить емульсола) і оксиди металів (наприклад, "недотрав") можуть утворювати на поверхні смуги у вогнищі деформації залізне мило, яке в процесі здування прокатної емульсії не віддаляється і в процесі відпалу також є джерелами вказаних з'єднань. Іноді під "сажею" на поверхні виявляються оксиди, які гарячим продуванням при термічному відпалі не усуваються. Окрім метану, при відпалі утворюються гази з неграничним зв'язком (етилен, пропиляний) і ароматичні вуглеводні. При конденсації цих газів утворюються полімерні продукти типу смол, які після сублімації при відпалі осідають на кромці і також дають "наліт сажистих". Зменшити кількість і концентрацію реагуючих речовин можна при зменшенні масляної складової, що залишається на смузі після холодної прокатки.

В умовах ЛПЦ-5 ВАТ ММК змащувальний шар на підкат до холодного прокатки наносять в лінії безперервно-травильного агрегату (БТА); холодне прокатки проходить з подачею метастабільної емульсії! малої концентрації (до 1,0 %) на основі мінеральних масел. Особливість процесу полягає у використуванні двошарової системи мастила: перший змащувальний шар на підкаті формується в лінії БТА; моюще-охолоджуючий другий шар — в процесі холодного прокатки.

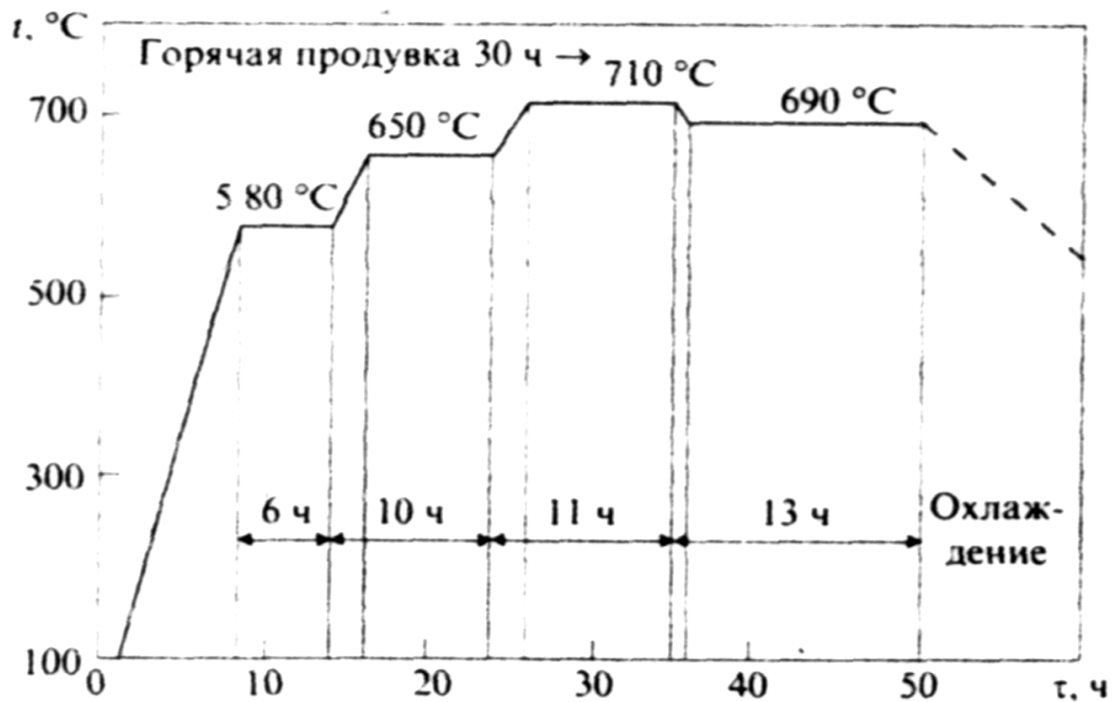


Рисунок 1.5 – Режим відпалу сталі 08Ю шириною 1250 мм ОСВ. 4 рулони по 24 т

Перший змащувальний шар служить: для запобігання поверхні смуги від механічних пошкоджень при зміщенні витків рулону і максимально можливого розділення поверхонь смуги і валу в процесі прокатки: для зниження коефіцієнта тертя; для збереження розділово-змащувальних властивостей до останньої кліти стану і необхідної здатності віддалятися із смуги. Другий шар забезпечує стабільний тепловий баланс процесу холодного прокатки, коли різниця між температурою змащуюче-охолоджуючої рідини на вході і виході з кліти має мінімальне значення:

дозоване видалення першого шару змащувача в перших трьох клітках стану і формування змащувального клина в четвертій клітці. Доцільно зменшення речовин, що служать каталізаторами виділення вуглецевоскладаючих з'єднань, при термічному відпалі (Fe, S, Si, Cl, K, Ca). Їх джерело — шлам після того, що труїть і частинки зносу металу при тому, що труїть і холодному прокатці. Слід зазначити, що наявність на поверхні смуги  $Fe^{2+}$  і  $Fe^{3+}$ , які є каталізаторами крекінгу вуглеводнів масляних залишків, приводить до освіти на металі при відпалі полімерних і сажистих нальотів.

Для зменшення кількості частинок зносу і масляної складової на смузі після того, що труїть необхідне дотримання наступних параметрів труїть: ступінь захисту металу інгібітором від кислотної корозії не менше 80%; робота тільки при максимальному вигині смуги всіма роликками окалиноломателя і дотримання обжимання в дресувальній клітці не менше 1 % після перевалювання робочих валів: ефективність промивки, сушки (рН не менше 6): забрудненість поверхні смуги на виході з лінії БТА, оцінена за допомогою реплік, знятих стрічкою "скотч", з коефіцієнтом віддзеркалення не нижче 70 %. При холодній прокатці необхідне постійне здування емульсії на виході із стану і загальна її витрата не менше 1250 м<sup>3</sup>/год [21].

Розділяючі прокладки є важливим елементом технології при відпалі жерсті в ковпакових печах. Вони здійснюють розділення рулонів в стопі і сприяють їх рівномірному нагріву при відпалі.

Недоліком існуючих розділових ребристих прокладок є те, що після певного часу їх експлуатації починає відбуватися злипання ("зварювання") витків в торцях рулонів, через яке в процесі подальшого дресирування йде утворення дефектів "рвана кромка" і "злам". Раніше, з метою зниження браку по зварюванню витків на КарМК (нині АТ "Міттал Стіл Теміртау"), були розроблені і упроваджені розділові прокладки вдосконаленої конструкції, площа опорної поверхні яких зменшилася з 54,8 до 19% в порівнянні з тими, що застосовувалися раніше. Проте ці прокладки не використовувалися надалі через їх велику металоємність і недостатньо надійну конструкцію.

Пропонувалися також пристрої з насадженням рулонів на опори. Але і ці технічні рішення володіли істотними недоліками:

- необхідність спеціального устаткування для насадження рулонів на ці опори до термообробки і їх зняття при розвантаженні печі (а це додаткові технологічні операції);

- значне збільшення загальної маси садки через власну велику масу пристрою, що неминуче веде до зниження продуктивності ковпакових печей і додаткової витрати палива;

- збільшення тривалості відпалу і охолодження через відсутність циркуляції захисного газу у внутрішній порожнині рулону.

Крім того, упровадження цих технічних рішень зажадало б істотну зміну конструкції вже існуючих стендів для набору стоп рулонів.

Відпал жерсті в цеху білої жерсті АТ "Міттал Стіл Теміртау" (ЛПЦ-3) здійснюють з використанням зварних прокладок з суцільними контактними поверхнями і спіральними ребрами жорсткості між ними. Середня маса садки 50 т.

Застосовуються розділові прокладки із сталі Ст 3сп. Ця сталь має ту ж температуру рекристалізації, що і вироблюваний в прокатних цехах метал. При багатократному відпалі мікроструктура сталі прокладок стає грубозернистою, що приводить до погіршення її механічних властивостей. Низька опірність деформаціям в сукупності з високими температурами при відпалі приводить до деформації (загальному і локальному) прокладок під впливом термічних і механічних напруг.

Локальні не площинності, які з'являються на контактній поверхні прокладок через їх деформацію під час відпалу викликають сильне збільшення в цих місцях міжвиткових тиску через той, що зім'яв кромки і наявності перешкод для теплового розширення жерсті, які в процесі термообробки і викликають злипання витків в торці рулону.

На практиці встановлено, що злипання витків на рулонах, що мають слід від виступаючого ребра жорсткості прокладок на торці від першого до

останнього витка відбувається, як правило, на зовнішніх (більш гарячих) витках, приблизно до половини радіусу його намотування. Внутрішня частина рулону розмотується практично завжди без злипання витків.

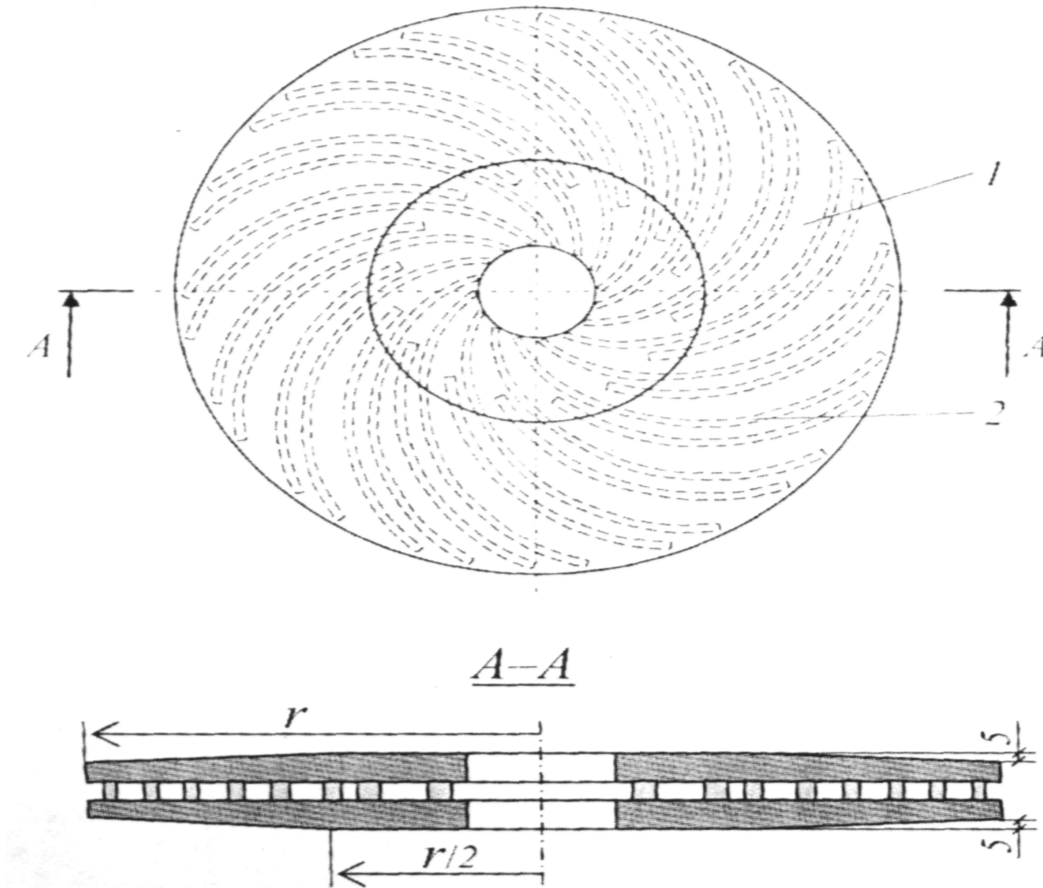


Рисунок 1.6 – Розділова прокладка вдосконаленої конструкції (вигляд зверху): 1 - опорна плита з скошеною робочою поверхнею; 2 - ребра жорсткості

Аналіз патентної літератури показав, що автори різних технічно/рішень по усуненню злипання витків жерсті намагалися мінімізувати або взагалі усунути передачу навантажень в стопі міжрулонними розділовими прокладками на торці рулонів [22].

У відділенні ковпакових печей цеху холодної прокатки (ЛПЦ-2) АТ «Міттал Стіл Теміртау» встановлено 166 стендів вантажопідйомністю 180 т, 180 муфель і 66 ковпаків потужністю 1,75 МВт кожний. Як паливо для

печей використовується суміш коксівного і доменного газів з об'ємною теплою згоряє 6,7 МДж/м<sup>3</sup>.

Необхідний температурний режим термообробки рулонів забезпечується цілеспрямованою зміною теплового навантаження печі за рахунок регулювання подачі палива в зону горіння. Контроль теплового навантаження проводиться ковпаковою термопарою, що вимірює температуру продуктів горіння між ковпаком і муфелем. Температура подмуфельного простору вимірюється стендовою термопарою, розташованою між муфелем і меткою на рівні стендової опорної плити.

Існуюча двохпозиційна система має наступні недоліки: значну погрішність вимірювання ( $\pm 10$  °С); тривалий цикл опитування (6 с), який погіршує точність вимірювання; жорсткий режим управління дросельною заслінкою (циклічна робота за принципом «відкрито-закритий»), що приводить до перепаду температур печі в процесі відпалу до 120-150 °С; необхідність ручного переключення управління пичкою із зональної (ковпакової) термопари на стендову у момент початку витримки.

Оскільки теплота згоряє палива і його тиск в магістральному трубопроводі багато в чому залежать від роботи коксохімічного і доменного переділів, то не рідкісні випадки відхилення цих параметрів у велику або меншу сторону. Зміна тиску або об'ємної теплоти згоряє паливного газу в печах з двохпозиційною системою приводить до їх нестійкої роботи — починаються скачки температури. Усувається це за рахунок ручного прикриття (відкриття) заглушок подачі паливного газу в пич, що вимагає наявності кваліфікованого персоналу.

В даний час 12 стендів ЛПЦ-2 переключено на регулювання процесу відпалу рулонів з двохпозиційних регуляторів ФША 501 на мікропроцесорну елементну базу фірми Siemens. Печі, оснащені новою системою автоматики, практично відразу реагують на нерозрахункову зміну температури і за допомогою дросельної заслінки точно регулюють подачу газу в зону горіння, без жодної участі людини. Досягається це гнучким управлінням дросельною



заслінкою на основі програмного продукту, розробленого фахівцями комбінату.

Завантаження завдання на відпал (профілерозміри рулонів і їх маси, стандарт, по якому необхідно провести відпал) і візуальний контроль здійснюються на моніторі персонального комп'ютера (ПК). Програма відпалу з логарифмічними кривими підйому температури в подмуфельном просторі, температурами і часом витримки знаходиться в пам'яті мікроконтролера Simatic S7-315-2DP, що має станцію розширення DO (R) A1 з можливістю підключення чотирьох ковпакових печей. Зв'язок ПК з мікроконтролером проводиться через станцію IR45 [23].

