

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут

(повне найменування вищого навчального закладу)

Обробка металів тиском

(повна назва кафедри )

## Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий магістерський

(другий (магістерський) рівень)

на тему Розробка алгоритмів розрахунку і аналіз режимів деформації на безперервних станах гарячої прокатки

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1369 - мд

Марченко Данііл Ігорович

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

Обробка металів тиском

(шифр і назва)

Керівник Кругляк Д.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2020 року

**Запорізький національний університет**

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Металургії

Кафедра Обробки металів тиском

Рівень вищої освіти другий магістерський

(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 136 Металургія

(шифр і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Обробка металів тиском

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Явтушенко О.В.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Марченко Данііл Ігорович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема магістерської роботи Розробка алгоритмів розрахунку і аналіз режимів деформації на безперервних станах гарячої прокатки

керівник магістерської роботи Кругляк Дмитро Олегович, к.т.н., доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 25 ” 05 2020 року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом магістерської роботи 01. 12.2020

3. Вихідні дані магістерської роботи Технології гарячої прокатки сталі в умовах ПАТ «Запоріжсталь», літературні джерела, довідкова та наукова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Визначення технології і режимів обтиснення, фактори, що впливають на режими обтиснення, розрахунок режимів обтиснень, структура досліджуваних металів, охорона праці та навколишнього середовища

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Прокатна кліть кварто, схема розподілу приватних обтиснень по клітях безперервних станів гарячої прокатки, залежність міцних характеристик сталей від ступеня деформації, розподіл подовжніх зусиль в штабі при прокатуванні на безперервному стані 1680, розподіл температури по довжині бочок нижнього і верхнього робочих валків четвертої кліті, режими обтиснень.

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
1	Кругляк Д.О., доц., к.т.н.	
2	Кругляк Д.О., доц., к.т.н.	
3	Кругляк Д.О., доц., к.т.н.	
4	Кругляк Д.О., доц., к.т.н.	
5	Кругляк Д.О., доц., к.т.н.	

7. Дата видачі завдання 01.09.2020

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Визначення технології і режимів обтиснення	04.10.20	
2	Фактори, що впливають на режими обтиснення	15.10.20	
3	Математичне планування дослідження	21.10.20	
4	Структура досліджуваних металів	18.11.20	
5	Охорона праці та навколишнього середовища	25.11.20	
6	Економічні аспекти проблеми	30.01.20	

Студент \_\_\_\_\_ Марченко Д.І.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ Кругляк Д.О.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Нормоконтролер роботи \_\_\_\_\_ Явтушенко О.В.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної магістерської роботи: 114 с., 10 рис., 11 табл., 33 літературних джерел.

Мета роботи – аналіз режимів деформації, що забезпечує підвищення ефективності виробництва і поліпшення якості гарячекатаних штаб.

Проведено аналіз недоліків діючої технології. Визначено, що в діючому технологічному процесі вичерпані можливості підвищення ефективності процесу гарячої прокатки штаб.

Розглянені способи вирішення актуального завдання для ШСГП з традиційною технологією прокатування – усунення стовщення задньої кінцевої ділянки штаби. Показано основну причину утворення потовщення. Наведені можливі способи впливу на зазначену локальну ділянку.

Проведено аналіз умов роботи «Coilbox» на широкоштабовому стані 1680 та розглянуто пропозиції, які можуть поліпшити поздовжній профіль штаб.

Результати роботи можуть бути використані при гарячій прокатці штаб на стані «1680». Застосування ефективних технологічних режимів дозволить збільшити виробіток стану.

ГАРЯЧА ПРОКАТКА, ШТАБА, ШСГП, ОБТИСК, ПОТОВЩЕННЯ, КІНЦЕВА ДІЛЯНКА, COILBOX, ПЕРЕМОТУВАННЯ, ОСЕРЕДОК ДЕФОРМАЦІЇ, ТЕМПЕРАТУРА ШТАБИ.

## ABSTRACT

The explanatory note to final qualifying master work 114 s. 10 fig. 11 table. 33 literature.

Purpose - optimization of the headquarters properties by determining the optimal parameters of the rolling temperatures and technical characteristics of the winding.

The analysis of the shortcomings of current technologies. Determined that in the current technological process exhausted the possibility of increasing the efficiency of hot rolling headquarters.

Considered ways to solve the still urgent task for FHPBB with traditional technology of rolling are removals of bulge of back end-capping part of stripe. Principal reason of formation of bulge is shown. Possible methods over of affecting on the indicated local part are presented.

The analysis of conditions of work for «Coilbox» on a broadband figure 1680 is presented and suggestions which can improve the longitudinal shape of stripes are considered.

The results can be used in hot rolling headquarters to a state of «1680». The use of effective technological modes will reduce electricity needs and increase output state.

HOT ROLLING, STRIP, FHPBB, COBBING, BULGE, END PLOT, COILBOX, BACK-WINDING, DEFORMATION CORE, TEMPERATURE STAFF.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	4
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНО ПОШУКОВА ЧАСТИНА.....	9
1.1 Аналіз технологічного процесу прокатки на ШСГП .....	9
1.2 Аналіз впливу температур при прокатуванні на перетворення у сталі ..	14
1.3 Визначення оптимальних умов температурно-швидкісних параметрів	18
1.4 Аналіз впливу зменшення товщини кінцевої ділянки на властивості штаб .....	21
Висновки.....	31
2 ДОСЛІДНИЦЬКО – РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	33
2.1 Аналіз режиму обтиснення сталей .....	33
2.2 Алгоритм розрахунку швидкості прокатування.....	40
2.3 Алгоритм розрахунку температури.....	41
2.4 Способи зниження охолодження підкату на проміжному рольгангу стану гарячої прокатки, їх теплова і енергетична ефективність .....	43
Висновки.....	61
3 ПАРАМЕТРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОКАТУВАННЯ СТАЛІ .....	63
3.1 Розрахунок кінематичних і енергосилових параметрів прокатування до оптимізації одержання штаби з розмірами 2,7×1050 Ст. 70Г на стані ШСГП 1680 .....	63
3.2 Розрахунок кінематичних і енергосилових параметрів прокатування після оптимізації одержання штаби з розмірами 2.7×1050 Ст. 70Г на стані ШСГП 1680.....	88
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	98
4.1 Характеристика потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища .....	98
4.2 Заходи з поліпшення умов праці .....	101
4.3 Електробезпека .....	103
4.4 Пожежна та техногенна безпека .....	104
5 ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ.....	108
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	110
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА .....	112

## ВСТУП

Ефективність використання металопродукції в різних галузях народного господарства визначається якісними характеристиками, головним чином, рівнем властивостей, з якими готовий прокат випускається металургійними підприємствами. До якісних показників прокату відноситься також і точність готового прокату. Вона визначається величиною відхилення розмірів від номінальних значень, встановлених нормативно-технічною документацією на той чи інший вид металопродукції. Точність прокатки на безперервних станах залежить від різних параметрів: коливання величини натягу штаби між клітьми, зміни температури по довжині розкату, швидкісного режиму, зносу валків, жорсткості клітей, системи калибровок, інше.

Однією з основних особливостей процесу прокатки є зниження температури від передньої до задньої частини заготовки внаслідок різного часу охолодження по її довжині при її подачі в першу кліть стану. У міру проходження заготовки через валки першої кліті задній кінець її остигає, що викликає нерівномірність розподілу температури по довжині заготовки і призводить до зміни міжклітьових зусиль і розмірів розкату по його довжині. Спільний вплив зміни міжклітьових зусиль і температури прокатки по довжині розкату знижує точність розмірів по довжині готового профілю.

Різна температура кінця прокатки призводить до зміни властивостей і структури по довжині готового прокату при постійних параметрах охолодження після прокатного стану. Крім того, зниження температури металу від передньої до задньої частини заготовки вимагає підвищення температури нагріву заготовок для запобігання перевантаження ліній головних приводів стану.

Нерівномірність температури по довжині заготовки залежить від температури нагріву металу в печі і часу прокатки заготовки в першій кліті,

який визначається сумарною витяжкою, швидкістю прокатки і довжиною заготовки.

Відомі різні підходи до виробництва прокату на типовому безперервному стані, в яких зроблена спроба компенсувати нерівномірність розподілу температури по довжині заготовки.

Відповідно до одного з них останню третину заготовки (її хвостову частину) нагрівають перед прокаткою до більш високої температури, ніж передню.

До недоліків цього підходу відносяться:

- відсутність регламенту створюваної температурної нерівномірності в залежності від деформаційно-швидкісних параметрів прокатки і температурних умов нагріву заготовок;

- підвищене нагрівання тільки останньої третини заготовки не компенсує температурну нерівномірність, що виникає по довжині всієї заготовки;

- затруднення роботи системи автоматичного регулювання швидкісного режиму прокатки по клітках стану, що забезпечує стабільність міжклітьових зусиль.

Інший підхід передбачає корекцію режиму обтиснень металу при прокатці. Його реалізація вимагає спеціальних систем автоматичного регулювання режиму обтиснень на стані, що ускладнює його застосування. Згідно з третім підходом швидкість видачі заготовок з печі встановлюють рівній швидкості її подачі в першу кліть. Реалізація цього підходу через збільшеного часу знаходження заготовки перед станом збільшує загальні втрати тепла, що в свою чергу сприяє збільшенню витрати енергії при нагріванні заготовок в печі або під час прокатки їх на стані.



# 1 АНАЛІТИЧНО ПОШУКОВА ЧАСТИНА

## 1.1 Аналіз технологічного процесу прокатки на ШСГП

На широкосмугових станах прокатують штаби товщиною від 0,8 до 16 мм зі слябів масою 5 - 50 т. Матеріал штаб - маловуглецева, низьколегована і легована марки сталі. Для прокатки продукції в гарячому стані використовують реверсивні (універсальні стани, стани Стеккеля), напівбезперервні і безперервні стани різного типу. До сучасних відносять безперервні стани, хоча за певних умов можуть застосовувати і напівбезперервні стани з однією, двома реверсивними клітями в чорновій групі. Незважаючи на відмінність конструкцій станів, загальними для них є такі основні технологічні операції [1,4]:

- нагрів або підігрів слябів в методичних печах;
- прокатка на стані з інтенсивним деформуванням металу;
- охолодження прокатої штаби в душуючих пристроях для поліпшення механічних властивостей і зниження окалиноутворення;
- змотка штаб в рулон;
- охолодження рулонів;
- дресирування і оброблення (поперечне і поздовжнє);
- упаковка листів і відвантаження споживачеві.

Останнім часом впроваджуються у виробництво технології суміщеного процесу лиття - прокатка, прокатка штаб з тонких слябів, прокатка штаб безпосередньо з рідкого металу.

Частина продукції широкосмугових станів використовується в цехах холодної прокатки для одержання штаб товщиною 0,4 - 2 мм, в цехах для виробництва гнутих профілів і тонкостінних зварних профілів. Інша частина гарячекатаного штабового металу (товарний продукт) направляється

безпосередньо на машинобудівні заводи, в будівництво, в інші галузі народного господарства.

Гарячою прокаткою отримують товсті і тонкі листи. Мінімальна товщина тонких гарячекатаних листів – 1,5 мм. Вихідною заготовкою для гарячої прокатки листів на сучасних металургійних заводах є сляби. Литі злитки застосовують тільки при виробництві листів товщиною  $> 60$  мм. Якість листів значною мірою визначається ступенем обтиснення.

Для нагрівання слябів застосовують методичні чотирьох-, п'ятизонні печі з торцевим завантаженням і видачею. Температура нагрівання слябів залежить від хімічного складу сталі і становить  $1150 - 1280$  °С. На сучасних заводах застосовують гарячий всад слябів - 85 %, що значно скорочує час, витрату палива при нагріванні і площу складу слябів.