В 2004 р. для відпалу сталевий холоднокатаної смуги на Магнітогорському металургійному комбінаті встановлені водневі ковпакові печі HICON/H<sub>2</sub> (тип HOg-220/600 St-H2-B) фірми "Ebner". До складу пічного устаткування входять 36 стендів, 24 нагрівальні ковпаки, 36 муфель і 12 охолоджуючих ковпаків. Як захисна атмосфера використовується водень з температурою точки роси не вище —70 °С. Ці печі значно більш продуктивні, ніж раніше вживані печі з азотоводневою атмосферою (відповідно середні значення 1,8 і 0,67 т/год). За умов контракту з фірмою "Ebner" разом з водневими печами поставлений багатокомпонентний газоаналізатор для визначення складу захисного газу в процесі нагріву. Необхідність такого контролю зв'язана з використанням прокатних емульсій, деструкція органічних компонентів яких протікає в різних температурних інтервалах. З метою визначення цих інтервалів для що використовується в даний час емульсії при дослідченому відпалі вибрали стандартне садки масою 92 т з 4 рулонів. З результатів аналізу виходить, що для видалення продуктів розкладання емульсії — вуглецевоскладаючих компонентів СН<sub>4</sub> і СО в інтервалі 450 - 550 °С необхідне гаряче продування.

Відпалений метал поступає на склад перед дресированням, де прискорений остигає під впливом вентиляторів прискореного охолодження (ВПОР) до температури не вище 40 °С, щоб вийшла необхідна межа

текучості. Після відпалу в азотних печах тривалість охолодження рулонів масою до 20 т на складі складає 40 годин. Оптимальну тривалість охолодження на складі перед дресуванням металу у разі водневого відпалу визначали для садки масою 99,1 т з п'яти рулонів кожний по 19,82 т. В нижньому рулоні були встановлено три додаткові термомпари: 1сс — в середині по товщині намотування, 2зв — на 1/3 товщину намотування від внутрішнього витка і 3нв — на глибині 35 мм від верхнього торця рулону і 10 мм від зовнішнього витка.

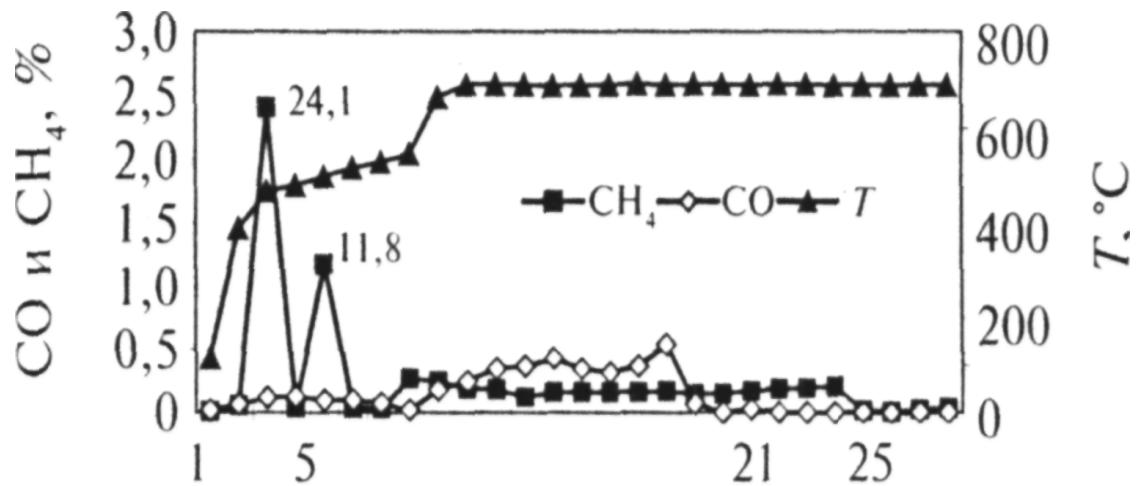


Рисунок 1.7 – Зміна вмісту CO і CH<sub>4</sub> в подмуфельному просторі в процесі нагріву садки металу у водневій печі.

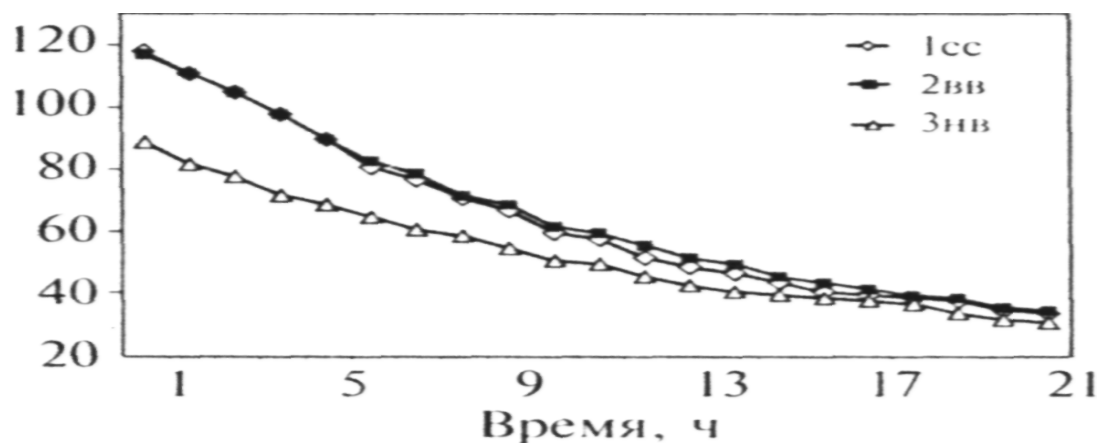


Рисунок 1.8 – Розподіл температур в нижньому рулоні при охолодженні на складі за допомогою ВУОР в зимовий час садки масою 99,1 г (термопари Ісс, 2вв і Знв)

Температура при розпаковуванні складала 160 °С в середині рулону (відстаюча крапка), а за свідченнями термопар, закріпленої за зовнішній виток на глибині 35 мм і стенової, відповідала 60 °С [24].

Холоднокатана стрічка товщиною 0,5 - 3,5 мм і шириною до 475 мм категорій особливо складної (ОСВ), складної (СВ) і глибокої витяжки (ВГ) по ДЕСТ 19851-74 і ТУ 14-1-754-93 призначена для деталей автомобілів. Прокат виготовляють з регламентованим хімічним складом по ДЕСТ 9045-93 із сталей 08Ю (ОСВ і СВ) і 08кп, 08пс (ВГ). На розтягування випробовують поперечні зразки. Мікроструктуру оцінюють на подовжніх зразках. Стрічку товщиною до 2 мм в стані поставки піддають випробуванню на видавлювання. Виявилось, що рівень вимог ОСВ і СВ досягається при температурах 690 - 710 °С. Однак відомо, що із зростанням температури збільшується ступінь злипання металу в рулонах при відпалі. Тому в першій серії досліджено-промислових випробувань використовували 4-східчастий режим нагріву: проміжні витримки при 370 і 500 °С, потім витримка при максимальній температурі нагріву 690 °С тривалістю 4 ч з подальшим зниженням температури до 670 °С і з витримкою протягом 12 - 14 год. Термічній обробці в ковпакової печі піддали 47 т стрічки товщиною 3,0 мм. При цьому вдалося отримати стрічку, що відповідає по механічних властивостях вимогам СВ, але без запасу властивостей по межі текучості і твердості.

Відпал двох партій стрічки ОСВ товщиною 1,8 мм і шириною 300 мм при максимальній температурі 700 °С привів до незадовільних результатів механічних випробувань.

При підготовці до відпалу наступних партій щоб уникнути зварювання металу при термічній обробці збільшили шорсткість поверхні

холоднокатаної стрічки Ra до 1,2 - 1,4 мкм. зменшили на 30 % натягнення при змотуванні смуги на п'ятиклітьовому стані 630. Це дало можливість при підвищенні температури і збільшенні тривалості відпалу рекристалізації уникнути зварювання металу. Відпал проводили з 5-східчастою витримкою при нагріві і з регульованим охолодженням в перші 2 години. Температур) останньому ступеню нагріву підняли від 670 до 680 °С. Тривалість нагріву збільшили на 7 годин.

Виконали термічну обробку стрічки товщиною 1,8 і 0,7 мм Поліпшення пластичності стрічки досягли підвищенням температури 4-й ступені від 700 до 710 °С і 5-й — від 680 до 690 °С, а також регулюванням швидкості охолодження в перші 6 годин. Вимірюваннями температури по контрольних крапках на дослідно-промисловому стенді виявлена рівномірність нагріву металу як по висоті садки, так і по перетину рулону. Різниця температур по товщині намотування рівна 10 °С, по висоті садки — 15 °С. Тривалість витримки при 680 °С у відстаючій крапці складає 8 годин. Регламентована швидкість охолодження в ковпаковій печі застосована як один з ефективних способів усунення злипання і схоплювання дотичних поверхонь витків рулону при відпалі і. отже, для попередження дефекту "злам" [25].

Після двохгодинної витримки сталі 08Ю при 400 °С і подальшого нагріву до 600 °С рекристалізація практично повністю закінчується. У разі безперервного нагріву до 600 °С на фоні деформованої матриці спостерігали лише перші рекристалізовані зерна.

Результати електронно-мікроскопічних досліджень дозволили припустити, що низькотемпературна відпустка сприяє локальному очищенню окремих субзерен фериту від дислокацій, а також від домішок упровадження і легуючих елементів унаслідок їх виділення з твердого розчину. Такі субзерна при подальшому нагріві виконуватимуть роль зародків рекристалізації. Збереження дефектності навколишньої матриці в результаті блокування дислокацій домішковими атомами упровадження і

найдрібнішими виділеннями частинок карбідів і карбонітридів досягши температури початку рекристалізації сприяє зростанню бездефектних субзерен і прискоренню процесу в цілому. При повільному безперервному нагріві дефектність зменшується рівномірно, що обумовлює уповільнення рекристалізації і підвищення температури її початку. Оскільки рушійна сила зростання зародків пропорційна відмінності в запасеній енергії деформованої матриці і вільного від напруг субзерна, то чим більше енергія ділянки матриці певної орієнтації, тим швидше росте що утворилося в ній зерно і тим з більшою вірогідністю воно перетвориться в зародок аналогічного орієнтування. Наголошується, що механізм орієнтованого зародкоутворення в холоднокатаній листовій сталі пов'язаний з величиною запасеної енергії, яка залежить від кристалографічного орієнтування зерен фериту [26].

Захист від окислення і зневуглицювання здійснюється при протіканні двох паралельних процесів:

1. На поверхні термічно оброблюваних виробів формується бар'єрний шар, що складається з оксидів і оксікарбідів, одержуваних осадженням з газової фази при розкладанні летючих координаційних з'єднань типу  $Me(R)_n$  в процесі самої обробки, де R є органічною частиною молекули з'єднання.

2. Газоподібні продукти термодеструкції летючих координаційних з'єднань і органічні добавки, взаємодіючи з киснем атмосфери печі, зв'язують його, створюючи в пічному просторі атмосферу, сильно збіднену по кисню.

Цей підхід заснований на роботах, що проводяться в нашому інституті і пов'язаних з дослідженням будови комплексних з'єднань, виявленням основних закономірностей взаємного впливу центрального атома і лігандів, вивченням процесів переходу в газову фазу і їх термічною дисоціацією.

Сутність розробленого методу захисту залізовуглецевих сплавів від окислення і зневуглицювання полягає в тому, що в робочий об'єм печі одночасно або безпосередньо після завантаження термічно оброблюваного металу вносять склад, що містить летючі координаційні з'єднання і

компоненти, що зв'язують кисень, що знаходиться в атмосфері пічного простору [27].

Важливою є проблема впровадження методів математичного моделювання і обчислювального експерименту в промисловість і технологію, а також створення на цій основі інтегрованих систем конструювання, технологічної підготовки виробництва, оптимізації конструктивно-технологічних параметрів виготовлення і обробки виробів є однією з найактуальніших в сучасних умовах. В роботі розглядається рішення задачі математичного моделювання фізичних процесів отримання і обробки металів в технологічних установках і системах за умов істотно градієнтного і високотемпературного поля з урахуванням еволюції в часі і просторі цього поля і викликаних їм структурно-фазових і напружено-деформованих станів. Обговорюються основні підходи і особливості розробки багаторівневої адаптивної універсальної системи взаємозв'язаних математичних моделей, що описують вказані нестационарні процеси, а також деякі результати реалізації підходу, що розвивається.

Інтенсивна технологічна дія на матеріал високотемпературного і силового поля супроводжується складним комплексом взаємозв'язаних фізико-хімічних процесів, який в першому наближенні включає:

1. Теплові процеси, що обумовлюють у свою чергу процеси формування термоупругих напруг фазові перетворення, зміни кінетики хімічних реакцій і перерозподілу вуглецю і інших елементів в матеріалі, наприклад, у разі електромеханічної обробки, що супроводжується і цілим поряд термоелектричних явищ, таких як ефекти Пельтьє і Томсона.

2. Зміна напружено-деформованого стану матеріалу. При цьому пластична деформація змінює фазовий склад і зернову структуру метала, тобто може спостерігатися подрібнення, відновлення (рекристалізація) зерна, з'являється переважно кристалографічне орієнтування зерен текстура матеріалу. Високий ступінь неоднорідності напруженого стану, характерний для даних методів дії, є причиною інтенсивного дифузійного переміщення атомів,

направленого до "вирівнювання" напруженого стану. Крім того, процес формування напружено-деформованого стану супроводжується виділенням деякої кількості теплоти від механічної роботи.

3. Структурні і фазові перетворення, що супроводжуються зміною розчинності вуглецю, виділенням (поглинанням) прихованої теплоти фазового переходу і виникненням так званих фазових напруг, зумовлених відмінністю питомих об'ємів існуючої і знов утворюється фаз.

4. Дифузійні процеси, які безпосереднім чином впливають на протікання поліморфних перетворень і еволюцію температурного поля в матеріалі за рахунок зміни концентрації фазового переходу і теплофізичних характеристик металу. Крім того, дифузійний перерозподіл хімічних елементів в локальному об'ємі металу приводить до насичення його кристалічних решіток атомами тієї або іншої речовини і, як наслідок, до зростання параметра решіток. Зростання параметра решіток нової фази, що в рамках утворюється, є причиною збільшення її відносного об'єму в порівнянні з об'ємом навколишньої старої фази, і має сенс говорити по аналогії з термічними про концентраційні напруги.

5. Хімічні реакції утворення карбідів, нітридів, оксидів і інших з'єднань, що супроводжуються зміною електронної будови і хімічних зв'язків окремих фаз в результаті дії високих температур, тиску і електролітичних процесів.

6. Електрофізичні ефекти. У разі електромеханічної обробки (ЕМО) в матеріалі і на його поверхні протікає цілий ряд термоелектричних процесів - виділення джоулевого тепла, ефекти Пельтьє, Томсона, Зеебека, а також електролітичні явища.