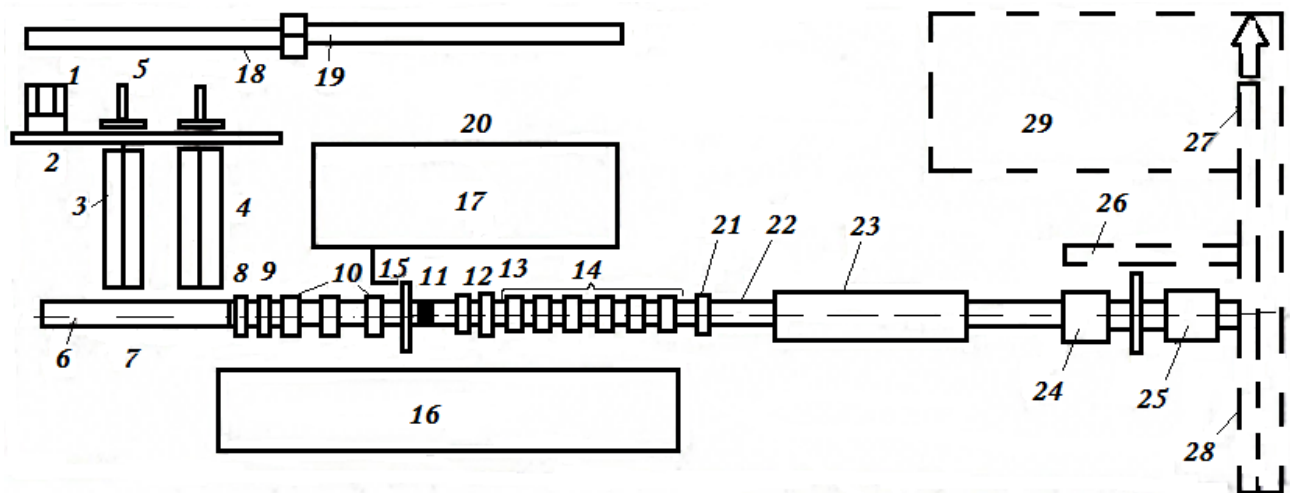
Гарячу прокатку листів здійснюють на станах лінійного типу, призначених головним чином для прокатки товстих листів, а також на безперервних і напівбезперервних станах - для прокатки товстих і тонких листів.

Лист сталевий гарячекатаний являє собою тонкий лист із обрізною або необрізною кромкою, поставляється в рулонах або у вигляді листів. Метод гарячої прокатки застосовують для виробництва гарячекатаного металевого листу. Виготовляються гарячекатані листи зі звичайної вуглецевої і низьколегованої сталі. Має широке застосування в промисловому і цивільному будівництві, а також у багатьох інших галузях.

Неперервний широкосмуговий стан 1680 (рис. 1.1) призначений для прокатки слябів на штаби і подальшої змотки в рулони, або розрізанні на листи.

Вихідна заготовка - сляб, подається до прокатних клітей стану двома способами:

– безпосередньо сляби від стану слябінг 1150 з наявною температурою по нижньому грубному рольгангу подають до клітей стану (транзитна прокатка);



1 – завантажувальний стіл для слябів; 2 – завантажувальний рольганг; 3, 4 – нагрівальні печі; 5 – штовхач слябів; 6 – транзитний рольганг від слябінга; 7 – теплові екрани 8 – двухвалковий окалиноломатель; 9 – перша чорнова кліть кварто; 10 – чорнові кліті з вертикальними валками; 11 – ППП; 12 – летючі ножиці; 13 – чистовий окалиноломатель; 14 – шість клітей кварто (№№ 5-10) чистової групи; 15 – індукційна установка для підігріву робочих валків перед встановленням в кліть; 16 – машинний зал; 17 – валковошліфувальна майстерня; 18 – рельси від слябінга; 19 – теліжка; 20 – ділянка станків для зачистки поверхні слябів із якісних марок сталі; 21 – вимірювач розмірів штаб; 22 – відповідний рольганг; 23 – душируюча установка; 24, 25 – моталки; 26 – конвеєр прибирання рулонів; 28 – конвеєр рулонів в ЦХП; 29 – ділянка розділки рулонів.

Рисунок 1.1 – Схема розташування устаткування ШСГП 1680

– сляби перед прокаткою попередньо нагріваються в методичних печах до потрібної температури металу для наступної прокатки. [1]

Нагрівання металу в печах залежить від способу посадки металу в піч:

– гарячий всад - сляби від стана слябінг 1150 по шлепперному транспортеру подають на верхній грубний рольганг із температурою металу

рівній температурі металу кінця прокатки на стані слябінг 1150, після чого сляби задають у піч за допомогою штовхачів;

– холодний всад - сляби з адьюстажу обтискного цеху подають краном на прийомний рольганг верхнього грубого рольганга для транспортування слябів до печей.

Сляби задають у піч із температурою навколишньої температури цеху. Після нагрівання в печах сляби видають на нижній грубний рольганг для транспортування слябів до клітей стана.

Прокатка слябів здійснюється у двох групах клітей:

– чорновій напівбезперервній групі клітей;

чорнова група складається з: однієї двовалкової кліті (чорнового окалиноламача), чотирьох чотирьохвалкових клітей (№ 1-4), трьох вертикальних клітей (№ 1 - 3);

– чистовій безперервній групі клітей;

чистова група складається з однієї двовалкової кліті (чистового окалиноломача), шести чотирьохвалкових клітей (№ 5 - 10).

На стані встановлені п'ять методичних чотирьохзонних печей із глисажними трубами, з торцевою посадкою і видачею слябів. Печі опалюються сумішшю доменного, коксового й природного газів, калорійністю 1070 - 1350 ккал/м<sup>3</sup>. [1,6]

Однак у зв'язку з переходом на транзитну (пряму) прокатку слябів використовуються періодично 1-2 печі для прокатки зворотних або легованих (нержавіючих) слябів. Довжина печей 31,5 м, ширина 5,22 м. Холодні сляби надходять зі складу на стіл 1 і по рольгангу 2 до печей. Посадка слябів у печі 3, 4 виконується штовхачами 5. Одночасно з печей видаються нагріті сляби на нижній грубний рольганг 6. На поверхні сляба завжди є товстий (4-6 мм) шар грубої окалини, виламування якої виробляється у двовалковому окалиноломачу 8 при обтисненні сляба на 20 - 25 мм. Після окалиноломача розпушена окалина видаляється з поверхні сляба гидросбивом, що подає на сляб воду з тиском 9-12 Н/мм<sup>2</sup>.

Після прокатки на стані сляби піддаються зачищенню й нагріванню в печах до необхідної температури прокатки, після чого подаються по загальному рольгангу до чорнового окалиноломача.

Неперервний тонколистовий стан гарячої прокатки 1860 призначений для прокатки штаб товщиною від 2,0 до 6,0 мм і шириною від 900 до 1520 мм. Також допускається прокатка освоєного сортаменту штаб товщиною від 6,1 до 10,2 мм, і шириною від 850 до 900 мм.

При поставці прокату за ДСТ 16523-97 на поверхні гарячекатаного прокату не повинно бути полон, порізів, пухирів, заходів, вкатої окалини, перетравів, недотравів, розшарувань.

При поставці прокату за ДСТ 14637-89 на поверхні гарячекатаного прокату не повинно бути рванин, наскрізних розривів, розкатаних пригару й скоринок, а також пухирів-здуттів, гармошки, тріщин, полон, забруднень і вкатої окалини.

Вихідним металом для виробництва гарячекатаних штаб і листів з нержавіючої сталі служать передільні сляби, по розмірах, формі і якості поверхні, що задовольняють вимогам внутрішньозаводських технічних умов. Розміри слябів, призначених для переділу в тонколистовому цеху залежать від марки сталі й варіанта замовлення.

Фактичне граничне відхилення по ширині штаб не повинне перевищувати +20 мм при ширині штаб до 1000 мм (включно) і +30 мм при ширині штаб понад 1000 мм.

Для гарячекатаних штаб, призначених для подальшої переробці на холоднокатаний лист, допустиме відхилення не повинне перевищувати +20 мм.

Відхилення від площинності штаб товщиною від 2,0 до 3,9 мм не повинне перевищувати 15 мм, а для штаб товщиною від 4,0 до 9,0 мм - 12 мм на довжині 1м сталі, що поставляється в штабах.

Телескопічність рулонів не повинна перевищувати 100 мм для штаб товщиною 2,0 - 2,5 мм і 70 мм для штаб товщиною 2,6-9,0 мм.

Поперечна різнотовщинність штаб, призначених для переробки на холоднокатаний лист, не повинна перевищувати 0,10 мм.

Сляби в нагрівальній печі тонколистового стана можуть подаватися в такий спосіб:

А) безпосередньо після прокатки на обтискному стані по похилому транспортері або через складальні столи і прийомні столи грубого рольганга;

Б) зі складу електромостовим краном через прийомні столи грубого рольганга.

Сляби, що мають поверхневі дефекти або відхилення по розмірах понад допуску по стандартах або технічних умовах, направляються на склад слябів для огляду і зачищення.

Посадка слябів у методичні печі виробляється комплектно і поплавочно. Перед посадкою слябів з їхньої поверхні ретельно видаляються пил і стружка шляхом змиву водою.

## **1.2 Аналіз впливу температур при прокатуванні на перетворення у сталі**

Нагрівання металу перед прокаткою здійснюється з метою підвищення його пластичності і зменшення його опору деформації. Нагрівання є однією з важливих і основних операцій в процесі прокатки. Вона повинна забезпечити рівномірний розподіл температури по перетину металу, що прокатується, його мінімальне окислення і зневуглицювання. Характер передачі тепла визначає спосіб нагріву металу. Розрізняють два способи: прямий і непрямий. Якщо тепло акумулюється безпосередньо в самому металі, а температура навколишнього середовища залишається нижче температури металу, то такий спосіб називається прямим. Якщо тепло металу передається за рахунок зіткнення його поверхні з будь-яким середовищем (газоподібної, рідкої,

твердої), нагрітим до більш високої температури, то такий спосіб нагріву називається непрямим. Передача тепла металу при непрямому нагріванні відбувається за рахунок конвекції і випромінювання. Кількість тепла, що передається випромінюванням в нагрівальних печах, досягає 80% всього тепла. Підвищення температури металу при його нагріванні, як правило, сприятливо впливає на процес прокатки. Однак при нагріванні вище певної для даної сталі температури відбувається зростання зерна, яке веде до ослаблення зв'язку між ними і тим самим до погіршення механічних властивостей сталі. Що призводить до утворення на металі тріщин. Таке явище називається перегрівом. Іноді властивості перегрітої сталі можна поліпшити, піддавши її термічній обробці. Сильний перегрів виправити не можна. При температурах нагріву, близьких до точки плавлення сталі, всередину її проникає кисень, який окисляє зерна. В результаті зв'язок між зернами сталі настільки послаблюється, що метал при прокатці руйнується. Це явище називається перепал. Воно відбувається тим легше, чим вище температура нагріву і чим більше окислювальна атмосфера в печі. Явища перегріву і перепалу найчастіше можливі при вимушеній затримці металу в печі. Щоб уникнути перегріву і перепалу необхідно знижувати температуру печі і зменшувати кількість повітря, що подається. При призначенні режимів нагріву металу зазвичай походять від наступних параметрів: температури і швидкості нагріву, часу витримки при постійній температурі (томління). При прокатці метал нагрівають до можливо високих температур, так як в цьому випадку знижуються витрата енергії, зусилля деформації, знос інструменту. При призначенні температури нагріву, як правило, верхня межа температури нагріву обмежується явищами перегріву і перепалу і встановлюється на 100-150 °С нижче точки плавлення, а нижня межа - температурою рекристалізації, тобто мінімально допустимої температурою кінця прокатки. У деяких сталей і сплавів температурний інтервал прокатки досить вузький, обмежений різними змінами в структурі металу [7].