Такий складний комплекс шикуються на базі ефективної методики наукових досліджень, заснованої на інтегруючій ролі сучасного математичного моделювання, що зв'язує теоретичні і експериментальні дослідження, і включає моделі калібрування і адаптації системи моделей, а також спеціальні моделі опису граничних умов для різних технологічних систем і процесів. Моделі системи формуються з урахуванням сучасного

рівня теоретичних і експериментальних даних по повноті і достовірності опису явища [28].



## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Розрахунок раціонального режиму прокатки і енергосилових параметрів прокатки штаби товщиною 0,5x1050 мм зі сталі 08Ю

Розрахунок проводимо використовуючи методику д.т.н., професора Ніколаєва В.О. [1].

Визначаємо сумарний обтиск по формулі:

$$\varepsilon = 0,51 + 0,148(2 - h)^{1,3}, \quad (2.1)$$

Початкова товщина штаби визначається по формулі:

$$H = h / (1 - \varepsilon), \quad (2.2)$$

де  $h$  - товщина штаби до і після прокатки, мм.

Сумарний обтиск визначаємо по формулі:

$$\Delta h = H - h_i, \quad (2.3)$$

Коефіцієнт тертя визначується по формулі:

$$f = f_o \cdot k_d \cdot k_n \cdot k_{cm} \cdot k_t, \quad (2.4)$$

де  $f_o$  - базова границя текучості;

$k_d, k_n$  - поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно відносний обтиск штаби і шорсткість поверхні штаби;

$k_{cm}$  - поправочний коефіцієнт, що враховує тип технологічного змащення;

$k_t$  - коефіцієнт, що враховує температуру металу.

Визначується базова границя текучості при  $<7,5$  м/с з формули:

$$f_0 = 0,076 - 0,0019\nu + 0,031 \cdot (R_a - 0,6) \cdot [(1,07 - 0,14\nu)^3 + 0,054\nu - 0,26], \quad (2.5)$$

Коефіцієнт рівний:

$$k_n = 1,09 - 0,05R_{an}, \quad (2.6)$$

Коефіцієнт рівний:

$$k_d = 0,5 + 1,77\varepsilon + 0,165R_a(1 - 3,33\varepsilon), \quad (2.7)$$

Розрахунок коефіцієнта тертя з урахуванням температури штаби проводиться по формулах:

$$k_t = a + c \cdot (1,11 - 0,0044 \cdot t_H)^n, \quad (2.8)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,31 + 1,7\varepsilon; \\ c &= 1,2 - 2,8\varepsilon; \\ n &= 3,84 - 5,7\varepsilon. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Показник тертя розраховуємо по формулі:

$$f_n = 1,6f - 0,018, \quad (2.10)$$

Виконаємо розрахунок сумарного обтиску, розрахуємо товщину штаби:

$$\varepsilon_\Sigma = 0,51 + 0,148(2 - 0,6)^{1,3} = 0,74;$$

$$H = 0,6 / (1 - 0,74) = 2,3 \text{ мм};$$

$$\Delta h_\Sigma = 2,3 - 0,6 = 1,7 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{\Sigma 1} = 0,5 \cdot 1,7 = 0,85 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{\Sigma 2} = 0,24 \cdot 1,7 = 0,41 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{\Sigma 3} = 0,18 \cdot 1,7 = 0,30 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{\Sigma 4} = 0,08 \cdot 1,7 = 0,14 \text{ мм}.$$

Перевірка:

$$\Delta h_{\Sigma} = 0,85 + 0,41 + 0,30 + 0,14 = 1,7 \text{ мм}.$$

### Кліть 1

$$H_o = 2,3 \text{ мм}; \Delta h = 0,85 \text{ мм}; h_1 = 1,45 \text{ мм}; \varepsilon = 36,96\%; R_a = 2,5 \text{ мкм};$$

$$D_p = 550 \text{ мм}; t_H = 25^{\circ} \text{ C}; \nu = 4,22 \text{ м/с}.$$

Коефіцієнт тертя і показник тертя визначуваний по формулах:

$$f_o = 0,076 - 0,00019 \cdot 4,22 + 0,031 \cdot (5 - 0,6) [(1,07 - 0,14 \cdot 4,22)^3 + 0,054 \cdot 4,22 - 0,26] = 0,073;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,3696 + 0,165 \cdot 2,5(1 - 3,33 \cdot 0,3696) = 1,06;$$

$$k_n = 0,97;$$

$$k_{cm} = 1,0;$$

$$k_t = 0,94 + 0,17(1,11 - 0,0044 \cdot 25)^{1,73} = 1,10;$$

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,31 + 1,7 \cdot 0,3696 = 0,94; \\ c &= 1,2 - 2,8 \cdot 0,3696 = 0,17; \\ n &= 3,84 - 5,7 \cdot 0,3696 = 1,73. \end{aligned} \right\}$$

$$f = 0,073 \cdot 1,06 \cdot 0,97 \cdot 1,10 = 0,082;$$

$$f_n = 1,6 \cdot 0,082 - 0,018 = 0,113.$$

Розрахуємо границю текучості 08Ю по формулах:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta \sigma_T \cdot K_{\varepsilon}, \quad (2.11)$$

де  $\sigma_{T0}$  - початкова (після відпалу) до деформації границя текучості;

$\Delta\sigma_T$  - ступінь зміцнення металу при деформації;

$k_\varepsilon$  - коефіцієнт, що враховує ступінь деформації.

Величини  $\sigma_{T0}$  і  $\Delta\sigma_T$  залежать від хімічного еквівалента даної марки сталі [3].

Для вуглецевих, конструкційних, низьколегованих марок сталей хімічний еквівалент, величини  $\sigma_{T0}$  і  $\Delta\sigma_T$  рівні:

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4}; \\ \sigma_{T0} &= 210 + 263 \cdot C_3; \\ \Delta\sigma_T &= 209 + 460 \cdot C_3. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Коефіцієнт визначають таким чином:

$$k_\varepsilon = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{0,4}\right)^{1,5+C}, \quad (2.13)$$

де  $C$  – вміст вуглецю в сталі.

Границя текучості металу після деформації з урахуванням впливу температури і швидкості деформації [3] дорівнює:

$$\sigma_{T1} = n_u \cdot n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k, \quad (2.14)$$

де  $n_u$ ,  $n_t$  - коефіцієнти, що враховують вплив відповідно швидкості деформації і температури металу перед деформацією.

Коефіцієнти визначаються з виразів [3]:

$$\left. \begin{aligned} n_u &= 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8}\right)^2; \\ n_t &= 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{t_u}{300}\right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Середній опір металу деформації дорівнює:

$$\sigma_{\phi} = 1,15 \cdot [n_i \cdot \sigma_{T(i-1)} + 0,67(\sigma_{T1} - n_i \cdot \sigma'_{T(i-1)})] \quad (2.16)$$

де  $\sigma_{T1}$  - границя текучості після проходу;

$\sigma_{T(i-1)}$  - границя текучості до проходу.

Швидкість деформації визначимо по формулі:

$$u = v \cdot \frac{\varepsilon}{l_c} \quad (2.17)$$

У першому наближенні приймаємо для кліті 1 - (1,3-1,5)

Обчислюємо швидкість деформації, середній опір металу деформації, границю текучості металу після деформації, а також границю текучості сталі 08Ю по формулах (2.11 – 2.17):

$$C_3 = 0,11 + 0,03/24 + 0,5/6 + 0,1/5 = 0,215;$$

$$\sigma_{T0} = 210 + 263 \cdot 0,215 = 266 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460 \cdot 0,215 = 308 \text{ Н/мм}^2;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 - \left(1 - \frac{0,3696}{0,4}\right)^{1,58} = 0,99;$$

$$\sigma_{T1} = 255 + 287 \cdot 0,99 = 570 \text{ Н/мм}^2;$$

$$l_d = \sqrt{0,85 \cdot 275} = 15,29 \text{ мм};$$

$$l_c = 1,4 \cdot 15,29 = 21,40 \text{ мм}.$$

$$u = \frac{4220 \cdot 0,3696}{21,40} = 73 \text{ с}^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 73}{13,8}\right)^2 = 1,25;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{25}{300} \right)^2 = 0,99;$$

$$\sigma_{T1} = 255 \cdot 1,25 \cdot 0,99 + 287 \cdot 0,99 = 634 \text{ Н / мм}^2;$$

$$\sigma_{\phi} = 1,15 [255 + 0,67(634 - 255)] = 589 \text{ Н / мм}^2;$$

Довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби, а так само натягіння кінців штаби, дорівнює:

$$l'_c = \frac{C + \sqrt{C^2 + 4R \cdot \Delta h \left( 1 - C \cdot \frac{f_n}{2 \cdot h_{cp}} \right)}}{2 \left( 1 - C \cdot \frac{f_n}{2 \cdot h_{cp}} \right)}; \quad (2.18)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= n_{cp} \cdot \sigma_{\phi} \cdot \frac{R}{47500}; \\ x_2 &= n_1 \cdot \sigma_{\phi 1} \cdot \frac{R}{95000}. \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

$$l_c = l'_c + x_2, \quad (2.20)$$

де  $R$  - радіус жорсткого валка;

$n_{cp}, n_1$  - коефіцієнти, що враховують вплив середнього контактного напруження натягіння і напруження натягіння переднього кінця штаби:

$$n_{cp} = 1 - \frac{\sigma_n + \sigma_z}{2\sigma_{\phi}}, \quad (2.21)$$

$$n_1 = 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_z}, \quad (2.22)$$

де  $\sigma_n, \sigma_z$  - напруга відповідно переднього і заднього натягіння.

Обчислюємо довжину дуги контакту з формул (2.18 – 2.22):

$$n_{cp} = 1 - \frac{25 + 0,15 \cdot 589}{2 \cdot 589} = 0,9;$$

$$m_1 = 1 - \frac{95}{1,15 \cdot 589} = 0,84;$$

$$c = 0,9 \cdot 589 \cdot \frac{275}{47500} = 2,4 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,84 \cdot 589 \cdot \frac{275}{95000} = 1,12 \text{ мм};$$

$$l'_c = \frac{2,4 + \sqrt{2,4^2 + 4 \cdot 275 \cdot 0,85 \left(1 - 2,4 \cdot \frac{0,113}{2 \cdot 1,875}\right)}}{2 \left(1 - 2,4 \cdot \frac{0,113}{2 \cdot 1,875}\right)} = 15,39 \text{ мм};$$

$$l_c = 15,39 + 1,12 = 16,50 \text{ мм}.$$

Знаходимо середній нормальний контактний тиск і енергосилові параметри прокатки з урахуванням натяжіння:

$$P'_{cp} = \sigma_{\phi} \cdot \left[ 1 + 0,48 \cdot f_n \cdot l_d \cdot \frac{(1-a)}{h_{cp}} \right], \quad (2.23)$$

$$P_{cpH} = P'_{cp} \left( 1 - \frac{\sigma_n + \sigma_3}{2 \cdot P'_{cp}} \right), \quad (2.24)$$

де  $p_{cp}$  – середній контактний тиск з формули (2.23).

Визначаємо силу прокатки з формули:

$$P = P_{cpH} \cdot l_d \cdot B_{CP} \cdot 10^{-6}, \quad (2.25)$$

Визначуваний момент прокатки:

$$M = \psi \cdot P \cdot l_d + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_3 \cdot \left( 1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_3} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (2.26)$$

де  $\psi$  - коефіцієнт положення рівнодіючих сил:

$$\psi = 0,48 \left( \frac{l_d}{l_c} \right)^2, \quad (2.27)$$

Потужність прокатки металу (на двох валках):

$$N = 2 \cdot 960 \cdot M \cdot \frac{v}{R}, \quad (2.28)$$

Виконуємо розрахунок середнього нормального контактного тиску і сили прокатки по формулах:

$$p'_{cp} = 589 \left( 1 + 0,48 \cdot 0,113 \cdot \frac{16,50}{1,875} \right) = 871 H / мм^2;$$

$$\sigma_n = 25 H / мм^2, \sigma_z = 95 H / мм^2;$$

$$p_{cp} = 871 \left( 1 - \frac{25 + 95}{2 \cdot 871} \right) = 811 H / мм^2;$$

$$P = 811 \cdot 1030 \cdot 16,50 \cdot 10^{-6} = 17,87 MN.$$

Визначуваний момент прокатки і потужність прокатки по формулах (2.26 – 2.28):

$$\psi = 0,48 \left( \frac{15,29}{16,50} \right)^2 = 0,41;$$

$$M = 2 \cdot 0,41 \cdot 17,87 \cdot 0,01650 + 2,5 \cdot 1030 \cdot 0,275 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot \left( 1 - \frac{1,45 \cdot 95}{2,3 \cdot 25} \right) = 0,259 MN \cdot m;$$

$$N = 960 \cdot 0,259 \cdot \frac{4,22}{0,275} = 3821 kVt < 4800.$$

Визначимо температуру штаби на виході з кліті по формулі:



$$t_k = t_H + \Delta t, \quad (2.29)$$

де  $\Delta t$  - приріст температури у осередку деформації.

Приріст температури штаби в даній кліті рівний:

$$\Delta t = 0,05 \cdot m(p_{cp} + \sigma_\phi) \ln \frac{H}{h}, \quad (2.30)$$

де  $m$  – коефіцієнт, який приблизно визначається виразом:

$$m = 2,2 - 0,65 \cdot \left( \frac{t_H}{480} - 0,042 \right)^{1,4}, \quad (2.31)$$

Визначаємо температуру штаби на виході за допомогою формул (2.29 – 2.31):

$$\Delta t = 2,20 \cdot 0,05(811 + 589) \ln \frac{2,5}{1,7} = 71^\circ C;$$

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{25}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,20;$$

$$t_k = 25 + 71 = 96^\circ C.$$

## Кліть 2

$$h_1 = 1,45 \text{ мм}; h_2 = 1,04 \text{ мм}; \Delta h = 0,41 \text{ мм}; \varepsilon = 28,28\%; t_H = 96^\circ C; v = 5,88 \text{ м/с}.$$

Розрахунок режиму прокатки і енергосилових параметрів для кліті 2 такий же, як і для кліті 1.

Визначуваний коефіцієнт тертя по формулі (2.4 – 2.10):

$$f_o = 0,076 - 0,0019 \cdot 5,88 + 0,031(5 - 0,6) \left[ (1,07 - 0,14 \cdot 5,88)^3 + 0,054 \cdot 5,88 - 0,26 \right] = 0,069;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,2828 + 0,165 \cdot 2,5(1 - 3,33 \cdot 0,2828) = 1,02;$$

$$k_t = 0,79 + 0,41(1,11 - 0,0044 \cdot 96)^{2,23} = 0,97;$$

$$k_n = 0,97;$$

$$k_{cm} = 1;$$

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,31 + 1,7 \cdot 0,2828 = 0,79; \\ c &= 1,2 - 2,8 \cdot 0,2828 = 0,41; \\ n &= 3,84 - 5,7 \cdot 0,2828 = 2,23 \end{aligned} \right\};$$

$$f = 0,069 \cdot 1,02 \cdot 0,97 \cdot 0,97 = 0,066;$$

$$f_n = 1,6 \cdot 0,066 - 0,018 = 0,088.$$

Визначується границю текучості, сумарний обтиск з формул (2.11 – 2.15):

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{2,3 - 1,03}{2,3} = 0,5478;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,87(0,5478 - 0,47)^{0,5} = 1,33;$$

$$\sigma_{T1} = 255 + 287 \cdot 1,33 = 677 \text{ H / мм}^2;$$

$$l_d = \sqrt{275 \cdot 0,41} = 10,62 \text{ мм};$$

$$l_c = 1,4 \cdot 10,62 = 14,87 \text{ мм}.$$

$$u = 5880 \cdot \frac{0,2828}{14,87} = 112 \text{ с}^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0,38 \left( 0,5 + \frac{\ln 112}{13,8} \right)^2 = 1,27;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{96}{300} \right)^2 = 0,91;$$

$$\sigma'_{T} = 1,27 \cdot 0,91 \cdot 255 + 287 \cdot 1,33 = 717 \text{ H / мм}^2.$$

Визначаємо опір металу деформації по формулах (2.16) – (2.17):

$$\sigma_{\phi} = 1,15 [652 + 0,67(717 - 652)] = 800 \text{ H / мм}^2;$$

$$\sigma_z = 0,15 \cdot 652 = 98 \text{ H / мм}^2;$$

$$\sigma_n = 0,15 \cdot 717 = 108 \text{ H / мм}^2;$$

$$n_{cp} = 1 - \frac{98 + 108}{2 \cdot 800} = 0,87;$$

$$n_1 = 1 - \frac{108}{800} = 0,87.$$

Визначимо довжину дуги контакту по формулах (2.18) – (2.22):

$$c = 0,87 \cdot 800 \frac{275}{47500} = 3,16 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,87 \cdot 800 \frac{275}{95000} = 1,57 \text{ мм};$$

$$h_{cp} = 1,245 \text{ мм};$$

$$l'_c = \frac{3,16 + \sqrt{3,16^2 + 4 \cdot 275 \cdot 0,41 \left( 1 - 3,16 \cdot \frac{0,088}{2 \cdot 1,245} \right)}}{2 \left( 1 - 3,16 \cdot \frac{0,088}{2 \cdot 1,245} \right)} = 11,89 \text{ мм};$$

$$l_c = 11,89 + 1,57 = 13,46 \text{ мм}.$$

Визначаємо енергосилові параметри по формулах (2.23) – (2.25):

$$p'_{cp} = 800 \left( 1 + 0,39 \cdot 0,088 \cdot \frac{13,46}{1,245} \right) = 1034 \text{ H / мм}^2$$

$$C_H = 0,17(1 + 14,7 \cdot 0,088) = 0,39;$$

$$p_{cp} = 1034 \cdot \left( 1 - \frac{98 + 108}{2 \cdot 1034} \right) = 931 \text{ H / мм}^2;$$

$$P = 931 \cdot 0,01346 \cdot 1,03 = 14,26 \text{ МН}.$$

Визначуваний момент прокатки і потужність прокатки по формулах (2.26) – (2.28):

$$\psi = 0,48 \left( \frac{10,62}{13,46} \right)^2 = 0,30;$$

$$M = 2 \cdot 0,30 \cdot 14,26 \cdot 0,01346 + 1,45 \cdot 1,03 \cdot 0,275 \cdot 98 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 1 - \frac{1,04 \cdot 108}{1,45 \cdot 98} \right) = 0,155 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$N = 960 \cdot 0,155 \cdot \frac{5,88}{0,275} = 3180 \text{ кВт} < 4800.$$

Визначаємо температуру штаби по формулах (2.29) – (2.31):

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{96}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,15;$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,15 \cdot (931 + 800) \cdot \ln \frac{1,45}{1,03} = 62^\circ \text{C};$$

$$t_k = 0,7 \cdot 96 + 62 = 129^\circ \text{C}.$$

### Кліть 3

$$h_2 = 1,04 \text{ мм}; h_3 = 0,74 \text{ мм}; \Delta h = 0,30 \text{ мм}; \varepsilon = 28,85\%; t = 129^\circ \text{C}; v = 8,27 \text{ м/с}.$$

Розрахунок режимів прокатки і енергосилових параметрів для кліті 3 такий же, як і для кліті 1.

Коефіцієнт тертя визначимо з виразів (2.4) – 2.10):

$$f_0 = 0,076 - 0,0019 \cdot 8,27 + 0,031 \left[ (1,07 - 0,14 \cdot 8,27)^3 + 0,054 \cdot 8,27 - 0,26 \right] = 0,071;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,2885 + 0,165 \cdot 2,5(1 - 3,33 \cdot 0,2885) = 1,03;$$

$$k_n = 0,97;$$

$$k_{cm} = 1;$$

$$k_t = 0,80 + 0,39(1,11 - 0,0044 \cdot 129)^{2,2} = 0,90;$$

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,31 + 1,7 \cdot 0,2885 = 0,80; \\ c &= 1,2 - 2,8 \cdot 0,2885 = 0,39; \\ n &= 3,84 - 5,7 \cdot 0,2885 = 2,20 \end{aligned} \right\}$$

$$f = 0,071 \cdot 1,03 \cdot 0,97 \cdot 0,9 = 0,063;$$

$$f_n = 1,6 \cdot 0,063 - 0,018 = 0,084.$$

Границю текучості розраховуємо по формулі (2.11) – (2.15):

$$\varepsilon = \frac{2,3 - 0,74}{2,3} = 0,6783;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,87(0,6783 - 0,4)^{0,5} = 1,46;$$

$$\sigma_{T1} = 255 + 287 \cdot 1,46 = 715 \text{ H / мм}^2;$$

$$l_d = \sqrt{275 \cdot 0,3} = 9,08 \text{ мм};$$

$$l_c = 1,4 \cdot 9,08 = 12,72 \text{ мм};$$

$$u = 8270 \cdot \frac{0,2885}{12,72} = 188 \text{ с}^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0,38(0,5 + \ln 188 / 13,8)^2 = 1,29;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{129}{300} \right)^2 = 0,87;$$

$$\sigma'_{T1} = 1,29 \cdot 0,87 \cdot 255 + 284 \cdot 1,46 = 750 \text{ H / мм}^2.$$

$$\sigma_{T(i-1)} = 682 \text{ H / мм}^2.$$

Опір металу деформації розраховуємо по формулі (2.16) – (2.17):

$$\sigma_\phi = 1,15 [682 + 0,67(750 - 682)] = 836 \text{ H / мм}^2;$$

$$\sigma_z = 0,15 \cdot 682 = 102 \text{ H / мм}^2;$$

$$\sigma_n = 0,15 \cdot 750 = 112 \text{ H / мм}^2;$$

$$n_{cp} = 1 - \frac{108 + 112}{2 \cdot 836} = 0,87;$$

$$n_1 = 1 - \frac{112}{836} = 0,87.$$

Довжину дуги контакту знаходимо з формул (2.18) – (2.22):

$$c = 0,87 \cdot 836 \cdot \frac{275}{47500} = 3,3 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,87 \cdot 836 \cdot \frac{275}{95000} = 1,64 \text{ мм};$$

$$h_{cp} = \sqrt{1,04 \cdot 0,74} = 0,89;$$

$$l_c = \frac{3,3 + \sqrt{3,3^2 + 4 \cdot 275 \cdot 0,30 \cdot \left(1 - 3,2 \frac{0,084}{2 \cdot 0,89}\right)}}{2 \cdot \left(1 - 3,3 \frac{0,084}{2 \cdot 0,89}\right)} = 10,90 \text{ мм};$$

$$l_c = 10,90 + 1,64 = 12,54 \text{ мм}.$$

Визначаємо енергосилові параметри по формулах (2.23) – (2.25):

$$p'_{cp} = 836 \left(1 + 0,38 \cdot 0,084 \frac{12,54}{0,89}\right) = 1107 \text{ Н / мм}^2;$$

$$C_H = 0,17(1 + 14,7 \cdot 0,084) = 0,38;$$

$$p_{cp} = 1107 \left(1 - \frac{102 + 112}{2 \cdot 1107}\right) = 1000 \text{ Н / мм}^2;$$

$$P = 1000 \cdot 0,01254 \cdot 1,03 = 13,1 \text{ МН}.$$

Визначимо момент і потужність прокатки по формулах (2.26) – (2.28):

$$\psi = 0,48 \left(\frac{9,08}{12,54}\right)^2 = 0,25;$$

$$M = 2 \cdot 0,25 \cdot 13,1 \cdot 0,01254 + 1,04 \cdot 1,03 \cdot 0,275 \cdot 102 \cdot 10^{-3} \left( 1 - \frac{0,74 \cdot 112}{1,04 \cdot 102} \right) = 0,113 \text{ MN} \cdot \text{m};$$

$$N = 960 \cdot 0,113 \frac{8,27}{0,275} = 3257 \text{ kNm} < 4800.$$

Визначимо температуру штаби по формулах (2.29) – (2.31):

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{129}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,12;$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,1(836 + 100) \ln \frac{1,04}{0,74} = 66^\circ \text{C};$$

$$t_k = 0,7 \cdot 129 + 66 = 157^\circ \text{C}.$$

#### Кліть 4

Розрахунок режимів прокатки і енергосилових параметрів для кліті 4 такий же, як і для кліті 1.

Коефіцієнт тертя розраховуємо по формулах (2.4) – (2.10):

$$f_o = 0,95[0,062 + 0,005 \cdot 4,4] = 0,08;$$

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 10,2)^2 = 0,95;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,1892 + 0,165 \cdot 4,4(1 - 3,33 \cdot 0,1892) = 0,99;$$

$$k_t = 0,63 + 0,67(1,11 - 0,0044 \cdot 157)^{2,76} = 0,69;$$

$$\left. \begin{aligned} a &= 0,31 + 1,7 \cdot 0,1892 = 0,63; \\ c &= 1,2 - 2,8 \cdot 0,1892 = 0,67; \\ n &= 3,84 - 5,7 \cdot 0,1892 = 2,76. \end{aligned} \right\};$$

$$f = 0,08 \cdot 0,99 \cdot 0,95 \cdot 0,69 = 0,052;$$

$$f_n = 1,6 \cdot 0,052 - 0,018 = 0,065.$$

Границя текучості розрахована з формул (2.11)– (2.15):

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{2,3 - 0,6}{2,3} = 0,7391;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,87(0,7391 - 0,4)^{0,5} = 1,51;$$

$$\sigma_{T1} = 255 + 287 \cdot 1,51 = 730 \text{ H / мм}^2;$$

$$l_d = \sqrt{275 \cdot 0,14} = 6,2 \text{ мм};$$

$$l_c = 1,4 \cdot 6,2 = 8,69 \text{ мм};$$

$$u = 10200 \frac{0,14}{8,69} = 222 \text{ с}^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0,38 \left( 0,5 + \frac{\ln 222}{13,8} \right)^2 = 1,3;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left( 1 - \frac{157}{300} \right)^2 = 0,85;$$

$$\sigma'_{T1} = 1,3 \cdot 0,85 \cdot 255 + 287 \cdot 1,51 = 759 \text{ H / мм}^2.$$

$$\sigma_{T(i-1)} = 690 \text{ H / мм}^2.$$

Опір металу деформації розраховуємо по формулах (2.16) – (2.17):

$$\sigma_{\phi} = 1,15 [690 + 0,67(759 - 690)] = 846 \text{ H / мм}^2;$$

$$\sigma_n = 0,15 \cdot 690 = 104 \text{ H / мм}^2;$$

$$\sigma_z = 0,15 \cdot 759 = 114 \text{ H / мм}^2;$$

$$n_{cp} = 1 - \frac{104 + 114}{2 \cdot 846} = 0,87;$$

$$n_1 = 1 - \frac{114}{846} = 0,87.$$

Довжину дуги контакту визначимо з виразу (2.18) – (2.22):



$$c = 0,87 \cdot 846 \frac{275}{47500} = 3,34 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,87 \cdot 846 \frac{275}{95000} = 1,66 \text{ мм};$$

$$h_{cp} = \sqrt{0,74 \cdot 0,6} = 0,67 \text{ мм};$$

$$l'_c = \frac{3,34 + \sqrt{3,34^2 + 4 \cdot 275 \cdot 0,14 \left(1 - 3,34 \frac{0,065}{2 \cdot 0,67}\right)}}{2 \left(1 - 3,34 \frac{0,065}{2 \cdot 0,67}\right)} = 8,30 \text{ мм};$$

$$l_c = 8,30 + 1,66 = 9,96 \text{ мм}.$$

Енергосилові параметри визначаємо з виразів (2.23) – (2.25):

$$P'_{cp} = 846 \left(1 + 0,4 \cdot 0,065 \frac{9,96}{0,67}\right) = 1049 \text{ Н / мм}^2;$$

$$C_H = 0,17 \left(1 + 14,7 \frac{0,065}{0,67}\right) = 0,4;$$

$$P_{cp} = 1049 \left(1 - \frac{104 + 114}{2 \cdot 1049}\right) = 940 \text{ Н / мм}^2;$$

$$P = 940 \cdot 0,00996 \cdot 1,030 = 8,41 \text{ МН}.$$

Момент прокатки і потужність прокатки визначимо з формул (2.26) – (2.28):

$$\psi = 0,48 \left(\frac{6,2}{9,96}\right)^2 = 0,19;$$

$$M = 2 \cdot 0,19 \cdot 8,41 \cdot 0,00996 + 0,74 \cdot 1,030 \cdot 0,275 \cdot 104 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{0,6 \cdot 114}{0,74 \cdot 104}\right) = 0,053 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$N = 960 \cdot 0,053 \cdot \frac{10,2}{0,275} = 1884 \text{ кВт}.$$

Визначимо температуру штаби з формули (2.29) – (2.31):

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{157}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,08;$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,08 \cdot (846 + 940) \ln \frac{0,74}{0,6} = 39^{\circ} C;$$

$$t_k = 157 + 39 = 196^{\circ} C.$$

Результати всього розрахунку зводимо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Режим прокатки і енергосилові параметри прокатки штаби товщиною 0,5x1050 мм

№ кліті	h мм	$\Delta h$ , мм	$\varepsilon$ , %	$t_k$ , °C	$\sigma_{\phi}$ , H / мм <sup>2</sup>	$l_c$ , мм	$\psi$	P, МН	M, МН · м	N, кВт
1	1,45	0,85	36,96	96	589	16,50	0,41	17,87	0,259	3821
2	1,04	0,41	28,28	129	800	13,46	0,30	14,26	0,155	3180
3	0,74	0,30	28,85	157	836	12,54	0,25	13,10	0,113	3257
4	0,5	0,14	18,92	196	846	9,96	0,19	8,41	0,053	1887

## 2.2 Розрахунок продуктивності прокатного стану НСХП 1680

На підставі хронометражних даних, проводимо теоретичний розрахунок для основних агрегатів Ач, Агод, по формулах з роботи [1].