При прокатці металу, що має температуру вище температури рекристалізації, послаблюються причини, що викликають зміцнення - спотворення кристалічної решітки, залишкові напруги. Опір металу деформації в процесі прокатки залишається на вихідному рівні, не знижується пластичність. Чим вище температура нагріву металу під прокатку, тим менше деформує зусилля і вище пластичність. Проте надмірно підвищувати температуру нагрівання не рекомендується. Температура нагріву заготовок зі сталі різного хімічного складу різна. Для вуглецевих сталей максимальна температура нагріву повинна бути на 100-150 ° С нижче лінії солідусу діаграми Fe - С. Чим вище вміст вуглецю, тим нижче температура нагріву сталі. Температура нагріву сталі з вмістом вуглецю < 0,45% дорівнює 1200 °С; інструментальна сталь з вмістом вуглецю до 1,0% нагрівається під прокатку до 1130 °С. Найбільша температура нагріву під прокатку 1350 °С допускається для низьковуглецевої сталі (<0,1% С). Температура нагріву у виробничих умовах уточнюється в залежності від типу прокатного стану, потужності головного приводу, відстані від печі до першої кліті. Наприклад, температуру нагрівання заготовки з рядової сталі (0,45% С) перед прокаткою на сортових станах приймають рівною 1200 ° С, а перед прокаткою на листових станах - 830- 1250 °С. Залежно від ступеня легування, вмісту вуглецю і перетину заготовки температура нагріву металу перед прокаткою знаходиться в межах 1060-1350 ° С. Сталь марок X12, X12M, так само як і швидкоріжуча, відноситься до ледебуритного класу. Ледебуритного евтектика цієї сталі плавиться при низьких температурах (близько 1200 °С), а у швидкорізальної сталі при температурі понад 1300 °С. При прокатці ледебуритної евтектики руйнується; при цьому ледебуритні карбіди поводяться як сторонні включення, утворюючи стрічичну структуру. З цієї причини температура нагріву не повинна перевищувати 1140 - 1160 °С; температура кінця прокатки повинна бути не нижче 850 °С [8].



Злитки інструментальної високохромистої сталі піддають куванні, хоча можлива і їх прокатка. Заготівлю для сортового прокату деформують за таким же режимом, як і швидкорізальну сталь.

Інструментальні високохромисті сталі схильні до утворення гартівних тріщин, тому їх слід піддавати повільному охолодженню після прокатки.

Таблиця 1.4 – Температура нагріву марок сталі

Сталь	Марка	Температура, °С
Вуглеродна, низьколегована	40, 15Г -40Г, 30Г2, 15Х - 40Х, 15ХФ, 15ХМ - 35ХМ, 20ХГСА	1200 - 1220
Углеродистая, низько - и середньо легована	60, 50Г, 50Х, 50ХГ, 55СГ, 40ХС, ШХ10, 60СА, 30ХНЗ, 35ХГСА	1180 - 1200
Углеродистая.	У7, 58, У8ГА	1140-1160
Углеродистая, легована, інструментальна,	У12, У13, Х12, ХБ5, 30ХГСА, 40ХГ, 14ХГС, 70Г, 65СГ	1100 - 1120
Ніхром, нержавіюча	Х15Н60, 10Х18Н9Т, 20Х18Н9Т	1200 - 1220
Бистроріжуча	Р9, Р18	1180- 1200

Сталь ХВГ застосовують для виготовлення вимірювальних калібрів та інших точних інструментів, так як вона має властивість мало змінювати свої розміри після термічної обробки. З неї виготовляють також довгі інструменти. Ця сталь чутлива до напруг, що виникають при нагріванні, яка тому повинна проводитися досить повільно. В рівній мірі це відноситься і до швидкості охолодження, яка, щоб уникнути утворення тріщин повинна бути уповільненою.

Через великий вміст вуглецю температура нагріву цієї сталі повинна бути досить низькою: сталь схильна до утворення карбідної ліквациї і карбідної (цементитної) сітки. Щоб запобігти утворенню цементитної сітки, температуру кінця прокатки слід підтримувати можливо нижче з обов'язковим швидким охолодженням до  $650^{\circ}\text{C}$ .

### **1.3 Визначення оптимальних умов температурно-швидкісних параметрів**

Температурні умови прокатки тісно пов'язані з деформаційними і швидкісними параметрами, що, в свою чергу, визначає вибір технологічних схем виробництва прокату на стані і калібрування валків його робочих клітей. Крім того, характер зміни температури металу по довжині безперервного стану багато в чому визначає рівень енерговитрат на прокатку. На початку деформаційної обробки в чорновій групі робочих клітей стану відбувається значне зниження температури металу, що прокатується. Це призводить до зростання енергосилових параметрів процесу. Потім, в процесі формування структури готового прокату (чистова група робочих клітей стана), температура металу, що прокатується підвищується за рахунок деформаційного розігріву. Слід зазначити, що при виробництві готової продукції на станах переважають витрати, пов'язані з нагріванням заготовок. У зв'язку з цим зниження енерговитрат на виробництво прокату досягається шляхом зниження температури нагріву вихідних заготовок і зменшення теплових втрат штаби в процесі його транспортування в потоці стану. В даний час відомі два напрямки вирішення температурної задачі прокатки. Одне з них базується на теоретичних залежностях процесу теплопередачі, а інше - на статистичному аналізі результатів експериментальних досліджень температури металу, що прокатується. Теоретичний аналіз передбачає складання рівнянь сумарного теплового балансу. Воно включає втрати тепла

гуркотом внаслідок його зіткнення з робочими валками, втрати тепла випромінюванням і конвективні втрати, втрати тепла через попадання на гуркіт води, необхідної для охолодження робочих елементів кліті, і приплив тепла внаслідок перетворення роботи деформації металу в теплову енергію, а також від подолання сил контактного тертя. Розрахунок сумарного теплового балансу утруднений, так як відсутні суворі математичні залежності, що описують стадії процесу теплопередачі і їх взаємну обумовленість, а також досить точні дані про теплофізичних контактах, що характеризують досліджуваний процес. Другий напрямок передбачає опис процесів теплопередачі статистичними залежностями. Статистичну модель температурних умов прокатки будують на основі даних експериментального вивчення зміни температури розкату на різних ділянках стану. При цьому загальна структура моделі повинна відображати фізичну природу явища і містити, як аргумент, основні параметри технологічного процесу, легко піддаються контролю і регулювання. Температура деформованого матеріалу залежить від температури нагріву, охолодження на повітрі, контакту з валками або охолоджувальними засобами, випромінювання і від тепла, що виділяється в процесі деформації. Кількість тепла, переданого під час гарячої обробки тиском, залежить від теплопередачі між інструментом і гуркотом, а також від розділяє їх шару окалини. В особливих випадках вирішальний вплив на теплопередачу можуть також надати шари мастила або охолоджуючої рідини [10].

#### *Температурний режим прокатки.*

Відомі два напрямки вирішення температурної задачі при прокатці металу. Одне з них базується на теоретичних залежностях процесу теплопередачі (тепловіддачі), а інше - на статистичному аналізі результатів експериментальних досліджень зміни температури прокочуються штаб в технологічній лінії стану гарячої прокатки. Складність використання математичних моделей, складених на базі

диференціальних рівнянь теплового балансу прокочується штаби (втрати тепла випромінюванням, конвекцією, теплопередачею валанням і привалковою арматурі, охолодженням водою і підвищення температури за рахунок виділення енергії пластичної деформації), безвідносно до конкретного прокатного стану.

Модель, створена тільки в результаті теоретичного аналізу, хоча і є універсальним засобом прогнозування температури прокочуються штаб, завжди вимагає експериментального підтвердження.

І не випадково, практично всі існуючі моделі температурних умов прокатки металу містять коригувальні коефіцієнти, величина яких не завжди чітко аргументована.

У зв'язку з цим, представляє науково-практичний інтерес опис процесів теплопередачі статистичними залежностями. Статистичну модель температурних умов процесу прокатки будують на основі даних експериментального (як правило, у виробничих умовах) зміни температури штаб на різних технологічних ділянках прокатного стану. При цьому, загальна структура моделі повинна витікати з фізичної природи досліджуваного явища і містити, як аргумент, основні параметри технологічного процесу, легко контрольовані (вимірювані) і регульовані в необхідних межах.

В даний час немає підстав говорити про абсолютну перевагу того чи іншого способу побудови математичної моделі реального фізичного процесу.

Розрахунок температурних режимів прокатки на експлуатованих станах, а тим більше алгоритми управління і контролю температурного режиму, доцільно виконувати з використанням експериментально - статистичних моделей або математичних залежностей, апроксимуючих теоретичних моделей.

На сучасних високошвидкісних безперервних сортопрокатних станах, на відміну від листопрокатних різної спеціалізації, не завжди вдається забезпечити необхідний рівень температури закінчення прокатки металу (для

низьковуглецевої сталі - не нижче 860 С) і тому в їх технологічних лініях встановлені пристрої для прискореного водяного або паровоздушного охолодження металу, що прокочується ( а на великосортних станах використовуються регламентовані за часом зупинки гуркотів (як правило, на передавальних шлеперах) або зменшення швидкості проміжних транспортних пристроїв. Високий рівень температури закінчення прокатки металу на безперервних сортопрокатних станах забезпечив реалізацію енергозберігаючої технології за рахунок впровадження термомеханічного зміцнення прокатоного металу в потоці стану (прискорене охолодження гарячого прокату), отримання високих фізико-механічних властивостей прокату, що виключає необхідність проведення його внепоточної термічної обробки [11].

#### **1.4 Аналіз впливу зменшення товщини кінцевої ділянки на властивості штаб**

Тривалий час безперервні (напівбезперервні) широкосмугові стани гарячої прокатки (ШСГП) не мали конкуренції у виробництві тонких штаб, хоча їх технологічні процеси мали серйозні недоліки: [11,12]

- велика витрата металу при прокатці на обтискних станах (слябінгах) внаслідок використання зливків з усадочною раковиною і прибутковою надставкою;

- додаткова витрата палива на нагрів (підігрів) слябів в печах і втрати тепла при транспортуванні слябів (проміжного розкату) по транзитному і проміжному рольгангу і при цьому великі втрати металу в окалину;

- великі втрати температури по довжині штаби в процесі прокатки, внаслідок цього, виникаючі складності отримання тонких штаб (менш 2,0 мм) і суттєва поздовжня різнотовщинність та ін.

Значною мірою зазначені недоліки технологічного процесу ШСГП першого покоління вдалося ліквідувати шляхом застосування товстослябових

машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), суміщених з ШСГП, застосування безперервної прокатки в чорновій групі клітей, застосування теплозберігаючих екранів на проміжних рольгангах і проміжних перемотувань пристроїв (ППП-Coilbox), прискорення валків клітей чистової групи після захоплення переднього кінця штаби моталкою, нескінченної прокатки штаб в чистовий групі ШСГП п'ятого покоління, а потім і ливарно-прокатних модулів (ЛПМ), на яких забезпечується гаряча прокатка штаб товщиною 1,5 мм і менше з тонких слябів ( $H = 50 \dots 70$  мм).

Особливістю прокатки штаб на традиційних широкосмугових станах гарячої прокатки (ШСГП) є наявність потовщення  $\delta h_i = 0,10 \dots 0,20$  мм на задній кінцевій ділянці готової штаби довжиною 30 ... 50 м. Поява потовщення обумовлена головним чином відсутністю впливу на нього заднього натягу на всіх міжклітьових ділянках чистової групи ШСГП, що викликає збільшення середніх нормальних напруг, сили прокатки, пружних деформацій кліті і міжвалкового зазору.

Очевидно, що створити будь-яким чином дискретний процес прокатки з наявністю заднього натягу кінця штаби не представляється можливим. У зв'язку з цим усунення потовщення на локальній задній ділянці штаби можливе лише шляхом застосування локального зовнішнього впливу на дану ділянку. Відомо декілька шляхів впливу на потовщену кінцеву ділянку штаби для компенсації відсутності заднього натягу, реалізація яких можлива на промислових станах:

- застосування нескінченного (напівнескінченного) процесу гарячої прокатки штаб на ШСГП;
- реалізація додаткового обтиску задньої кінцевої ділянки розкату (штаби) в процесі його прокатки;
- зменшення коефіцієнта тертя при прокатці заднього кінця штаби в останніх клітях чистової групи шляхом подачі на валки технологічного мастила;

- застосування прискорення для обертання валків всіх клітей чистової групи ШСГП, починаючи з моменту, коли перед першою кліттю даної групи залишається 3 ... 5 м довжини проміжного розкату;

- збільшення температури задньої локальної ділянки проміжного розкату.