$$A_{ч} = 3600 \times G / T, \text{ м / ч} \quad (2.32)$$

де G – маса штаби, що прокатується;

T – темп прокатки;

Визначаємо  $\tau_y$ ,  $\tau_3$ ,  $L_y$ ,  $L_3$ :

$$\tau_y = 10,2 / 0,55 = 18,5 \text{ с};$$

$$\tau_3 = 10,2 / 0,65 = 15,7 \text{ с};$$

$$L_y = (10,2 / 2) \cdot 18,5 = 94 \text{ м};$$

$$L_3 = (10,2 / 2) \cdot 15,7 = 80 \text{ м}.$$

Час та довжина ділянки шва дорівнюють:

$$\tau'_{ui} = (10,2 - 4) / 0,55 = 11,3 \text{ с};$$

$$\tau''_{ui} = (10,2 - 4) / 0,65 = 9,5 \text{ с};$$

$$L'_{ui} = (10,2 / 2) \cdot 11,3 = 58 \text{ м};$$

$$L''_{ui} = (10,2 / 2) \cdot 9,5 = 48 \text{ м}$$

$$L_{ui} = 58 + 48 = 106 \text{ м}.$$

Довжина штаби дорівнює:

$$L = 16,0 / 0,0009 \cdot 1,03 \cdot 7,85 = 1742 \text{ м};$$

$$L_n = L_M = 1742 - 94 - 80 - 106 = 1462 \text{ м}.$$

Час прокатки на максимальній швидкості:

$$\tau_n = 1462 / 10,2 = 143,3 \text{ с}.$$

Машиний час прокатки

$$\tau_m = 18,5 + 15,7 + 11,3 + 9,5 + 143,3 = 198,3 \text{ с.}$$

Визначаємо ритм прокатки:

$$T = t_m + t_n;$$

$$T = 198,3 + 14 = 212,3 \text{ с.}$$

Визначаємо продуктивність стану за годину:

$$A_v = 3600 \times 16 \times 0,96 / 212,3 \times 1,039 = 250 \text{ т/ч.}$$

Річне виробництво прокату на безперервному стані гарячої прокатки 1680 або на іншому стані роблять по формулі:

$$A = A_z \cdot T_\phi,$$

де  $A_z$  – годинне виробництво, т/година;  $T_\phi$  – фактичний час роботи в годинах.

Визначаємо фактичний час роботи стана в рік

$$T_\phi = NB \left( 1 - \frac{KP}{100} \right),$$

де NB - номінальний час, годин.

KP - капітальні ремонти.

Плановане й простої 10 % від номінального часу

$$NB = [KB - (ВД + ПД + КР + ППР)] ЧС * ДС,$$

де КВ - календарний час - 365 доби

ВД і ПД - вихідні й святкові дні (стан працює за графіком = 0)

КР - простої на капітальний ремонт 4 доби.

ППР - планово - попереджувальні ремонти 12 діб./ рік.

ЧС - число змін роботи в добу 3 зміни

ДС - тривалість зміни 8 годин

$$НВ = [ 365 - (0 + 0 + 4 + 12) ] * 3 * 8 = 349 * 3 * 8 = 8376 \text{ годин}$$

$$T_{\phi} = 8376 \left( 1 - \frac{10}{100} \right) = 7538,4 \text{ годин}$$

$$\text{Проектний варіант } A_{\text{ср}} = 7538,4 * 250 = 1884600 \text{ т /рік.}$$

### 2.3 Практична цінність отриманих результатів

При виготовленні холоднокатаної сталі марки 08Ю по замовленнях на метал із здібністю до витяжки ОСВ на частини металу механічні властивості відповідають найвищій здібності до витяжки - ВОСВ - ДЕСТ 9045-93:

- на сталі, відпаленій у водневих ковпакових печах фірми «Ебнер» - на 44,87 % партій;

- на сталі, відпаленій в ковпакових печах з H<sub>N</sub>x-газом - на 39,97 % партій.

Проте, в умовах існуючого мартенівського виробництва без засобів позапічного доведення, з розливанням металу в злитки, що вимагаються для стабільного гарантованого отримання здібності до витяжки ВОСВ ДЕСТ 9045-93 необхідний хімічний склад (низьковуглецевий, низькосернистий, низькомарганцовистий метал) і чистоту сталі по неметалічних включеннях не можуть бути забезпечено, у зв'язку з чим ухвалення замовлень на гарантовану поставку металу із здібністю тільки до витяжки ВОСВ в існуючих умовах не представляється можливим.

Необхідно відзначити, що, з урахуванням введення в ЦХП-1 відпалу холоднокатаної сталі марки 08Ю в ковпаковтх печах фірми «Ебнер» в

атмосфері сухого водню об'єм замовлень і, відповідно, реалізації з ЦХП-1 холоднокатаної сталі цієї марки в 2006г. склав 57,6 тис.т проти 41,6 тис.т в 2005г.

Що стосується якості поверхні металу, відпаленого у водневих ковпакових печах фірми «Ебнер», контроль забрудненості поверхні металу, відпаленого в печах фірми «Ебнер» за час їх експлуатації, показав, що рівень забрудненості поверхні вуглецем для холоднокатаного металу сталі марки 08Ю склав від 0,80 до 11,70 мг/м<sup>2</sup> (середнє значення 4,65 мг/м<sup>2</sup>), на сталі марки 08кп/пс - від 2,3 до 18,1 (середнє 5,73 мг/м<sup>2</sup>), що в основному відповідає вимогам, що пред'являються до поверхні металу для покриттів - не більше 7-8 мг/м<sup>2</sup>.

Слід зазначити, що при проведеній дослідної оцінці забрудненості смуг металу сталі марки 08кп/пс, відпалених в традиційних печах з атмосферою ННх-газу, рівень забрудненості вуглецем був отриманий значно більш високим - від 6,0 до 22,7 мг/м<sup>2</sup> (середнє 18,4 мг/ м<sup>2</sup>).

Рулони металу, відпалені в атмосфері сухого водню, мають також значно більш високий, ніж після відпалу в атмосфері ННх-газу, товарний вигляд, поверхня смуг світла, з сріблястим відтінком.

Проведені дослідження і наладка устаткування ковпакових печей фірми «Ебнер» дали достатньо високі показники по продуктивності і економії природного газу. Складена порівняльна характеристика за технологією відпалу ковпакових печей старого і нового зразка.

Таблиця 2.2 – Аналіз середніх значень і середньоквадратичних відхилень механічних властивостей холонокатаного металу сталей марок 08Ю, 08КП/ПС і ЗКП/ПС, відпаленої в середовищі сухого водню в печах фірми "Ебнер" і в печах з H<sub>N</sub>x- газом

Марка сталі	Кількість випробувань	δ4		σ <sub>T</sub>		σ <sub>B</sub>	
		Середн.	Сер.кв.відх.	Середн.	Сер.кв.відх.	Середн.	Сер.кв.відх.
Метал, відпалений в печах фірми "Ебнер"							
08Ю	862	41,61	2,119	18,96	0,903	30,17	0,928
08КП/ПС ДЕСТ 9045-	51	38,16	2,999	22,85	2,389	32,33	1,740
08КП/ПС ДЕСТ 16523-97	558	38,18	2,954	24,06	2,359	33,86	1,648
ЗКП/ПС	20	33,20	2,135	27,58	1,925	40,58	1,938
Метал, відпалений в печах з H <sub>N</sub> x-газом							
08Ю	182	41,43	2,400	19,09	0,894	30,58	0,948
08КП/ПС ДЕСТ 9045-	220	37,60	3,256	24,20	2,755	33,70	1,937
08КП/ПС ГОСТ 16523-07	7663	36,32	3,163	25,46	2,391	35,36	1,633
ЗКП/ПС	402	31,32	3,348	28,81	2,986	41,23	2,315

# Продуктивність, т/годин

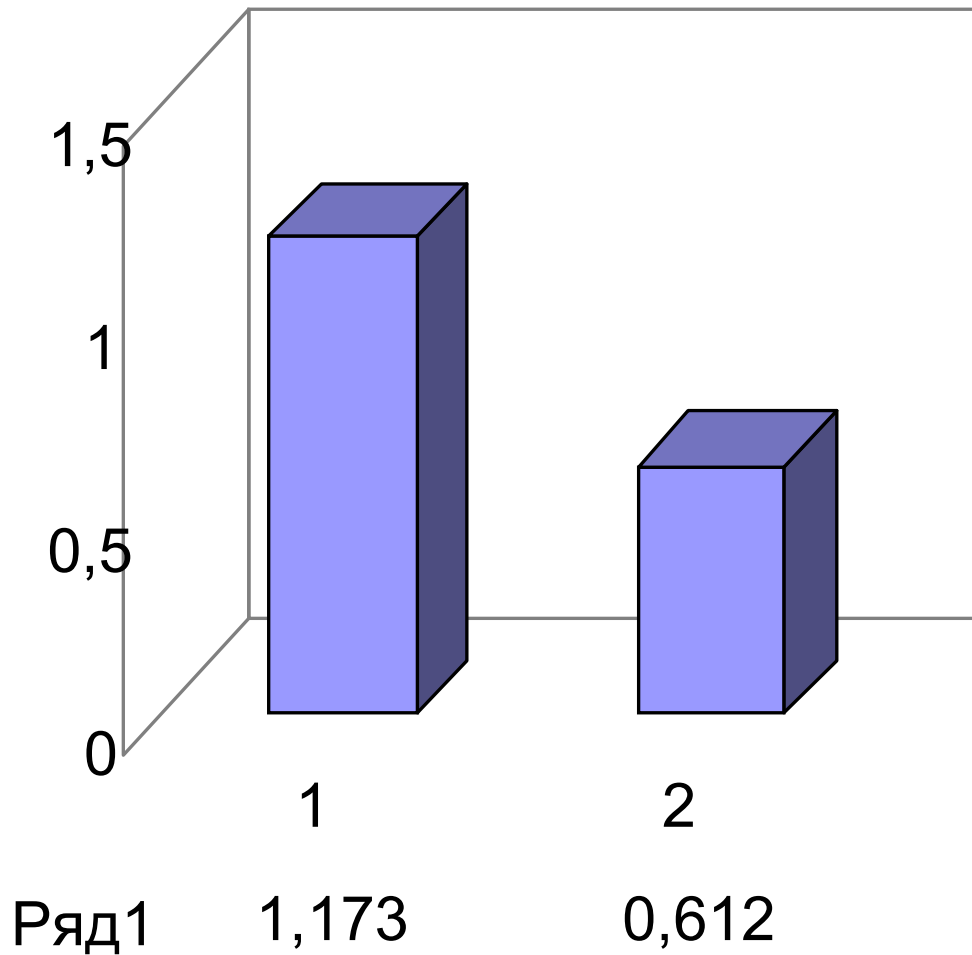


Рисунок 2.1 – Продуктивність ковпачкових печей:

1 – ковпачкові печі фірми «Ебнер»;

2 - ковпачкові печі з NHx - газом



# Витрата природного газу, м<sup>3</sup>/т

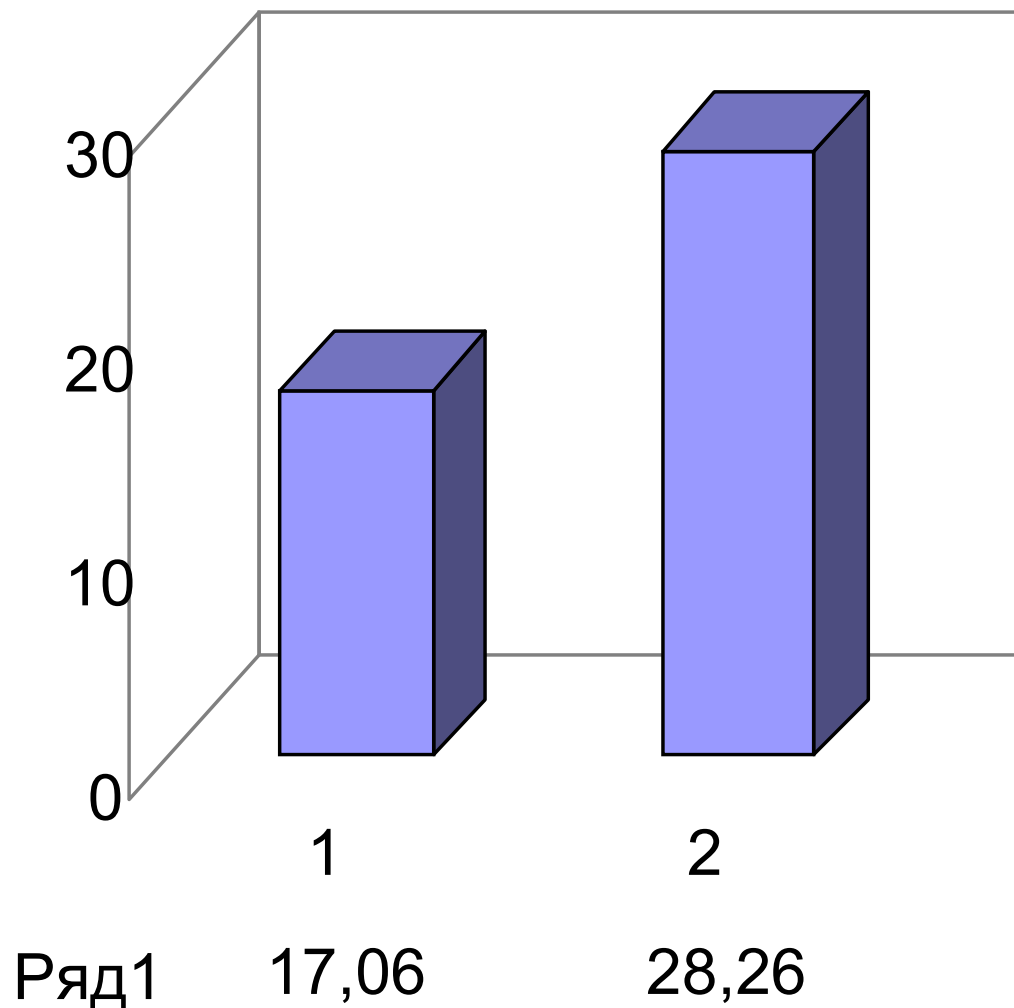


Рисунок 2.2 – Витрата природного газу ковпачових печей:

1 – ковпачові печі фірми «Ебнер»;

2 - ковпачові печі з HNx - газом

## 2.4 Економічні аспекти дослідницької проблеми

Металургійний комбінат «Запоріжсталь» є одним з основних постачальників якісного плоского прокату, гнутих профілів і жерсті для потреб української промисловості і експорту.

За об'ємом виробництва сталі ВАТ «Запоріжсталь» входить в четвірку найкрупніших металургійних підприємств України, а по виробництву тонколистового, у тому числі холоднокатаного, прокату утримує лідерство.

ВАТ «Запоріжсталь» є єдиним на Україні підприємством по виробництву тонколистового прокату з неіржавіючих і легованих сталей, гнутих профілів, консервної жерсті.