Крім того, можуть бути використані і наведені нижче технічні рішення:

- відключення води гідрозбиву окалини в чистовому окалиноломачі при проходженні заднього кінця штаби довжиною 3...4 м;

- прокатка заднього кінця штаби при короткочасному зменшенні кількості води, що подається на валки чистової групи клітей;

- зменшення сили противоизгиба (додаткового вигину) робочих валків в клітях чистової групи при прокатці заднього кінця штаби;

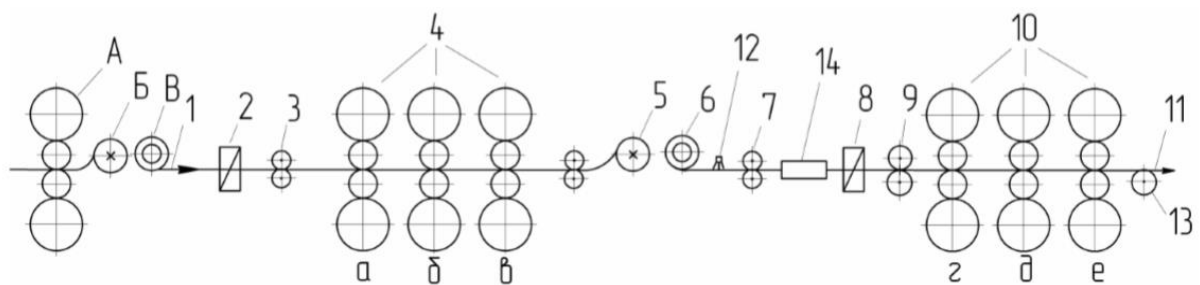
- використання неузгодженості швидкостей робочих валків перших 2...3 клітей чистової групи шляхом зменшення швидкості попередніх клітей з метою збільшення напруг міжклітинного натягу.

Проте кожен з чотирьох перерахованих методів має незначний вплив на зміну товщини штаби і необхідно їх комплексне використання.

Зниження потовщень кінцевих ділянок і поздовжньої різнотовщинності по довжині штаби може бути здійснено шляхом використання нового технічного рішення – поділу чистової групи з 6-7 клітей на дві самостійні підгрупи клітей (по 2-4 кліті в кожній підгрупі) з проміжним перемоточним пристроєм (ППП-Coilbox) (рис. 1.2) [Комбінований смуговий стан (КСС)].

Як впливає з рис. 1.2, чистова група ШСГП розділена на дві підгрупи по 3 кліті. Після першої підгрупи 4 встановлено ППП-5 і додатково ножиці 8 і окалиноломач 9, а потім самостійно працює друга підгрупа клітей 10. Проміжний розкат після чорнової групи клітей (А) змотують в ППП (Б; В) і подають (після ножиць 2 і окалиноломача 3) в першу підгрупу 4 чистової групи клітей (кліті «а-в»). Вихідна з кліті «в» штаба змотується в ППП-5 зі швидкістю  $V_{п} = 5 \dots 12 \text{ м / с}$ , а після закінчення змотування штаба з ролону 6 надходить в другу підгрупу клітей 10 (кліті «г-е»), в якій штабу прокатують

зі швидкістю 10 ... 25 м / с. Деформаційно-швидкісний режим прокатки штаби розраховують таким чином, щоб час прокатки в другій підгрупі клітей 10 був дещо менше, ніж у першій підгрупі клітей 4, а силові параметри забезпечували необхідну точність поперечного профілю штаб. Регулювання температурного режиму виконується за допомогою подачі води на рулон і штабу з колекторів 12 або підігріву в прохідній індукційній печі 14. Штаби товщиною  $h > 2$  мм транспортуються до моталки по отводящему рольгангу з душуруючим пристроєм. Штаби товщиною  $h < 2$  мм змотуються моталками 13, розташованими безпосередньо за кліттю 10 «е», а потім рулони передають на паралельний відвідний рольганг з розмотувачем, душуруючим пристроєм, двома моталками і необхідним обладнанням (на рис. Не показано).



1 - проміжний розкат; 2, 8 - ножиці; 3, 9 - чистові окалиноломачі; 4 - перша підгрупа клітей чистової групи; 5 - ППП; 6 - рулон; 7 - тягові ролики; 10 - друга підгрупа клітей чистової групи; 11 - готова штаба; 12 - колектори охолодження; 13 - моталка для штаб  $h < 2$  мм; 14 - підігрівальна індукційна піч; а-е - кліті; А - остання кліть чорнової групи; Б - ППП; В - рулон з проміжним розкатом

Рисунок 1.2 - Фрагмент ШСГП з розділеною чистової групою клітей.

До переваг розглянутого КСС (комбінованого смугового стана) з розділеними підгрупами клітей чистової групи можна віднести наступне. [12]



1. Можливість застосування в кожній підгрупі власного деформаційношвидкісного режиму, не пов'язаного постійністю секундного обсягу металу в клітках «а-в» і «г-е». Наприклад, збільшувати або зменшувати величину сумарного обтиску і температуру штаби незалежно в кожній підгрупі, і тим самим, впливати на структуру і механічні властивості готової штаби.

2. При наявності ППП-5 виявляється можливим збільшити швидкість прокатки в першій клітці чистової групи до 3 ... 5 м/с, що забезпечить підвищення продуктивності безперервного стану.

3. При наявності ППП-5 під час і після змотування штаби в рулон 6 забезпечується проміжна рекристалізація металу, вирівнювання розмірів зерен структури, зниження величин напруги течії за рахунок знеміцнення і енергосилових параметрів; знижується рівень внутрішніх додаткових напружень.

4. Температурні умови прокатки заднього кінця штаби рулону 6 (колишнього переднього в клітках 4), а також зниження силових умов прокатки в клітках 10 («г-е»), забезпечують можливість прокатки на КСС штаб товщиною  $h < 1,5$  мм.

5. Зміна положення кінцевих ділянок після клітей 4, (задній кінець стає переднім в рулоні 6) забезпечує підвищення точності поздовжнього профілю штаби за рахунок зміни напрямку температурного клину по довжині штаби (з прямого на зворотний щодо напрямку прокатки), а також більш високою температурою заднього кінця штаби в порівнянні з переднім кінцем (колишнього заднього кінця в клітці 4, «в»). Технологія прокатки зі зміною положення кінцевих ділянок компенсує відсутність натягу кінців штаби і зменшує їх потовщення.

Також має місце бути спосіб зварювання стикованих штаб в гарячому стані на ШСГП, який в процесі прокатки здійснюють безпосередньо в осередку деформації. Ідея способу заснована на тому, що при стикуванні двох суміжних штаб перед входом у кліть і при проходженні стику всередині

осередку деформації напрямом течії металу кінцевих ділянок штаб має протилежний характер. У відповідності з законом найменшого опору течії металу заднього кінця першої штаби здійснюється по шляху найменшого опору до площини входу, а течія металу переднього кінця другої штаби – до площини виходу. При їх взаємному контакті в обмеженому об'ємі осередку деформації і виникненні необхідних горизонтальних сил відбувається процес зварювання торців штаб подібно ковальському (гарячому) зварюванню.

Можливість виконання зварювання металу тиском показана дослідженнями при холодній пластичній деформації, навіть при наявності окислених поверхонь штаб. При цьому умови схоплювання (зварювання) визначаються міцністю і твердістю оксидів по відношенню до основного металу, а також величиною пластичної деформації, яка буде достатньою для максимального зближення чистих поверхонь. Оскільки твердість оксидів вище твердості основного металу при пластичній деформації відбувається руйнування оксиду і вихід чистого металу на поверхню. Руйнування оксиду настає тим раніше, чим більше відношення твердості оксиду до твердості самого металу ( $\varphi$ ). Так, для алюмінію при  $\varphi = 4,5$  схоплювання (зварювання) відбувається при пластичній деформації з відносним обтисненням  $\varepsilon = 60\%$ , а для міді з  $\varphi = 1,3$  зварювання відповідає деформації з обтисненням  $\varepsilon = 86\%$ .

При зварюванні тиском на з'єднуємих поверхнях заготовок і в прилеглих обсягах металу, як правило, протікають наступні процеси: пластична деформація (в холодному або гарячому станах), формування і руйнування оксидних плівок, дифузія, зміцнення, рекристалізація та ін. Спочатку фізичний контакт забезпечується пластичною деформацією нерівностей на з'єднуючих поверхнях. Згладжуванню поверхонь може сприяти поверхнева дифузія і інші процеси. Швидкість хімічної взаємодії (утворення зв'язків), в основному, залежить від швидкості створення активних центрів на зближуємих поверхнях і дифузійних процесів в зоні зварювання. У випадку коли тривалість, величина пластичної деформації і температура процесу зварювання в твердому стані є достатніми для

інтенсивного розвитку дифузійних процесів, в зоні з'єднання утворюються загальні зерна або нові фази. При зварюванні однорідних елементів критерієм закінчення процесу може служити рекристалізація, котра приводить до утворення загальних зерен в зоні контакту. У разі пластичного деформування зістиківаних штаб з оплавленими торцями процес зварювання істотно прискорюється.

Характер з'єднання зразків в осередку деформації свідчить про значну пластичну деформацію металу і наявності значної горизонтальної сили, яка при якісній підготовці торцевих поверхонь (або їх оплавленні), може забезпечити надійне зварювання суміжних штаб.

В умовах експерименту, коли відносна площа ділянок зварювання штаб становить 10 ... 12%, а решта ділянок були зайняті окалиною, напруга розриву ділянки зварювання досягає 250 ... 280 Н/мм<sup>2</sup> (в холодному стані). На відстані 6 ... 13 мм від шва виявлено дрібнозерниста структура (бал > 10), а далі від шва - відманштетова структура штаб (бал 3). Дрібнозерниста структура в області ділянок зварювання свідчить про значиму горизонтальну деформацію штаб.

Застосування додаткового обтиску задньої кінцевої ділянки розкату (штаби) в процесі його прокатки використовують на різних станах. Однак для отримання в чистовій клітці ШСГП штаби без потовщення на кінцевій ділянці ( $\delta h_n = 0$ ) необхідно у всіх клітках стану застосувати фактичне сумарне додаткове обтиснення в межах ~ 2,0 мм, що при наявності тихохідних електромеханічних натискних пристроїв (ЕМНП) неможливо досягти. Тому кардинальним вирішенням даної проблеми служить установка в чистовій групі стана клітей з гідравлічними натискними пристроями (ГНП), швидкість впливу яких на штабу становить до 2,0 мм/с. Тоді інші способи впливу на штабу самі по собі можуть бути зайвими. В іншому випадку необхідно додатково обтискати задню ділянку штаби декількома способами.

Одним з параметрів, що визначають величину сили прокатки, є коефіцієнт тертя. Величина коефіцієнта тертя  $f$  в перших клітках чистової

групи ШСГП становить 0,39...0,27, а в останніх трьох клітках – 0,26...0,20, зменшуючись у міру збільшення швидкості прокатки при зниженні відносного обтиснення. Коефіцієнт тертя впливає на напружений стан у осередку деформації через поздовжні підпираючі напруги  $B_c$  і входить до формули для розрахунку середньої нормальної контактної напруги.

При зниженні коефіцієнта тертя в 1,5 рази величина зменшується в 1,12 рази і є достатньою для помітного зниження приросту товщини на задній кінцевій ділянці при наявності технологічного мастила. Таке зменшення коефіцієнта тертя під час гарячої прокатки досягається шляхом використання в якості мастила мінерального масла.

Застосування на ШСГП 1680 під час гарячої прокатки штаб товщиною 2,0 ... 3,0 мм мінеральної емульсії забезпечує зниження сили прокатки на 4,3 ... 12,2% в кожній клітці. Цього цілком достатньо для усунення збільшення товщини штаби, так як різниця сил під час прокатки заднього і переднього кінців штаби після клітей № 6-8, як правило, не перевищує 10 ... 15%.

Для реалізації даного способу впливу на ділянку заднього кінця штаби усі клітці (крім першої клітці чистової групи) необхідно оснастити спеціальними колекторами, а технологічне мастило транспортувати по спеціальних трубопроводах з цеху холодної прокатки штаб (промаслювач гарячекатаної штаби з безперервного травильного агрегату або емульсію з прокатного стану, в тому числі і відпрацьовану), але не виготовляти її спеціально в цеху гарячої прокатки. Так як технологічне мастило слід подавати тільки на задню кінцеву ділянку з боку входу штаби в валки, то витрата мінерального масла не буде великою, і саме масло буде повністю згорати при прокатці.

Застосування прискорення валків клітей чистової групи є загально визнаним способом зменшення товщини штаби. При прискоренні валків під час прокатки заднього кінця штаба нагрівається на 7 ... 10 °С, зменшуються напруга течії металу і коефіцієнт тертя, що і викликає зниження середнього нормального контактного напруження і сили прокатки.

Так при прокатці штаб 1,5×1050 мм на стані 2000 с прискоренням  $0,05 \text{ м/с}^2$  на довжині ~ 550 м товщина штаби зменшується на ~ 0,15 мм. Довжина потовщеної кінцевої ділянки штаб на ШСГП значно менше і становить всього 30 ... 40 м, і при зазначеній реальній величині прискорення і довжині ділянки зменшення його товщини може бути всього лише в межах ~0,02 мм, що є явно недостатнім. Однак і цей спосіб доцільно випробувати в умовах працюючих ШСГП перших поколінь у тих випадках, коли є резерв збільшення швидкості прокатки в процесі обтиску цієї лінії.

Підвищення температури заднього кінця розкату. При використанні в лінії між чорною і чистою групами клітей ШСГП з традиційною технологією проміжного перемотувального пристрою (ППП) задній кінець штаби формується з більш гарячого переднього кінця проміжного розкату.

Однак, як показують експерименти, і при наявності ППП на задній кінцевій ділянці відбувається істотне збільшення товщини штаби на  $\delta h_i = 0,08 \dots 0,15 \text{ мм}$  внаслідок відсутності заднього натягу штаби в клітках стану. В умовах такого технологічного процесу на ШСГП усунення потовщення заднього кінця штаби можливо шляхом локального додаткового нагріву двох-трьох внутрішніх витків проміжного розкату в рулоні, в результаті чого зменшуються сила прокатки штаби, пружні деформації кліті і товщина штаби. При внутрішньому діаметрі рулону 600 ... 650 мм довжина додатково нагрітої ділянки розкату складе ~ 4 ... 5 м. Ступінь усунення потовщення кінцевої ділянки буде визначатися температурою додаткового нагріву розглянутої локальної ділянки.[3]

Задній кінець штаби прокатують без заднього натягу. Приймаємо, що величина температури заднього кінця проміжного розкату становить  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  (базова), а температура після додаткового нагріву на кінці проміжного розкату  $1000, 1020 \text{ і } 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ . У сталому процесі прокатки передній і задній натяг складає  $B_i = B_c = 15 \text{ Н/мм}^2$ , а при прокатці заднього кінця без натягу  $B_c = 0$ . Розрахункові параметри прокатки для базового усталеного процесу (з фіксованою товщиною штаби на задньому кінці розкату при  $\delta h_i = 0$ ) , а також

параметри прокатки заднього кінця штаби в кліті № 10 при початковій температурі 1000, 1020 і 1050 °С заднього кінця проміжного розкату, представлені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 - Параметри прокатки штаби 2,5 × 1250 мм з проміжного підкату НПП = 24 мм при різній температурі заднього кінця (для клітей 5-10)

Номер кліті	Товщина розкату, h, мм	Коефіцієнт тертя, f	$P_{cp}$ , Н/мм <sup>2</sup>	P, МН	M <sub>п</sub> , МН/мм	t <sub>н</sub> , °С	δh <sub>п</sub> , мм
5	14,80	0,355	226	15,8	1,43	980	-
6	8,50	0,315	269	14,1	2,31	958	-
7	5,50	0,278	300	11,8	3,49	941	-
8	3,70	0,233	338	10,6	5,33	919	-
9	2,90	0,214	288	6,2	6,50	898	-
10	2,50	0,189	250	3,9	7,88	867	0
10	2,48	0,188	249	3,8	7,90	1000	-0,02
10	2,43	0,187	244	3,7	7,80	1020	-0,07
10	2,38	0,185	237	3,5	7,40	1050	-0,12

Примітка: t<sub>н</sub> - початкова температура проміжного розкату

У першій частині табл. 1.7 наведені параметри прокатки заднього кінця проміжного розкату в серійному режимі, тобто при його температурі рівній 980 °С. Товщина готової штаби заднього кінця прийнята рівною h<sub>10</sub> = 2,5 мм і δh<sub>і</sub> = 0. Як випливає з табл. 1.7, коефіцієнт тертя, у міру зменшення товщини штаби, істотно зменшується внаслідок переважаючого впливу підвищення швидкості прокатки. При прийнятому режимі деформації сила прокатки P зменшується від кліті до кліті, а модуль жорсткості штаби  $\dot{I}_i$  зростає від 1,43 до 7,88 МН / мм.

При додатковому нагріванні внутрішніх витків проміжного розкату до температури 1000, 1020 і 1050 °С сила прокатки і модуль жорсткості штаби знижуються, що обумовлює зменшення приросту товщини задньої кінцевої ділянки готової штаби на δh<sub>і</sub> = - (0,02...0,12) мм (останні три рядки в табл.

1.7). Таким чином, для зменшення приросту товщини задньої кінцевої ділянки готової штаби необхідно здійснити попередній підігрів 2...3 внутрішніх витків рулону проміжного розкату додатково на 50...70 °С.

Для реалізації зазначеного підігріву внутрішніх витків рулону проміжного розкату при його розмотуванні у внутрішню порожнину рулону вводять стрижень з водоохолоджуваним індукційним нагрівачем, захищеним від ударів витками розкату, з достатньою потужністю для нагріву металу до необхідної температури.

### **Висновки**

Температурно-швидкісний режим прокатки є одним з основних факторів, що визначає продуктивність і якість гарячекатаної продукції. Регулювання температури металу в ключових точках технологічної лінії «нагрів слябів - гаряча прокатка штаб» дозволяє підвищити швидкість прокатки і скоротити ресурси - і енерговитрати що, в свою чергу, призводить до скорочення витрат виробництва.

Стосовно до листопрокатного комплексу мають місце дві проблеми подальшого підвищення ефективності виробництва:

- недостатнє використання швидкісних можливостей стану при забезпеченні високої якості прокату;

- висока енергоємність листопрокатного комплексу «печі - стан», відсутність теоретичного обґрунтування принципів енергозбереження, а також автоматизованих систем, що дозволяють реалізувати енергозберігаючі принципи і наукомісткі технології.

Технологія, що враховує фізико-механічні особливості середньо вуглецевих і легованих інструментальних сталей, дозволила освоїти на НТЛС - 1680 виробництво гарячекатаних штаб із сталей 45,50,55 і 60Г-70Г розмірами (2,7-6,0) x (1000- 1250) мм з механічними властивостями.

Особливістю прокатки штаб на традиційних широкосмугових станах гарячої прокатки (ШСГП) є наявність потовщення на задній кінцевій ділянці готової штаби довжиною 30 ... 50 м. Поява потовщення обумовлена головним чином відсутністю впливу на нього заднього натягу на міжклітьових ділянках чистової групи ШСГП, що викликає збільшення середніх нормальних напруг, сили прокатки, пружних деформацій кліті і міжвалкового зазору.

Відомо декілька шляхів впливу на потовщену кінцеву ділянку штаби для компенсації відсутності заднього натягу:

- застосування нескінченного (напівнескінченного) процесу гарячої прокатки штаб на ШСГП;
- реалізація додаткового обтиску задньої кінцевої ділянки розкату (штаби) в процесі його прокатки;
- зменшення коефіцієнта тертя при прокатці заднього кінця штаби в останніх клітях чистової групи шляхом подачі на валки технологічного мастила;
- застосування прискорення для обертання валків всіх клітей чистової групи ШСГП, починаючи з моменту, коли перед першою кліттю даної групи залишається 3 ... 5 м довжини проміжного розкату;
- збільшення температури задньої локальної ділянки проміжного розкату.

Проте кожен з перерахованих методів має незначний вплив на зміну товщини штаби і необхідно їх комплексне використання.

Зниження потовщень кінцевих ділянок і поздовжньої різнотовщинності по довжині штаби може бути здійснено шляхом використання нового технічного рішення – поділу чистової групи з 6-7 клітей на дві самостійні підгрупи клітей (по 2-4 кліті в кожній підгрупі) з проміжним перемотувальним пристроєм (ППП-Coilbox).



## 2 ДОСЛІДНИЦЬКО – РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 Аналіз режиму обтиснення сталей

На існуючих станах з традиційною технологією застосовують в чорновій групі п'ять клітей, а в чистовій - сім клітей (стан 2000). На цьому стані із слябів завтовшки 205-305 мм прокатують штаби завтовшки 1,0-2,0 мм і вище (до 30 мм). На ШСГП старої будови (стани 1680 і 1700) із слябів 150-170 мм прокатують штаби завтовшки 1,5-8 мм. При цьому, чим менше товщини штаби, тим менше її ширина. Так, штаби завтовшки  $h = 1,5$  мм прокатують з максимальною шириною  $B = 1000$  мм

Рациональний режим деформації на ШСГП незалежно від його конструкції розраховують виходячи з умов:

- захвата металу валяннями для чорнових клітей; -допускаемого зусилля прокатка;
- рівності зусиль прокатки в перших 4х і 5ти клітях чистової групи з метою зменшення поперечної різнотовщинності і неплоскостності штаб;
- допустимої потужності встановлених двигунів.

З урахуванням цих умов, а також заданих розмірах готової штаби і температури початку і кінця прокатка встановлюють розміри слябів, отриманих на слябінгу або на МНЛЗ. З точки зору зниження витрати електроенергії і отримання якісної продукції доцільно починати процес прокатка на ШСГП при температурах  $t_n = 1200-1230^\circ\text{З}$ , а закінчувати процес прокатка в останній кліті стану при температурах  $800-900^\circ\text{З}$  (велика температура при прокатуванні штаб більшої товщини). Проте при використанні на ШСГП 1680 і 1700 транзитного (прямий) прокатка температура початку і кінця процесу можуть виявлятися нижче вказаних величин.

У загальному вигляді алгоритм розрахунку деформаційно-силових параметрів прокатка штаб представляється таким чином:

- Визначення обтискань, що допускаються, в клітках стану виходячи з умов захоплення металу валяннями і міцності валків (кліті 1 і 2 чорнових групи і кліті 1 і 2 чистових групи).

- Внаслідок того, що температурний режим прокатки на стані можна встановити лише при відомих параметрах прокатки по клітках стану, заздалегідь, на підставі практичних даних, визначимо розміри слябів і величини обтискань по клітках стану.

- Виконується розрахунок температурного режиму прокатки штаби в клітках стану.

- Робиться розрахунок енергосилових параметрів деформації по клітках стану і, при необхідності, його коригування.

**Визначення обтискання, що допускається.** При прокатуванні на ШСГП максимальні обтискання слід виконувати в перших двох клітках чорнової групи. У цих клітках визначають максимальні величини обтискань, що допускаються, виходячи з умов захоплення металу валяннями. Відомо [7], що природне захоплення штаби валяннями проходить за умови

$$\alpha_3 = f_3 = f \cdot k_3, \quad (2.1)$$

де  $\alpha_3$  – максимальний кут захоплення;  $f$  - коефіцієнт тертя в сталому процесі;  $F_3$  - коефіцієнт тертя при захопленні розкату валками;  $k_3$  - поправочний коефіцієнт, що враховує відмінності умов тертя в сталому процесі і при захопленні ( $k_3 = F_3 / f$ ).