Комбінат «Запоріжсталь» складається з 8 основних і 56 допоміжних цехів, в яких трудяться більше 20 тис. людина. Щорічно підприємство проводить більше 3,1 млн. т чавуну, 3,9 млн. т сталі і 3,4 млн. т прокату. Комбінат володіє унікальним устаткуванням по виробництву крупногабаритних холоднокатаних листів із спеціальних сталей, а також шліфованих і полірованих смуг і листів з неіржавіючих сталей.

Останніми роками наголошується стійка тенденція зростання об'ємів вироблюваної продукції, вдосконалення якості і поліпшення економічних показників діяльності підприємства. Цьому неабиякою мірою сприяє висока кваліфікація і досвід інженерів і робітників комбінату, уміла експлуатація ними металургійних агрегатів і устаткування, розробка і упровадження власних технологій, інтенсифікація і автоматизація виробничих процесів, вдосконалення структури управління.

На сьогоднішній день «Запоріжсталь» випускає більше 300 т. прокату в місяць крім іншої продукції. Серед основної продукції заводу є: чавун товарний, сляби товарні, литво фасону, формені вироби, рулони гарячекатані і холоднокатані, листи гарячекатані і холоднокатані, чорна і біла жерсть, гнуті і формені профілі, листи і рулони з неіржавіючої сталі, стрічка обріза.

Головна необхідність модернізації технологічного устаткування пов'язана з питаннями якості. Продукція повинна задовольняти запитам замовників і бути конкурентноспроможною на світовому ринку.

Залежно від групи сталей і вимог стандартів або технічних умов контроль сортового прокату після термічної обробки може включати: перевірку твердості, якості зламу, макро- і мікроструктури, глибини знеуглецювання і механічних властивостей. Основна вимога при всіх видах контролю - гарантія якості і властивостей металу при мінімальній кількості випробувань.

Сортовий прокат поставляється споживачам партіями, які складають з металу однієї плавки, одного режиму термічної обробки і однакового за розміром профілю. Залежно від групи сталей і виду контролю проби для випробувань відбирають від партії, від плавки або садіння. Правильний вибір місця узяття проби має велике значення для надійності результатів контролю.

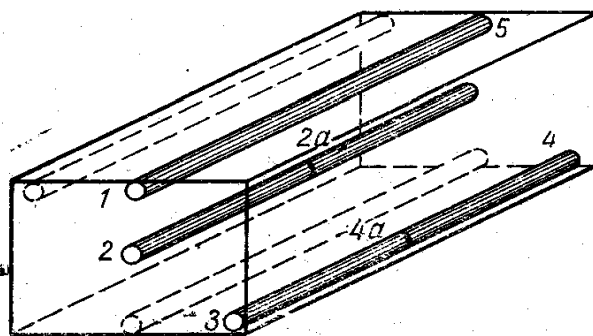


Рисунок 2.3 – Схема відбору проб для контролю сортового прокату

Проби, позначені цифрами 1, 2, 3, 4, 5, беруть від кінців прутків, а проби 2a і 4a - з середини з таким розрахунком, щоб залишок прутка був не менше 2 м. Проби 1, 2 і 3 відповідають передній стороні садіння, зверненій до завантажувального вікна, а проби 4 і 5—тильної.

Твердість визначають по ДЕСТ 9012 - 59 на пресі Брінеля безпосередньо на прутках — штангах, а решту видів випробувань виконують на пробах, вирізаних з них. Виміри на прутках проводять з обох кінців на

відстані приблизно 100 мм від торця. Ділянки поверхні, призначені для контролю, зачищають абразивним кругом для видалення знеуглецьованого шару і отримання чистого плоского майданчика, що полегшує завмер.

На прутках розміром більше 16 мм твердість виміряють 10 мм кулькою при навантаженні 30 кН (3000 кг). Для прутків меншого діаметра використовують кульку діаметром 5 мм при навантаженні 7,5 кН (750 кг). Прутки для контролю твердості слід вибирати з різних місць садіння.

Для контролю по зламу на пробі роблять одно- або двосторонній надріз з подальшим отломом. Поверхню зламу оглядають неозброєним оком. Залежно від вимог Госту перевіряють макроструктуру, контролюють відсутність раковин, неметалічних включень, розшарувань і інших дефектів. При виявленні флокенів хоча б в одному прутке весь метал партії бракують і повторно до приймання не пред'являють.

Методика інших видів контролю передбачена відповідними ДЕСТами:

1763 – 68 - визначення глибини знеуглецювання; 5639 – 65 - визначення величини зерна; 5657 – 69 - визначення прокалюваності;

M97 – 61 - випробування на розтягування; 9454 – 60 - випробування на удар; 9012 – 59 - визначення твердості.

При отриманні незадовільних результатів яких-небудь випробувань допускаються повторні випробування на подвоєному числі зразків. Результати повторних випробувань є остаточними.

Рекристалізаційний відпал холоднокатаного прокату в термічному відділенні цеху холодної прокатки №1 (ЦХП-1) здійснюється в газових ковпакових термічних печах конструкції 60-х років, які мають низьку продуктивність (0,4-0,5 т/год, тобто приблизно в 2-2,5 рази нижче за сучасні печі аналогічного призначення) при високому споживанні електроенергії 17-20 кВт/годин, захисного газу (8-10 м<sup>3</sup>/годин) і природного газу (до 55 кг/т). Перш за все цим визначається актуальність їх модернізації або заміни.

На комбінаті планомірно проводиться модернізація печей відпалу, як правило, без їхньої реконструкції, при мінімумі витрат, з виготовленням і

монтажем нових вузлів і пристроїв своїми силами. Проводяться також підготовчі і дослідно-конструкторські роботи, направлені на заміну існуючих печей новими, з використанням як захисний газ 100 %  $H_2$  і технології типу HiCON/ $H_2$ . Основною метою модернізації печей відпалу є інтенсифікація нагріву холоднокатаних рулонів за рахунок: підвищення ефективності примусової циркуляції в підмуфельному просторі захисного газу  $HN_x$  традиційного складу (4 %  $H_2$  + 96 %  $N_2$ ); підвищення напірності і продуктивності газонагнітаючого вузла; оптимізації розподілу опору по тракту руху захисного газу і інтенсифікацію процесів теплообміну. Для цього, зокрема, упроваджуються направляючі апарати стендів печей відпалу і конвекторні кільця нової конструкції, циркуляційні вентилятори з підвищеною напірністю і продуктивністю.

Ефективність впроваджуваних заходів визначається шляхом проведення промислових досліджень при стендових випробуваннях і при експлуатації модернізованих печей в течію не менше року. При цьому використовуються різні критерії оцінки, а також базове початкове положення, що в умовах промислового виготовлення холоднокатаного прокату із заданою якістю із сталі фіксованого (по ДЕСТ і ТУ) хімічного складу, при виконанні вказаних в діючих технологічних інструкціях (ТІ), температурно-деформаційних режимів обробки (ТДО) на попередніх переділах, ефективність кризної технології виробництва холоднокатаного прокату, у тому числі вплив, на його задані властивості в значній мірі визначаються станом устаткування і режимами термічної обробки.

Доцільність застосування такого підходу при модернізації вузлів і агрегатів діючих печей відпалу в ЦХП підтверджена основним результатом проведених на комбінаті комплексу робіт і промислових досліджень, суть якого у виявлених можливостях підвищення продуктивності стендів печей приблизно на 50 % (по відношенню до середніх показників в ЦХП), економії природного і захисного газу до 30 %, електроенергії до 25 %. Якість холоднокатаного прокату відповідає вимогам ДЕСТ і ТУ. Актуальність

модернізації або заміни ковпакових печей старого типу визначається їх низькою продуктивністю 0,4 - 0,5 т/год, яка в 2 - 2,5 рази нижче тій, що досягається на сучасних печах, а також великим споживанням природного газу (до 55 кг/т).

## 3 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1 Розрахунок на міцність станини робочої кліті

Виконати розрахунок на міцність і визначити твердість станини робочої кліті стана кварта для холодної прокатки штаби. Максимальне зусилля на натискний гвинт.

Побудова нейтральної лінії станини, що проходить через центри ваги основних розрахункових перетинів станини.

Перетин А - А верхньої поперечки. Площа перетину:

$$F = F_1 - F_2 - F_3 = BH - b_1h_1 - b_2h_2, \quad (3.1)$$

де  $F$  - площа поперечного переріза;

$B$  - ширина стійки;

$H$  - висота стійки.

Статичний момент перетину щодо осі X - X:

$$S = F_1 \frac{H}{2} - F_2 \frac{h}{2} - F_3 \left( h_1 + \frac{h_2}{2} \right), \quad (3.2)$$

Визначимо центр ваги:

$$y_c = \frac{S}{F}, \quad (3.3)$$

Момент інерції перетину щодо осі  $x_1 - x_1$ , що проходить через центр ваги, тому що середній перетин верхньої поперечки ослаблено отвором для натискної гайки і натискного гвинта і при розточенні на верстаті цього отвору в перетині виникають концентратори напруг, то для забезпечення необхідного запасу міцності станини конструктивно приймають розміри

цього перетину такими, щоб момент інерції перетину верхньої поперечки  $I_1$  був більше моменту інерції перетину нижньої поперечки  $I_3$  (рис. 3.2).

Момент інерції перетину щодо осі  $x_1 - x_1$  проходить через центр ваги:

$$I_A = I_1 - I_2 - I_3, \quad (3.4)$$

$$I_1 = \frac{BH^3}{12} + a^2 F = BH \frac{H^2}{12} + BH \left( y_c - \frac{H}{2} \right)^2 + BH \left[ \frac{H^2}{12} + \left( y_c - \frac{H}{2} \right)^2 \right], \quad (3.5)$$

$$I_2 = \frac{b_1 h_1^3}{12} + a_1^2 F_1, \quad (3.6)$$

$$I_3 = \frac{b_2 h_2^3}{12} + a_2^2 F_2, \quad (3.7)$$

Мінімальний момент опору перетину:

$$W_A = \frac{I_A}{I_C}, \quad (3.8)$$

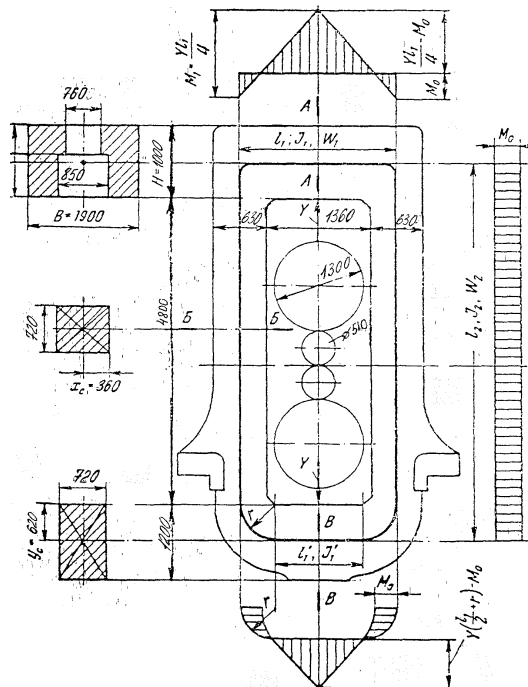


Рисунок 3.1 – Схема до розрахунку станини чотирьохвалкового станa



Перетин Б - Б стійки станини:

$$F = BH, \quad (3.9)$$

$$W_B = \frac{I_B}{X_C}, \quad (3.10)$$

Перетин А - А розраховуємо по формулах (3.1) – (3.8):

$$F = 1,51 \cdot 1,3 - 0,85 \cdot 0,65 - 0,74 \cdot 0,65 = 0,93 \text{ м}^3;$$

$$S = \frac{1,963}{0,65} - 0,552 \cdot 0,375 - 0,481(0,65 + 0,375) = 0,628 \text{ м}^3;$$

$$y_c = \frac{0,628}{0,93} = 0,62 \text{ м} = 620 \text{ мм};$$

$$I_1 = 1,963 \left[ \frac{1,3^2}{12} + \left( 0,67 - \frac{1,3}{2} \right)^2 \right] = 0,277 \text{ м}^4;$$

$$I_2 = 0,85 \cdot 0,65 \left( \frac{0,65}{12} + \left( 0,65 - \frac{0,65^2}{2} \right) \right) = 0,085 \text{ м}^2;$$

$$I_3 = 0,481 \left( \frac{0,65^2}{12} + \left( 0,67 - \frac{0,65^2}{2} \right) \right) = 0,074 \text{ м}^2;$$

$$I_A = 0,277 - 0,085 - 0,074 = 0,117 \text{ м}^4;$$

$$W_A = \frac{0,117}{0,62} = 0,17 \text{ м}^3.$$

Перетин Б - Б розраховуємо по формулах (3.9) – (3.10):

$$F = 0,74 \cdot 0,775 = 0,558 \text{ м}^2;$$

$$x_c = 0,63 \text{ мм} = 630 \text{ м};$$

$$W_B = \frac{0,028}{0,63} = 0,044 \text{ м}^3.$$

Перетин В - В нижньої поперечки:

$$F = 0,74 \cdot 1,2 = 0,96 \text{ м}^2;$$

$$I = \frac{0,96^3}{12} = 0,115 \text{ м}^4;$$

$$W_B = \frac{0,96^2}{6} = 0,192 \text{ м}^3.$$

Знаючи положення центрів ваги перетину, будемо нейтральні лінії поперечин і стійок, з'єднаємо їхнім закругленням у кутах і в такий спосіб одержуємо тверду раму, навантажену вертикальними силами  $Y$ .

Статично невизначений момент у кутах рами:

$$k_1 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_B}{I_B}, \quad (3.11)$$

$$k_2 = \frac{l_2}{l_1}, \quad (3.12)$$

$$k_3 = \frac{I_1}{I_3}, \quad (3.13)$$

$$M_1 = \frac{Yl_1}{4}, \quad (3.14)$$

Статичний невизначений момент у кутах рами визначаємо з формул (3.11) – (3.14):

$$k_1 = \frac{0,115}{0,028} = 4,11;$$

$$k_2 = \frac{6,31}{2,28} = 2,76;$$

$$k_3 = \frac{0,115}{0,062} = 1,8;$$

$$M_1 = \frac{9 \cdot 2,285}{4} = 5,14 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_0 = 5,14 \frac{1 + 4 \cdot 0,262(1,15 \cdot 1,8 \cdot 0,262 + 1)}{2(1 + 4,11 \cdot 2,76 + 17 \cdot 1,8 \cdot 0,262)} = 0,48 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_A = 5,14 \frac{1}{2(1 + 4,11 \cdot 2,76)} = 0,208 \text{ MN} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, з обліком закруглення в кутах рами  $M_o$  майже у два рази більше, однак в обох випадках  $M_o$  значно менше  $M_1$ .