За даними різних досліджень поправочний коефіцієнт в природних умовах захоплення штаби валками становить  $k_3 = 0,8-2,5$ . Коефіцієнт  $k_3$  менше при прокатці з технологічної мастилом і більше при її відсутності і під час гарячої прокатки без окалини. За рекомендаціями [7] при вільному захопленні розкату валками слід приймати  $k_3 = 1,2 - 1,4$ , а при завданні штаби в валки з зусиллям  $k_3 = 1,4 - 1,6$ . Допустиме (максимальне) обтиснення визначається виразом

$$\Delta h_d = R \cdot \alpha_3^2, \quad (2.2)$$

де  $R$  – радіус валка, відповідній точці (площині) захоплення штаби.  
Коефіцієнт тертя в сталому процесі прокатки визначається за даними [7,19]:

$$f = f_0 \cdot k_B \cdot k_T \cdot k_M \cdot k_V \cdot k_{CM}, \quad (2.3)$$

де  $f_0$  – базовий коефіцієнт тертя, що залежить від температури металу;  
 $k_B, k_T, k_M, k_V, k_{CM}$  - поправочні коефіцієнти, що враховують вплив відповідно стан поверхні валків, твердості валків, матеріалу валків, окружної швидкості валків, типу технологічного мастила:

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 0,27 - 0,1 \left( \frac{t}{400} - 2 \right)^2; \quad k_T = 1 + 0,43 (1 - \text{HSD}/65)^2; \\ k_V &= 0,76 + 0,82 (1,0 - 0,1 \cdot v)^2 \quad \text{при } v < 10 \text{ м/с;} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$k_V = 0,76 \quad \text{при } v > 10 \text{ м/с,}$$

де  $t$  – температура металу °С; HSD – твердість по Шору;  $v$  – окружна швидкість валків, м/с.

Для сталевих та чавунних валків після початку роботи -  $k_B = 1,2$ , для сталевих валків з грубою поверхністю -  $k_B = 1,25 - 1,4$ .

При прокатці: без смазки -  $k_{CM} = 1,15$ , з водою -  $k_{CM} = 1,0$ ; з емульсією мінерального масла -  $k_{CM} = 0,9$ .

Для розрахунку максимального обтиску виходячи з міцності валків використовують відомі вирази [7]:

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot V_{cp}; \quad (2.5)$$

$$l_d = \sqrt{R \Delta h}.$$

Вирішуючи спільно вираження (2.4) і звівши в квадрат ліву і праву частини, після перетворення отримаємо

$$\Delta h_d = \frac{1}{R} \left( \frac{P_d}{p_{cp} \cdot B_{cp}} \right)^2, \quad (2.6)$$

де  $P_d = P$  – допустиме зусилля виходячи з міцності валків.

У формулі (2.7) міститься два невідомих  $\Delta h$  і  $P_{cp}$ , що не дозволяє вирішити вираз (2.7) однозначно. У зв'язку з цим в роботі [6] запропоновано ітераційний метод рішення вираження (2.7), суть якого полягає в тому, що в першу чергу розраховують середнє нормальне контактне напруження  $p_{cp}$  і зусилля прокатки  $P$  для двох можливих обтиснень (мінімального і максимального) для даної кліті, а потім по наведеній нижче формулі розраховують, що допускається обтиснення

$$\Delta h_d = \Delta h' + (\Delta h'' - \Delta h')(P_d - P') / (P'' - P'), \quad (2.7)$$

де  $\Delta h'$  і  $\Delta h''$  – можливі мінімальне і максимальне обтиснення;  $P'$  і  $P''$  – зусилля прокатки, відповідні обтиснутими  $\Delta h'$  і  $\Delta h''$ .

Допустимі зусилля по бочці для двовалкова кліті одно:

$$P_d = 0,1 \cdot D^3 \cdot \sigma_{из} / (a - 0,5b), \quad (2.8)$$

де  $D$  – діаметр валка після переточування;  $\sigma_{из}$  – допустиме напруження на вигин, МПа [5];  $a$  – відстань між осями натискних гвинтів кліті;  $b$  – ширина штаби.

Для шийки валка

$$P_d = 0,4d_{ш}^3 \cdot \sigma_{из} / l_{ш}, \quad (2.9)$$

де  $d_{ш}$  і  $l_{ш}$  – діаметр і довжина шийки валка.

Для врахування впливу напруги крутіння в шийці приводного валка беруть мінімальне значення допускається згинального напруги  $\sigma_{из}$ .

Допустиме зусилля по бочці опорного валка одно

$$P_d = 0,1 \cdot D^3 \cdot \sigma_{из} / (a - 0,5b_k), \quad (2.10)$$

де  $b_k$  – довжина міжвалкового контакту.

Допустимий (номінальний) крутний момент дорівнює ( $M_d = M_{ном}$ ) [15]

$$M_d = \frac{N_{дв} \cdot \eta}{100 \cdot n_{ном}}, \quad (2.11)$$

де  $N_{дв}$  – потужність встановленого двигуна;  $\eta$  - ККД передачі ( $\eta = 0,92 - 0,95$ );  $n_{ном}$  - номінальне число оборотів двигуна (з характеристики двигуна).

Модель розрахунку енергосилових параметрів штабової прокатки представлена нижче [7]. При наявності комп'ютерної програми розрахунок допускається обтиску в тій чи іншій клітці не представляє складнощів. При розрахунку по міцності валків допускається обтиску в клітках 1 і 2 чорнової групи і першої клітці чистової групи в ручному варіанті слід визначати зусилля прокатки по величинам допускаються обтиснень з умов захоплення штаби валками і розраховувати  $\Delta h_d$  з формули (2.6).

При складанні попередньої таблиці обтиснень в першу чергу необхідно встановити деякі координатні параметри, без яких складно отримати позитивні результати. До таких координатним параметрам слід віднести:

- товщину готової штаби;
- відносне обтиснення в першій і останній клітках чистової групи;
- товщину розкату перед чистової групою;
- сумарне обтиснення в чорновій групі клітей;
- кількість клітей в чорновій і чистовий групах клітей.

Нижче представлений алгоритм розрахунку режиму деформації штаби на ШСГП.

1 Визначимо обтиснення і товщину штаби перед чистової кліткою ( $h_i$ ) в чистовий групі:

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{ч} &= h_{ч} \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon_{ч}} \right) \\ h_{i-1} &= h_{ч} + \Delta h_{ч}, \end{aligned} \right\} ; \quad (2.12)$$

де  $\Delta h_{\text{ч}}$  – обтиснення в чистової кліті;  $H_{\text{ч}}$  – товщина штаби після чистової кліті;  $h_{i-1}$  – товщина штаби перед чистової кліттю;  $i$  – номер кліті;  $\varepsilon_{\text{ч}}$  – відносне обтиснення в чистової кліті.

2. Обтиснення ( $\Delta h_{\text{п}}$ ) в першій кліті чистової групи (мм)

$$\Delta h_{\text{п}} = \varepsilon_{\text{п}} \cdot h_{\text{р}}, \quad (2.13)$$

де  $\varepsilon_{\text{п}}$  – відносне обтиснення в першій кліті чистової групи;  $h_{\text{р}}$  – товщина розкату перед першою кліттю чистової групи (для станів з п'ятиклетевом чорної групою; для станів з чотирьохклетевий чорновий групою -  $h_{\text{р}} = 19 - 28$  мм).

3. Приватні обтиску в проміжних клітях чистової групи: семіклетевая група ( $n_i = 7 - 11$ )

$$\Delta h_i = [0,048 + 0,0095 (11 - n_i)^{2,8}] \cdot \Delta h_{\Sigma\text{ч}}; \quad (2.14)$$

шестиклетевая група ( $n_i = 6 - 9$ )

$$\Delta h_i = [0,085 + 0,089 (9 - n_i)^{1,3}] \cdot \Delta h_{\Sigma\text{ч}}. \quad (2.15)$$

Сумарне обтиснення  $\Delta h_{\Sigma\text{ч}}$  в проміжних клітях чистової групи

$$\Delta h_{\Sigma\text{ч}} = h_{\text{р}} - h_{\text{ч}} - \Delta h_{\text{ч}} - \Delta h_{\text{п}}. \quad (2.16)$$

Сумарне обтиснення за виразом (2.16) має дорівнювати сумі обтиснень за виразами (2.14) або (2.15). Тобто

$$\Delta h_{\Sigma\text{ч}} = \sum \Delta h_i,$$

де  $\sum \Delta h_i$  – сума розрахункових значень індивідуальних обтиснень за виразами (2.12) або (2.15).

Що стосується розбіжності необхідно виконати коригування індивідуальних обтиснень для досягнення значень  $\Delta h_{\Sigma\text{ч}}$ .

Товщина штаби в попередній проміжної кліті

$$h_{i-1} = h_i + \Delta h_i. \quad (2.17)$$

4. Сумарне обтиснення в клітях чорнової групи зазвичай приймають рівним

$$\sum \varepsilon_{\text{чр}} = (0,85 - 0,88)H; \quad \sum \varepsilon_{\text{чр}} = \sum \Delta h_{\text{чр}} / H \quad (H - \text{товщина сляба});$$

$$\sum \varepsilon_{\text{чр}} = 0,86\text{Н при } h_p = 23 \text{ мм};$$

$$\sum \varepsilon_{\text{чр}} = 0,88\text{Н при } h_p = 20 \text{ мм};$$

Тоді товщина сляба дорівнює

$$H = h_p / (1 - \sum \varepsilon_{\text{чр}}) \quad (2.18)$$

Сумарне обтиснення в чорновій групі однаково: для універсальних клітей (без окалиноломателя)

$$\sum \Delta h_{\text{чр}} = H - \Delta h_{\text{ок}} - h_p; \quad (2.19)$$

$$\Delta h_{\text{ок}} = \varepsilon_{\text{ок}} \cdot H; \quad h_{\text{ок}} = H - \Delta h_{\text{ок}}, \quad (2.20)$$

де  $\varepsilon_{\text{ок}}=0,1-0,2$ .

5. Розподіл обтиску по чотирьом або п'яти універсальним клетям чорнової групи визначають за виразами:

пятиклітєва група

$$\Delta h_i = [0,082 + 0,08(5-n_i)^{0,68}] \cdot \sum \Delta h_{\text{чр}}; \quad (2.21)$$

чотирьохклітєва група

$$\Delta h_i = [0,11 + 0,095(4-n_i)] \cdot \sum \Delta h_{\text{чр}}, \quad (2.22)$$

де 5 и 4 – кількість клітей в групі (без окалиноломателя);  $n_i$  - номер кліті;  $\sum \Delta h_{\text{чр}}$  - сумарне обтиснення штаби в клітях чорнової групи.

На ШСГП 1680 і 1700 старого типу перед чорновий групою встановлено двохвалкові окалиноломателі з горизонтальними валками, в яких виконують обтиснення в межах  $\varepsilon_{\text{ок}} = 10 - 20\%$  (встановлюється дослідним шляхом). Товщина штаби по клетям встановлюється з виразу (2.17)

$$h_{i-1} = h_i + \Delta h_i,$$

де  $h_i$  – товщина розкату (штаби) в даній кліті чорнової групи  $h_{i-1}$  – товщина розкату в попередньої кліті.

б. Розрахунок енергосилових параметрів прокатки. Всі розрахункові величини енергосилових параметрів повинні бути менше або дорівнюють допускаються. Так, для ШСГП 1680 і 1700 допускаються зусилля для клітей 1 і 2 (чорнова група)  $P_d = 24$  МН. Для ШСГП 2000 величину допустимих  $P_d$  і  $M_d$  дані в роботі [19].