Момент, що згинає, у поперечці визначаємо по формулі (3.15):

$$M_n = M_1 - M_c = 5,14 - 0,48 = 4,66 \text{ MN} \cdot \text{м}, \quad (3.15)$$

Напруга вигину в середині поперечки, верхньої - перетин А - А по формулі (3.16):

$$\sigma_A = \frac{M_{II}}{W_A} = \frac{4,66 \cdot 10^9}{0,17 \cdot 10^9} = 27,4 \text{ Н / мм}^2, \quad (3.16)$$

Нижній, перетин В - В по формулі (3.17):

$$\sigma_B = \frac{M_{II}}{W_B} = \frac{4,66 \cdot 10^9}{0,192 \cdot 10^9} = 24,2 \text{ Н / мм}^2, \quad (3.17)$$

Напруга розтягання в стійці, перетин Б - Б:

$$\sigma_B = \frac{0,48 \cdot 10^9}{0,071 \cdot 10^9} + \frac{9 \cdot 10^6}{2 \cdot 0,558 \cdot 10^6} = 14,8 \text{ Н / мм}^2.$$

Станина виготовлена зі сталі марки 35Л і після виливка має  $\sigma_B = 500 \text{ Н / мм}^2$

Запас міцності з виразу (3.18):

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{MAX}} = \frac{500}{24,2} = 20,6, \quad (3.18)$$

З урахуванням наявності концентрації напруг у розточенні під натискну гайку, приймаючи коефіцієнт концентрацій  $k = 2,8$  запас по втомленої міцності буде дорівнювати:

$$n_f = \frac{1}{2k} \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma} = \frac{1}{5,6} \cdot \frac{500}{27,4} = 3,2, \quad (3.19)$$

Припустимий мінімальний запас для станини по втомленої міцності  $[n_f] = 1,5 < 2,9$ . [5]

Деформація станини у вертикальному положенні, приймаємо  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Н / мм}^2$  :

- розтягання кожної стійки силою  $Y/2$  з вираження (3.20):

$$f_1 = \frac{Yl_2}{2EF_2} = \frac{9 \cdot 10^6 \cdot 6310}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,555 \cdot 10^6} = 0,242 \text{ мм}, \quad (3.20)$$

- прогин двох поперечин від вигину по формулі (3.21):

$$f_2 = \left( \frac{Yl_1}{6} - M_o \right) \frac{l_1^2}{4EI_1} = \left( \frac{9 \cdot 10^6 \cdot 2,285}{6} - 0,48 \cdot 10^6 \right) \frac{2,285}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,117 \cdot 10^{12}} = 0,18 \text{ мм}, \quad (3.21)$$

- деформація двох поперечин від дії поперечних сил по формулі (3.22):

$$f_3 = 1,2 \frac{Yl_1}{2GF_1} = \frac{9 \cdot 10^6 \cdot 2,285}{2 \cdot 0,75 \cdot 10^5 \cdot 0,96 \cdot 10^5} \cdot 1,2 = 0,17 \text{ мм}.$$

Сумарна деформація станини у вертикальному напрямку в площині осі натискного гвинта:

$$\Sigma f_{CT} = 0,242 + 0,18 + 0,17 = 0,592 \text{ мм}.$$

Отримані результати розрахунку станини на міцність зводимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок станини на міцність

Перетин А – А верхньої поперечки				
$F,$ $m^2$	$S,$ $mm^2$	$y_c,$ $m$	$W_A,$ $m^3$	$I_A,$ $m^4$
0,93	0,628	0,62	0,17	0,117
Перетин Б – Б стійки станини				
$F,$ $m^2$	$X_c,$ $mm$	$I_B,$ $m^4$	$W_B,$ $m^3$	
0,5587	0,63	0,028	0,044	
Перетин В – В нижньої поперечки				
$F,$ $m^2$	$y_c$	$I_B,$ $m^4$	$W_B,$ $m^3$	
0,96	0,62	0,1152	0,192	
Статично невизначений момент у кутах рами				
$\kappa_1$	$\kappa_2$	$M_1,$ $MН \cdot m$	$M_2,$ $MН \cdot m$	
4,11	2,76	5,14	0,208	
Деформація станини у вертикальному напрямку				
$f_1,$ $mm$	$f_2,$ $mm$	$f_3,$ $mm$	$\Sigma f_{cc},$ $mm$	
0,242	0,18	0,17	0,592	

### 3.2 Розрахунок тихохідного натискного механізму

На рис. 3.2 наведена кінематична схема натискного механізму чотирьохвалкової робочої кліті стана 1680. Редуктор натискного механізму



Напруження стискання в перетині нижнього опорного кінця гвинта, що має найменший діаметр  $d_H = 350 \text{ мм}$ , визначаємо по формулі:

$$\sigma_{сж} = 4Y / \pi d^2_H, \quad (3.23)$$

Напруження кручення в тілі гвинта при  $M_B = 61 \text{ кН} \cdot \text{м}$ , визначається по формулі:

$$\tau = M_B / 0,2 D^3, \quad (3.24)$$

Матеріал гвинта – сталь 40ХН. Натискна гайка висотою  $H = 720 \text{ мм}$  і зовнішнім діаметром  $D = 550 \text{ мм}$ ; число витків різьблення  $z = H/s = 550/10 = 55$ .

Напруження зминання між витками гвинта і гайки визначаємо з вираження:

$$\sigma_{см} = 4Y / \pi (d^2 - d_1^2) z, \quad (3.25)$$

Напруження зминання по площі зіткнення гайки зі станиною:

$$\sigma_{см} = 4Y / \pi (D^2 - D_{отв}^2), \quad (3.26)$$

З формули (3.23) визначимо напруження стискання в перетині нижнього опорного кінця гвинта:

$$\sigma_{сж} = 4 \cdot 8,5 \cdot 10^6 / 3,14 \cdot 350^2 = 89 \text{ МПа}.$$

Напруження кручення в тілі гвинта визначимо з виразу (3.24):

$$\tau = 6,1 \cdot 10^6 / 0,2 \cdot 350 = 0,76 \text{ Н / мм}^2 = 76 \text{ МПа}.$$

Напруження зминання між витками гвинта і гайки знаходимо з виразу (3.25):

$$\sigma_{см} = 4 \cdot 8,5 \cdot 10^6 / 3,14(440^2 - 358^2)55 = 11,8 \text{ Н / мм}^2 = 11,8 \text{ МПа}.$$

Напруження зминання по площі зіткнення гайки зі станиною визначаємо по формулі (3.26):

$$\sigma_{см} = 4 \cdot 8,5 \cdot 10^6 / 3,14(750^2 - 470^2) = 33 \text{ Н / мм}^2 = 33 \text{ МПа}.$$

Матеріал гайки бронза марки АЖ9-4л,  $[\sigma] \approx 80 \text{ МПа}$ .

У періоди пауз між пропусками металу через валки на торці натискних гвинтів діє зусилля від пристрою зрівноважування верхнього валка. На один гвинт це зусилля становить 150 кН. Момент необхідний для обертання гвинта в період пауз, знаходимо по формулі:

$$M_B = Y[\mu_n \cdot d_n / 3 + d_{cp} / 2 \cdot \text{tg}(\alpha + \varphi)], \quad (3.27)$$

де  $Y$  – зусилля, що діє на натискний гвинт;

$d_n$  – діаметр п'яти натискного гвинта;

$\mu_n$  – коефіцієнт тертя в п'яті;

$d_{cp}$  – середній діаметр різьблення натискного гвинта;

$\alpha$  – кут підйому різьблення;

$\varphi$  – кут тертя в різьбленні між натискною гайкою й гвинтом; звичайно (при нормальному змащенні різьблення) приймають  $\mu_n = 0,1$ , тоді  $\varphi = 4^\circ 34'$ ,

$d_n = 520 \text{ мм}$ ;  $\mu_p = 0,08$ .

При опусканні гвинта:



$$M'_B = 150 \left[ 0,52 / 3 \cdot 0,1 + 0,404 / 2 \cdot \operatorname{tg}(2^\circ 10' + 4^\circ 34') \right] \quad (3.28)$$

При підйомі гвинта:

$$M''_B = 150 \left[ 0,52 / 3 \cdot 0,1 + 0,202 \operatorname{tg}(4^\circ 34' + 2^\circ 10') \right] \quad (3.29)$$

З виразу (3.27) визначаємо момент необхідний для обертання гвинта в період пауз, при опусканні гвинта:

$$M'_B = 150(0,017 + 0,202 \cdot 0,118) = 6,1 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

З виразу (3.28) визначаємо момент необхідний для обертання гвинта в період пауз, при підйомі гвинта:

$$M''_B = 150(0,017 + 0,202 \cdot 0,042) = 3,8 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

Кожний натискний гвинт приводиться від окремого електродвигуна постійного струму потужністю 180 кВт, 500 об/хв.; номінальний момент електродвигуна при  $\omega_H = \pi / 30 \cdot n_n$ :

$$M_H = N_H / \omega_H = 30 / \pi \cdot N_H / n_n \approx 9,56 \cdot N_H / n_n, \quad (3.30)$$

$$M_H = 9,56 \cdot 180 / 500 = 3,44 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

Між двигуном і натискним гвинтом є зубчаста передача з передаточним числом  $i = 4,5$ ; к. п. буд. передачі  $\eta = 0,97$ . моменти на гвинті (статичні, від постійного навантаження  $Y = 150$  кН), наведені до вала електродвигуна:

$$M'_{cm} = 6,1(4,5 \cdot 0,95) = 1,42 \text{кН} \cdot \text{м};$$

$$M''_{cm} = 3,8 / (4,5 \cdot 0,95) = 0,89 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

При повторно-короткочасному режимі електродвигуни працюють при часто повторюваних прискореннях і з (пуск - гальмування). Для розгону обертових мас від електродвигуна будуть потрібні додаткові моменти і потужність.

Визначимо цей додатковий момент.

Моменти інерції,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ : якоря електродвигуна 25 (по каталозі); проміжних шестірень 220; натискного гвинта 80. Наведений до вала електродвигуна момент інерції всіх обертових мас.

$$I_{np} = 25 + 220 + 80 / i^2 = 25 + 300 / 4,5^2 = 40 \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

У період розгону і гальмування електродвигун здатний працювати з кутовим прискоренням  $\varepsilon = d\omega / dt$  і розвивати динамічний момент:

- при опусканні натискного гвинта при  $\varepsilon = 501 / \text{с}^2$ :

$$M'_{дин} = I_{np} \varepsilon, \quad (3.31)$$

$$M'_{дин} = 40 \cdot 50 = 2000 \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \text{м}(\text{Н} \cdot \text{м}) = 2 \text{кН} \cdot \text{м};$$

- при підйомі натискного гвинта при  $\varepsilon = 601 / \text{с}^2$ :

$$M''_{дин} = 40 \cdot 60 = 2400 \text{Н} \cdot \text{м} = 2,4 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

Моменти на валу електродвигуна в період розгону:

- при опусканні натискного гвинта:

$$M'_{ов} = M'_{cm} + M'_{дин}, \quad (3.32)$$

- при підйомі натискного гвинта:

$$M''_{\text{дв}} = M''_{\text{ст}} + M''_{\text{дин}}, \quad (3.33)$$

З виразів (3.32) – (3.33) визначимо моменти на валу електродвигуна в період розгону при опусканні і при підйомі натискного гвинта:

$$M'_{\text{дв}} = 1,42 + 2,0 = 3,42 \text{кН} \cdot \text{м};$$

$$M''_{\text{дв}} = 0,89 + 2,4 = 3,29 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

Висновок: при повторно-короткочасному режимі роботи електродвигуна основне навантаження становлять динамічне (а не статистичні) моменти. Тому що  $M_{\text{дв max}} = 3,42 \text{кН} \cdot \text{м}$  менше  $M_H = 3,44 \text{кН} \cdot \text{м}$ , то електродвигун забезпечить заданий режим роботи. Крім того, електродвигун допускає короткочасне двохкратне перевантаження по моменту, що може бути використано при пікових навантаженнях (наприклад, при відводі натискних гвинтів при пробуксовці валків по металу, що прокатують коли зусилля на гвинт більше прийнятого вище в розрахунку при визначенні  $M_H$ ).

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, направлених на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

У законі України “Про охорону праці” і у Кодексі законів про працю передбачається обов'язкова розробка безпечних і нешкідливих умов праці в стадії проектування виробництва. Комітет з нагляду за охороною праці продовжує почату у 1994 році масштабну роботу зі створення в Україні своєї нормативної бази з питань безпеки, гігієни праці виробничого середовища.

Поліпшення умов праці, підвищення її безпеки впливають на результати виробництва – на продуктивність роботи, якість та собівартість продукції, яка випускається. Питання поліпшення умов праці - одна з найважливіших задач, поставлених часом. В Україні велике значення відводиться питанням охорони праці. Вона служить для створення оптимальних умов праці, які забезпечують людині необхідний комфорт, зберігають здоров'я і працездатність. Однією з вимог конкурентної здатності промислового виробництва є економічно обгрунтований перехід від ручної роботи до машинного, забезпеченню здорових санітарно-гігієнічних умов та впровадженню сучасної техніки безпеки, які запобігають промислому травматизму та професійним захворюванням.

### **4.1 Система охорони праці на ПАТ «Запоріжсталь»**

Система охорони праці на підприємстві ПАТ «Запоріжсталь» базується на нормативній базі: Конституції України, Закону України «Про

охорону праці» в редакції від 21.11.2002г., КЗоП і інших підзаконних нормативних актів і відповідно до Закону України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасних випадків, професійного захворювання і аварій на виробництві», а також положення «Про охорону праці, протипожежної безпеки і виробничої санітарії для робочих ІТР і працівників комбінату» № - 0,01 від 1998 року.

До самостійної роботи в термічному відділенні допускаються особи не молодше 18 років годні за станом здоров'я, що пройшли спеціальне навчання, мають посвідчення по професії, що вивчили дану інструкцію, що оволоділи безпечними прийомами в роботі і призначені розпорядженням по цеху.

Працівник термічного відділення зобов'язаний знати інструкції і правила.

#### **4.2 Вимоги безпеки для робітників термічного відділення**

Робітник термічного відділення зобов'язаний:

- на роботу приходити відпочилим і підготовленим, у встановленій спецодягу, касці в засобах індивідуального захисту.
- виконувати правила внутрішнього трудового Розпорядку, розпоряджень адміністрації, дотримувати вимоги правил ТБ.
- працювати у встановлений час і виконувати тільки доручену адміністрацією роботу.
- містити в чистоті і порядку робоче місце, а також дотримувати чистоту в цеху і на території комбінату.

Робітник термічного відділення підкоряється безпосередньо змінному майстру і термісту прокату (старшому). Виконання робіт, не обумовлених справжньою інструкцією, допускається тільки після отримання відповідного інструктажа від змінного майстра безпосередньо на робочому місці.