## 2.2 Алгоритм розрахунку швидкості прокатування

Час проходження штаби в міжклітьових проміжках розраховуємо без урахування випередження і приймаємо швидкість руху штаби по рольгангам рівної швидкості виходу штаби з валків

$$\tau_{mk} = L_{mk} / v_i, \quad (2.23)$$

де  $\tau_{mk}$  – час проходження штаби в міжклітьових проміжках;

$L_{mk}$  – довжина міжклітьового проміжку;

$v_i$  – середня швидкість в  $i$  – й кліті.

Розрахунок загального часу проходження штаби по проміжному рольгангу до кліті № 5 розраховуємо по формулі (для переднього кінця штаби) :

$$\tau_{pr,p} \approx L_p / v_4, \quad (2.24)$$

де  $L_p$  – довжина проміжного рольганга (відстань між осями клітей №4 і №5);



$v_4$  – швидкість виходу штаби з кліті № 4 (з останньої кліті чорнової групи).

Швидкість заднього кінця штабі при прокатуванні в кліті № 5

$$v'_5 = v_5 (1 + S_5)/\mu_5, \quad (2.25)$$

де  $v_5$  – окружна швидкість валків кліті № 5;

$S_5$  – випередження штаби;

$\mu_5$  – коефіцієнт витягу.

Розрахунок  $\tau_{\text{МК}}$  за виразом (4.23) для клітей Ок - № 4 дорівнює 6,2- 20,3 с. (Ок - окалиноломатель).

Час руху штаби по проміжному рольгангу від кліті № 4 до кліті № 5 рівно

$$\tau_4 = 59,4 / 2,21 = 26,9 \text{ с.}$$

При прокатуванні в кліті № 5 швидкість входу штаби у валяння з формули (4.25) дорівнює ( $S = 0$ )

$$v'_5 \approx 1,9 / 1,585 = 1,20 \text{ м/с.}$$

### 2.3 Алгоритм розрахунку температури

Температурний режим прокатки штаб на безперервному стані обумовлює енергосилові параметри деформації металу, витрату електроенергії на одну тонну готової продукції, точність, площинну (планшетність) і механічні властивості штаб. У загальному випадку температура штаби визначається кількістю тепла, отриманою при нагріві, часом охолодження, умовами (кількістю і тиском води, що подається на валяння, її температурою та ін.), кількістю тепла, що виділяється в прокаті під час його деформації і ін. Тепло втрачається конвекцією при зіткненні з

деталлями кліті (з валяннями), випромінюванням, а так само віддається воді.

Розрахунок виконуємо за методикою, відповідно до якої температуру штаба після кліті визначають таким чином.

Охолодження штаби за рахунок контакту з валяннями визначається з вираження

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{1,83 \cdot 10^{-2} (t_{i-1} - 60) \sqrt{(1 + S_i) / v_i}}{H_i + h_i} \sqrt{R_i \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h_i}{2R_i} \right)}, \quad (2.26)$$

де  $R_i$  - радіус валків, мм;

$\Delta h_i$  - абсолютне обтискання, мм;

$S_i$  - випередження;

$v_i$  - швидкість штаби, м/с.

Підвищення температури металу за рахунок пластичної деформації у валяннях рівне

$$\Delta t_{\text{д}} = 0,428 p_{\text{ср}} \cdot \lg (H_i / h_i), \quad (2.27)$$

де  $p_{\text{ср}}$  - середня нормальна напруга прокатки, МПа;

$H_i$  і  $h_i$  - початкова і кінцева товщина штаби, мм.

Температура штаби на виході безпосередньо з кліті визначається за виразом:

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{д}}, \quad (2.28)$$

де  $t_{i-1}$  - температура штаби перед першою кліттю.

При проходженні штаби по рольгангу до наступної кліті відбувається втрата тепла за рахунок випромінювання ( $\Delta t_{\text{у}}$ ). Ці втрати для товстих штаб визначимо по формулі М.А. Зайкова.

$$\Delta t_u = 27,2 \frac{\varepsilon \tau \cdot m}{c \gamma h} \left( \frac{t'_i + 273}{1000} \right)^4 = \frac{16,8 \cdot \tau \cdot m}{h} \left( \frac{t'_i + 273}{1000} \right)^4 \quad (2.29)$$

де  $\tau$  - час охолодження штаби, з;

$h$  - товщина штаби на рольганге, мм;

$\varepsilon$  - коефіцієнт випромінювання ( $\varepsilon = 0,8$ );

$C$  - середня питома теплоємність штаб, ккал/кг · °С (для температур 1000 - 1200 °С коефіцієнт  $C = 0,166$  ккал/кг · °С);

$\gamma$  - щільність прокатуваного металу, 1/м<sup>3</sup>;

$t'_1$  - температура після попередньої кліти. °С;

$m$  - коефіцієнт з роботи, що враховує втрати температури при вільному теплообміні.

У зв'язку з тим, що в окалиноламачі режим деформації по всім варіантам практично однаковий, приймаємо температуру переднього кінця штаби перед кліттю № 1 рівною -  $t'_1 = 1180$  °С.

#### **2.4 Способи зниження охолодження підкату на проміжному рольгангу стану гарячої прокатки, їх теплова і енергетична ефективність**

Широкоштабові стани гарячої прокатки (ШПСГП) продовжують зберігати лідерство у виробництві гарячекатаних широких штаб, залишатися основними постачальниками заготовки для листових станів холодної прокатки. ШПСГП містять пічну групу, чорнову і чистову групи клітей і прибиральну групу устаткування, що включає рольганг, що відводить, і моталки. Між чорною і чистовою групами клітей розташований проміжний рольганг, по якому підкат (розкат) передають з чорнової в чистову групу. У провідних японських металургів відмічена єдина думка фахівців про необхідність обов'язкової наявності проміжного рольганга в технологічній лінії ШПСГП. Необхідність в опиті з'явилася, у тому числі у зв'язку з тим, що

наявність процесу передачі підкату по проміжному рольгангу наводить до істотного, до того ж нерівномірного по довжині охолодження підкату (до 100 град. і більш) до моменту входу ділянок підкату в першу кліть чистової групи.

У свою чергу відмічений перепад температури істотно ускладнює процес прокатки в чистовій групі клітей, наводить до перевантажно перших трьох-чотирьох клітей, до того ж, на виході з чистової групи потрібний постійний розподіл температури по довжині готової штаби, що обумовлене необхідністю набуття постійних фізико-механичних властивостей по довжині штаби.

Для напівбезперервних ШПСГП фірма Steel Corporaіоп СапаПа знайшла оригінальне рішення вказаної технічної задачі у вигляді операції змотування підкату в рулон з подальшим його розмотуванням і подачею підкату з практично постійною температурою по довжині для прокати в чистових клітях. Операцію змотування/розмотування підкату здійснюють в установці Coіlbox. Вживання дозволило до того ж істотно розширити можливості тих, що діють напівбезперервних ШПСГП по прокатуванню ваговитих слябів (при цьому вживання Coіlbox найефективніше для слябів із співвідношенням  $C/B > 19$  т/(м. ширини), де  $C$  - маса сляба,  $B$  - ширина сляба). Проте операція змотування/розмотування підкату, здійснювана в установці, не може забезпечити високу продуктивність, властиву безперервним ШПСГП.

Для безперервних (3/4 безперервні, 2/3 безперервні) ШПСГП, що мають продуктивність понад 4,0 млн. т/р., зниження охолодження підкату в процесі передачі його з чорнової в чистову групу клітей і зниження при цьому нерівномірного по довжині підкату розподілу температури у момент входу в першу кліть чистової групи запропоновано здійснювати шляхом екранування верхньої і нижньої поверхонь підкату на проміжному рольганге аж до підігрівання підкату в прохідній тунельній печі з верхнім взводом, що відкидається.

Об'єднаємо всі відомі способи зниження охолодження підкату на проміжному рольгангу назвою теплозберігаючі установки (ТЗУ) і розділимо їх на три види теплоекранування: пасивне, активне і псевдоактивне.

Основу пасивного теплоекранування складає зниження охолодження верхньої поверхні підкату шляхом зменшення його теплообміну з довкіллям. Це запропоновано здійснювати або зниженням міри чорноти системи екрани - підкат (ТЗУ з касетами тепловідражаючих екранів, ТОЕ), або підвищенням температури екранів за рахунок акумуляції тепла касетами при проходженні перших підкатів (ТСУ з касетами теплоакумулюючих екранів, ТАЕ). У ТСУ з касетами ТАЕ із зменшенням товщини екранів помітно підвищується ефективність екранування підкатів при початковій стадії прокатка (з вихідного <холодного> стану екранів), проте зниження товщини екранів істотно зменшує тривалість їх роботи.

Основу ТСУ активного теплоекранирования (АТЕ) складає проходження підкату в процесі його руху від чорнової до чистої групи клітей через тунельну піч, в якій до верхньої поверхні підкату підводиться тепло.

Основу ТЗУ з касетами псевдоактивних екранів (ПАТАЕ) складає проходження підкату під теплоакумулюючими екранами (ТАЕ), робочу поверхню яких (звернену до підкату) активно нагрівають до температури, яка дорівнює температурі верхньої поверхні підкату.

Способи зниження охолодження підкату з його верхньої поверхні.

Всі відомі ТЗУ для зниження втрат тепла верхньою поверхнею підкату забезпечені набором секцій, встановлених уздовж рольганга приводом переміщення секцій (від гідроциліндрів) к/від рольганга.

Довжину секцій частіше приймають кратною кроку роликів рольганга, при цьому із збільшенням довжини секцій зменшується величина їх «підскакування» при ударах по ним переднього кінця рухомого по рольгангу підкату, яке небезпечно для торця секції, наступної по ходу вказаного руху підкату. Проте із збільшенням довжини секції з'являються складнощі з

оперативним їх відведенням від рольганга. Крім того, із зростанням довжини секцій з'являється необхідність призначення в конструкції підвищених зазорів для компенсації теплових подовжень. Для кроку роликів рольганга 1200 мм (ШПСГП у Росії і в Україні) переважна довжина секцій 2400 і 3600 мм.

Небажана, але допускається експлуатація ТЗУ, забезпеченої секціями різної довжини [13].

Ширина секцій визначена довжиною бочки роликів рольганга, яку вона перевищує на 100 ... 200 мм.

На секції з можливістю оперативної заміни кріплять касети з екранами, що забезпечують реалізацію відмічених способів теплоекранування верхньої поверхні підкату. Висоту розташування робочої поверхні екранів (звернену до підкату) відносно підкату по рекомендації фірми ЕПСОТЕСЬ в основному приймають рівною 250 мм.

Касети можуть бути з ТОЕ, ТАЕ і ПАТАЕ. У ТСУ з АТЕ касета є секцією.

ТЗУ з касетами ТОЕ. Безінерційність ТЗУ з касетами ТОЕ і низька їх вартість є важливою перевагою цього способу екранування підкату.

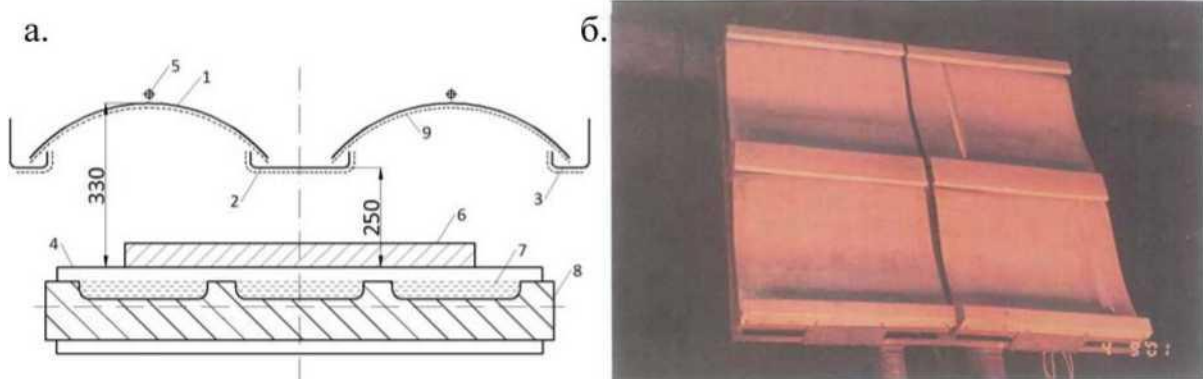


Рисунок 2.1 – Поперечний розріз (а; схема) і фотографія (б) секції ТЗУ з тепловідображаючий екранами на проміжному рольгангу ШПСГП 2000.