При отриманні травми або мікротравми робітник зобов'язаний повідомити сам або через когось змінному майстру, звернутися в

здравпункту для надання першої допомоги. При нещасному випадку негайно облямувати потерпілого в здравпункт з обов'язковим супроводом потерпілого, припинити все роботи в даній зоні зберегти обстановку, яка була у момент травми якщо це не може спричинити додаткових травм або аварій і не спричинить крупного матеріального збитку, доповісти змінному майстру або начальнику зміни і не допускати сторонніх осіб до розслідування комісією причин.

Робітник повинен знати властивості азото-водневого і природного газів вживаних на печах, газонебезпечні місця, ознаки отруєння і заходи надання першої допомоги потерпілим. При виявленні витоку газів необхідно поставити в популярність змінного майстра і вжити заходів по її усуненню.

Знати і виконувати вимоги інструкції по протипожежній безпеці, уміти користуватися первинними засобами гасіння пожеж використовувати протипожежний інвентар і устаткування тільки за призначенням. Дотримувати заходи електробезпеки. Кожний працівник повинен знати, що дотик до токовідомих частин, що знаходяться під напругою, веде до поразення електричним струмом. Змінний струм, проходячи через тіло людини залежно від сили струму, викликає судорожне скорочення м'язів, утрудняє діяльність органів дихання і серця, що може привести до повного припиненню дихання і кровообігу.

При поразенні людини електричним струмом, відключити джерело струму за допомогою рубильника або відкинути дріт сухим діелектричним предметом

надати заходи першої допомоги при поразці електричним струмом (зробити

штучне дихання). Знати і виконувати правила особистої гігієни, спецодяг містити в чистому стані, пити воду тільки з питних фонтанчиків і сатураторів приймати пищу тільки в спеціальний час і в спеціально

відведених місцях. Перед їдою обов'язково мити руки, після закінчення роботи прийняти душ.

Перед початком роботи перевірити чистоту і освітленість робочих місць агрегату, справність вентиляції, приладів контролю, сигналізації і зв'язку. Наявність сигнальних ламп і кнопок і ручок управління. Перевірити справність устаткування, наявність і надійність кріплення огорож частин механізмів, що обертаються. Перевірити справність і надійність установки перекриттів траншей і лотків. Перевірити наявність і справність вантажозахватних пристосувань і інструментів, засобів пожежогасінні. Взяти у змінника про несправності в роботі устаткування, про неполадки в роботі контрольно-вимірювальних приладів і інших відступах від правил ТБ і вжитих заходів по їх усуненню.

Зажадати у змінника усунення всіх зауважень, виявлених при прийомі зміни. На змінно-стрічному зборі доповісти старшому робітнику і змінному майстру про всі зауваження, виявлені при прийомі зміни.

Якщо виявлені зауваження неможливо усунути самотійно, вимагати їх усунення від старшого робочого і змінного майстра на початку зміни. Після усунення всіх відступів від правил ТБ доповісти про готовність агрегату до роботи. Під час роботи. Бути уважним, не відволікатися самому і не відволікати інших від виконуваної роботи. Не допускати на робочі місця агрегату сторонніх осіб.

Працювати справним інструментом на справному устаткуванні. Користуватися необхідними індивідуальними засобами захисту. Використовувати інструмент і пристосування за призначенням.

Подавати і виконувати тільки чіткі команди, виконання яких не може привести до нещасного випадку або аварії. Команда "Стоп!" подається будь-кому обличчям і виконується негайно. Робітник повинен завжди пам'ятати, що управляє комплексом механізмів агрегату, на якому працюють інші бригади і від його дій залежить їх безпека. Перш ніж

виконати або подати яку-небудь команду необхідно переконатися у відсутності людей в небезпечній зоні.

Строго дотримувати технологічну інструкцію і інструкції по ТБ для працівників термічного відділення. Постійно стежити за свідченнями і справною роботою контрольно-вимірювальних приладів. Стежити за безаварійною роботою механічного і допоміжного устаткування.

Про кожний випадок відступів від правил ТБ, порушень роботи устаткування робітник зобов'язаний доповісти майстру, викликати по приналежності персонал служб для усунення порушення. При виникненні обриву смуги доповісти про це старшому робітнику і приступити до ліквідації аварії під його керівництвом, дотримуючи правила інструкції по усуненню обривів і заправці смуги.

При ремонті, настройці будь-яких механізмів на агрегаті, а також при перевалюванні змінного устаткування керуватися інструкцією по бирці системі. Виконувати роботи при розібраній електро-, пневмо-, гідро схемі закритих засувках на трубопроводах води, пари, газу і вивішених на них плакатах. Не відкривати - працюють люди. Всі заборонні плакати знімає обличчя вивісило їх.

При обході і огляді устаткування бути уважним, не заходити за огорожі механізмів, що обертаються і рухаються. Звертати увагу на наявність, справність і надійність кріплення огорожі, перекриттів тунелів, закриття електричних шаф і пускової апаратури відсутність масла і обрізі на робочих майданчиках, на освітленість робочих місць. При виявленні відступів від правил ТБ вжити заходів до їх усунення.

При неможливості усунути відступи самостійно повідомити про це старшому робочому або змінному майстру і зажадати вживання заходів.

Поправляти смугу або видаляти застряглий кінець смуги необхідно гачком завдовжки не менше 1 метра при непрацюючому устаткуванні.

Працівнику термічного відділення забороняється:

- знаходитися в нетверезому стані;



- знаходитися під час роботи агрегату в небезпечних зонах роботи механізмів за огорожами.
- торкатися і направляти руками смугу, що рухається.
- торкатися механізмів, що обертаються, при роботі агрегату.
- проводити настройку механізмів при зібраних схемах.
- проводити перевалювання змінного устаткування при зібраних схемах.
- користуватися відкритим вогнем на агрегаті.
- допускати осіб, що не мають відносин до ведення технологічного процесу, на робочі місця агрегату.
- залишати робоче місце без дозволу змінного майстра.
- палити в газонебезпечних місцях, а також поблизу цистерн, балонів металевих бочок або інших резервуарів.
- дивитися незахищеними очима на джерела інтенсивного випромінювання (електрозварювання, розплавлений метал і т.д.)
- ходити в інші відділення без службової необхідності.
- заходити в електроприміщення, а також в приміщення КЗП, кабіни контактних панелей, відкривати двері електророзподільних щитів.
- торкатися до електропроводів, тролей, рубильників, арматури загального освітлення і інших частин електроустаткування.
- проводити ремонт що вийшов з ладу електроустаткуванні.

Після закінчення роботи:

Прибрати робоче місце, здати в справному стані все устаткування зміннику доповіді про всі ті, що є в перебігу зміни несправностях в роботі устаткування і порушенню правил ТБ і вжитих заходів по їх усуненню. Доповісти старшому робітнику агрегату про здачу зміни, про отримані зауваження і вжитих заходів. Після здачі зміни не покидати робоче місце без дозволу старшого робочого або змінного майстра.

Перелік небезпечних і шкідливих виробничих чинників, характерних для даного виробництва:

- горючий газ (природний газ);

- захисний газ (водень і азот), що подається в подмуфельний простір;
- висока температура вузлів і агрегатів ковпакової печі, частин, що обертаються і рухаються (стендовий вентилятор);
- небезпечна напруга в управляючих шафах, силових шафах і щит; електророзподільної установки.

Обслуговуючий персонал пічної установки керується наступними правилами і інструкціями по охороні праці і промислової безпеки:

- правила безпеки в прокатному виробництві;
- правила безпеки в газовому господарстві підприємств чорної металургії БПГЧМ-86;
- інструкція по безпечному обслуговуванню газового господарства цехів, споживаючих газове паливо №20;
- книга на установку по обслуговуванню що обігрівається газом ковпакової пічної установки, тип НОg 170/535 St-H2-B, фірми "Ебнер";
- інструкція по охороні праці № 06.04-05 для робітників і машиністів електромостових кранів термічного відділення ЦХП- 1;
- план локалізації і ліквідації аварійної ситуації;
- інструкція по системі бирки.

Відповідальність за виконання вимог інструкцій по охороні праці і промислової безпеки несуть старший майстер термічного відділення, змінні майстри, старші термісти і працівники, що виконують технологічний процес.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізована ковпакова піч з захисною атмосферою сухого водню фірми «Ебнер». Оптимізація часу відпалу, кількості вуглецю після відпалу, середньої температури стопи та середньої температури ядра в кінці нагріву є актуальною для розглянутого стану.

2. Обрана методика й алгоритм визначення необхідних для розгляду параметрів.

3. Виконане моделювання впливу різних факторів на час відпалу, кількість вуглецю після відпалу, середню температуру стопи та середню температуру ядра в кінці нагріву. Отримані оптимальні поверхні відпаку, які представлені графічно.

4. Розглянуті економічні аспекти при проведенні дослідження.

5. Розглянуті питання охорони праці при проведенні дослідження. Встановлено, що застосування результатів роботи не погіршить стан охорони праці.

6. Внаслідок роботи ковпакових печей фірми «Ебнер» отримана економія природного газу становить 2233686 м<sup>3</sup> (2,68 млн. грн.)

7. Основними особливостями висококонвективних ковпакових печей з атмосферою сухого водню фірми «Ебнер», дозволяючими реалізувати можливості такої атмосфери за значно більш інтенсивній, ніж в азотоводневій атмосфері, конвективній передачі тепла між муфелем і садкою рулонів і від витка до витка в рулонах на стадіях як нагріву, так і охолодження, є:

- застосування частотно-регульованого електродвигуна з могутнім циркуляційним вентилятором;

- застосування нагрівального ковпака, футерованого волоконними вогнетривкими матеріалами, оснащеного високошвидкісними двошротяними пальниками;

- використання ефективного підігріву, що подається до пальників повітря центральним рекуператором і безперервне регулювання нагрівальної системи, яка забезпечує високий ККД і низькі питомі витрати енергоносіїв;
- спеціальна конструкція стенду, що дозволяє максимально використовувати його опорну поверхню;
- застосування гофрованого муфеля з жаростійкої сталі, герметично притискаємого до стенду фланцем за допомогою водоохолоджуваного гумового ущільнення і гідроприжимного циліндра;
- застосування охолоджуючого ковпака з гнучким і ефективним комбінованим регульованим повітряно-водним охолодженням;
- використання автоматизованої системи управління процесом роботи печей, із застосуванням спеціально розробленого оригінального програмного забезпечення і системи мікропроцесорного управління, що дозволяє задавати і оперативно коректувати температурні і газові режими нагріву і охолодження садіння металу.

Однак окрім водню в роботі печей фірми "Ебнер" застосовується азот, також одержуваний в установці захисного газу.. Азот необхідний для запобігання змішування водню з повітрям. Рулони металу, відпалені в атмосфері сухого водню, мають також значно більш високий, ніж після відпалу в атмосфері  $\text{HN}_x$ -газу, товарний вигляд, поверхня смуг світла, з сріблястим відтінком, що підтверджує доцільність застосування печей нового зразка.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Серода Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.
2. Серода Б.П. Прокатне виробництво : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 312 с.
3. Василёв Я.Д., Сафьян М.М. Производство полосовой и листовой стали : учебник для вузов. Киев : Вища школа, Главное издательство, 1976. 192 с.
4. Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А. Горелик В.С. Технология прокатного производства : учебное пособие для вузов. Киев: Вища школа, Главное издательство, 1989. 311 с.
5. Сафьян М.М., Мазур В.Л., Сафьян А.М., Молчанов А.И. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство : учебник для вузов. Киев: Вища школа, Главное издательство, 1988. 351 с.
6. Жук А. Я., Малышев Г. П., Желябина Н. К., Клевцов О. М. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование : монография. Запорожье : ЗГИА, 2008. 224 с.
7. Копцев В.В., Борисова М.П., Казаков О.В., Горбулин В.Н. Двухпроводная горелка с центральным телом для газовых одностопных колпаковых печей. *Металлург*. 2006. №10. С. 76 - 77 с.
8. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
9. Серода Б.П. Термічна обробка металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 270 с.
10. Серода Б.П. Теорія будови рідкого, кристалічного та аморфного стану речовини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 238 с.

11. Серода Б.П. Металознавство і термічна обробка чорних і кольорових металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 302 с.
12. Пшеницын А.В. Система управления печами отжига. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. №10. С. 38 - 42.
13. Несторенко А.М. Исследование структуры, текстуры и механических свойств листовых сталей после рекристаллизационного отжига. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. №2. С. 50 - 53.
14. Глинер Р.Е. Сравнительная оценка свойств тонколистовых упрочняемых сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. №7. С. 26 - 29.
15. Штехно О.Н., Яценко В.А., Фогель Б.М., Добровольский С.Э., Братусь С.А. Модернизация технологического оборудования термическом отделении ЦХП-1 комбината «Запорожсталь». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. №4. С. 46 - 49.
16. Кузьминов И.И., Винокуров О.В., Сабельников Ю.А., Зубков С.В., Довженко А.В., Лужин Ю.А., Корнилин С.В. Снижение отсортировки жести по дефекту «рваная кромка» при колпаковом отжиге. *Металлург*. 2005. №8. С. 63-64.
17. Богущ М.В., Кузьминов И.И. Система управления процессом отжига в колпаковых печах на основе микроконтроллеров. *Металлург*. 2006. №3. С. 58-60.
18. Науменко В.Д., Мишин М.П., Паршиков С.Ф. Совершенствование режимов отжига ленты из углеродистых и легированных сталей. *Сталь*. 2002. №1. С. 68 - 70 с.
19. Іващенко О. В. Методичні вказівки до виконання організаційно-економічної частини дипломного проекту. Запоріжжя : Вид. ЗДІА, 2004. 31 с.
20. Бойчик И. М. Экономика предприятия : учебное издание. Киев : Атика. 2002. 480 с.

21. Покропивного С. Ф. Экономика предприятий : учебник. За об. ред. С.Ф. Покропивного. изд.2-е, переред. и доп. Киев : КНЕУ, 2001. 528 с.
22. Жидецкий В. Ц., Джигирей В. С., Мельников А. В. Основы охраны труда. учебник. изд. 2-е, дополненное. Львов : Афиша, 2000. 350 с.
23. Ткачук К. Н., Иванчук Д. Ф., Сабарно Р. В., Степанов А. Г. Справочник по охране труда на промышленном предприятии. Киев : Техника, 1991. 285 с.
24. Панасейко С. П. Гигиена труда и производственная санитария : учебное пособие для студентов ЗГИА. Запорожье : ЗГИА, 2003. 232 с.
25. Панасейко С. П. Методические указания для курсового и дипломного проектирования по дисциплине «Охрана труда» (раздел «Вентиляция и кондиционирование»). Запорожье : ЗГИА, 2002. 45 с.
26. Пеклов А. А., Степанова Т. А. Кондиционирование воздуха. Киев : Высшая шк., 1978. 328 с.
27. Рижков В. Г. Електробезпека. Методичні вказівки до дипломного та курсового проектування, контрольних робіт і практичних занять для студентів ЗДІА спеціальності „Металургія чорних металів” спеціалізації „Охорона праці та екологія металургійного виробництва” денної та заочної форм навчання / Укл.: В. Г. Рижков. Запоріжжя, 2004. 60 с.