У 2000 р. була створена секція ТЗУ з 4-мя касетами ТОЕ, поперечний розріз і фотографія якої приведений на рис. 2.1 (пат. РФ 2 122 475. МКИ В21В 35/00). Теплоотражателі 1 були виготовлені з 2 мм листа маловуглецевої сталі, покритого А1 (рис. 2.1). По центру секції йшов підпружинений відбійник покритий А1. Бічні стінки 3 секції також були захищені А1. Товщина покриття А1 складала порядка 0,25 мм, первинна міра його чорноти знаходилася на рівні 0,2. Відстань між рівнем роликів 4 і відбійником 2 складала 250 мм. Передбачена можливість охолодження тепловідображень 1 сухим повітрям 5. Цим повітрям виключалося також осадження пилу на верхню і нижню поверхні відбивачів 1.

Приведена на фотографії (рис. 2.1, б) секція була встановлена на початку ТЗУ з касетами ТАЕ (ролики 19 - 21 після кліті № 5) на ШПСГП 2000 ВАТ «НЛМК», на несучих конструкціях цього ТЗУ.

Протягом 4-х місяців здійснювали вимір параметрів роботи секції. Встановлено, що при безперервному циклі роботи стану має місце розігрівання відбивачів 1 до 400 °С; подача повітря 5 знижує цей рівень до 180 °С. При цьому відбійник 2 нагрівався до 350 °С без подачі повітря і до 300 °С при подачі повітря. Бічні стінки 3 при подачі повітря і без нього нагрівалися до 250 °С.

По ефективності збереження тепла підкатом ТЗУ з касетами ТОЕ практично не поступаються ТЗУ з касетами ТАЕ (див. нижчий), в той же час вимагають істотно менших капітальних витрат. Проте в експлуатації ТЗУ з касетами ТОЕ вимагають додаткових експлуатаційних витрат на заміну тепловідображаючих приблизно через 6 місяців їх роботи і відновлення міри чорноти поверхонь відпрацьованих екранів, яке здійснюють дробеструйною обробкою.

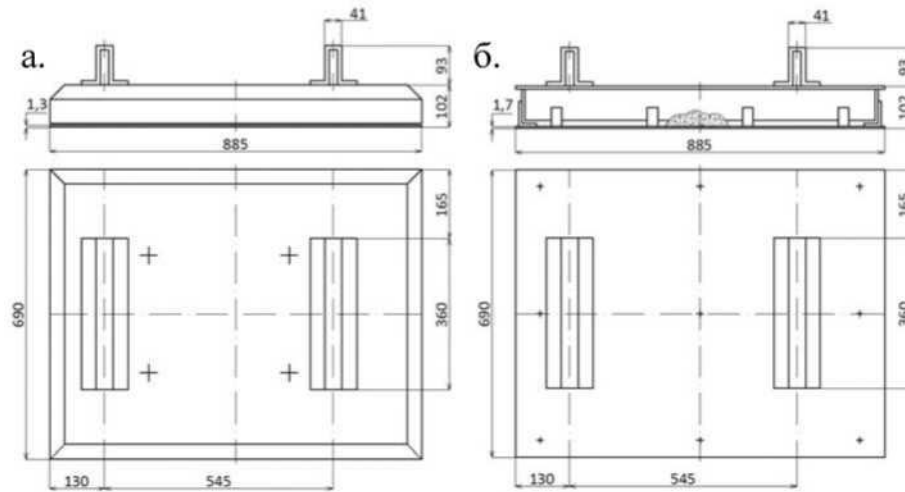


Рисунок 2.2 – Касета - енкопанель (а), встановлена на секціях ТЗУ ШПСГП 2000 ВАТ «ММК», касета-енкопанель (б) конструкції ВАТ «ММК».

У вітчизняних конструкціях касет (рис. 2.3, а), по-перше, практично відсутня теплопередача тепла в касетах впоперек напрямку руху підкату, по-друге, застосовані екрани завтовшки 1,0 мм, по-третє, істотно знижена передача тепла від екранів до інших елементів касети, по-четверте, використаний серійно виготовлений жаростійкий сплав, швидкість окислення якого 0,08 мм в рік при температурі 1200 °С. Перші три положення істотно підвищили інтенсивність розігрівання екранів, останнє дозволило експлуатувати касети протягом 3.. 4 років без заміни. До того ж звернена до підкату поверхня касет володіє високою жорсткістю, що дозволяє касетам добре протистояти ударам підкату.



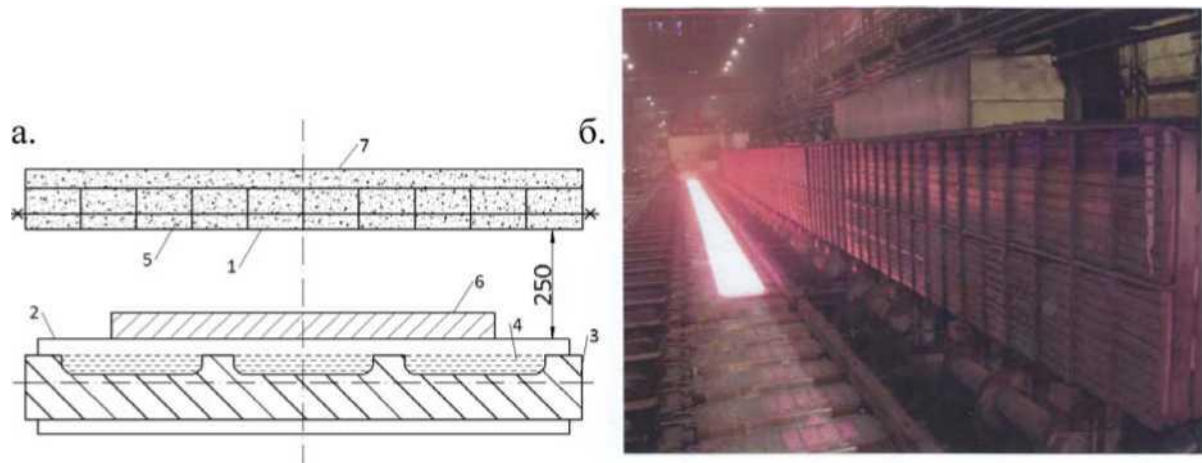


Рисунок 2.3. – Поперечний розріз (а; схема) і фотографія зовнішнього вигляду (б) ТЗУ на проміжному рольганге ШПСГП 2000. 1 - спеціальна труба з жаростійкого сплаву; 2 - верхній рівень ролика рольганга; 3 - міжроликова плита; 4 - повітряна окалина; 5 мулітокремнеземистая вата (теплоізолятор); 6 - підкат; 7 - повсть мулітокремнеземистої вата.

ТЗУ з активним теплоекрануванням підкату (АТЕ). Технічне рішення розроблене фірмою «ТесІп!» (Італія) [8, 9] і включає активну дію на температуру рухомого підкату шляхом підведення тепла до верхньої його поверхні від газових пальників. Газові пальники розташовують в однотипних секціях, забезпечених приводом їх переміщення к/від рольганга. По суті в процесі руху підкату по проміжному рольгангу його пропускають через тунельну піч з верхніми пальниками. ТЗУ з АТЕ встановлені на заводах в Італії, Єгипті, Бельгії. У Росії ТСУ з АТЕ встановлена на литейно-прокатному агрегаті (ЛПА) 2000 в р. Викса. Згідно проекту ЛПА 2000 р. Викса ТЗУ має протяжність 100 м, витрачає в середньому 45000 ккал/(т підкату), розрахована на використання природного газу з теплотворною здатністю 8000 ккал/нм  $\pm$  10 %. Підкат завтовшки 20...45 мм рухається по рольгангу, що підігрівається, із швидкістю 0,33 - 4 м/с (передній кінець) і 0,39 - 2 м/с (задній кінець).

Екрануючу поверхню нагрівають пропусканням електричного струму по тонкому листу - екрану з відміченого для ТАЕ жаростійкого сплаву (рис.

5). Псевдоактивними екрани названі у зв'язку з тим, що в ТЗУ з касетами ПАТАЕ підкат не підігрівають активною дією на його температуру.

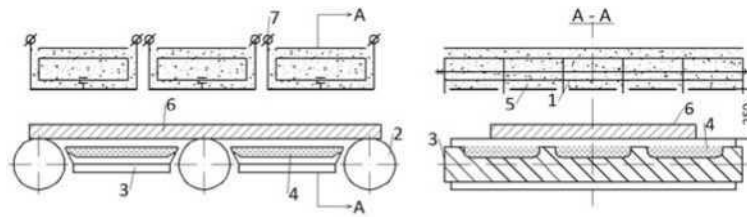


Рисунок 2.4. – Схема подовжнього і поперечного розрізів ТЗУ з касетами псевдоактивних екранів (ПАТАЕ). 1 - спеціальні труби з жаростійкого сплаву; 2 - ролики рольганга; 3 - міжроликові плити; 4 - повітряна окалина; 5 - електро (тепло) ізолятор; 6 - підкат; 7 - підведення електричного струму.

На лабораторній установці підтверджені високі теплозберігаючі властивості вживання касет ПАТАЕ. Розроблений, виготовлений і поставлений для стану гарячої прокатки 560 заводу «Серп і Молот» дослідно-промисловий модуль. На жаль, нестійке юридичне положення заводу в м. Москві зупинило роботи по промислового використанню ТЗУ з касетами ПАТАЕ.

*Способи зниження охолодження підкату з його нижньої поверхні.*

У описаних теплозберігаючих установках з касетами ТОЕ, ТАЕ і ПАТАЕ зниження втрат тепла підкатом з його нижньої поверхні виконано за допомогою повітряної окалини в ємкостях міжроликових плит рольганга (див. рис. 1, 3 і 6). При цьому використовували відоме положення, що «багатоекранна система може бути використана як надійний тепловий захист» [10]. Повітряна окалина в ємкостях міжроликових плит повністю відповідає цьому положенню, тим більше частки окалини можуть бути лише плоским тілом з вельми низькою масою.



Рисунок 2.5 - Фотографія заднього кінця підкату, що покинув з швидкістю  $< 1$  м/с останню секцію ТСУ з касетами ТАЕ; відстань між осями роликів 1200 мм.

У роботі [7] приведені узагальнення по вживанню повітряної окалини як спосіб зниження охолодження підкату з його нижньої поверхні. На рис. 2.6 показано охолодження поверхні окалини після проходження підкату:

- поза екрануванням зверху; 2 - під екранами.

Відмічені результати з'явилися основою для широкого вживання повітряної окалини як практично безінерційного способу зменшення охолодження нижньої поверхні підкату в ТЗУ з касетами ТОЕ, ТАЕ і ПАТАЕ. При цьому на прикладі ТЗУ з касетами ТАЕ встановлено, що з 100 % завдяки ТЗУ ефекту зниження охолодження підкату з верхньою і нижньою його поверхнями, вказане екранування повітряною окалиною забезпечує 50...60 % [14].

Електронний журнал №8 серпень 2011 р.

При нормальному ритмі прокатки ( $t_{\text{пауз}} \sim 15...20$  з) розігріта окалина суттєво акумулює тепло, що підсилює ефект екранування. На ШПСГП 2000 ВАТ «НЛМК» розглянуте екранування воздушної окалини застосовують також за межами ТЗУ, що особливо ефективно на стороні рольганга, ближньою після ТЗУ до летких ножиць (див. фотографії на рис. 3 і 6). Параметри мікроликової плити з ємкостями для воздушної окалини приведено на рис. 8, а.

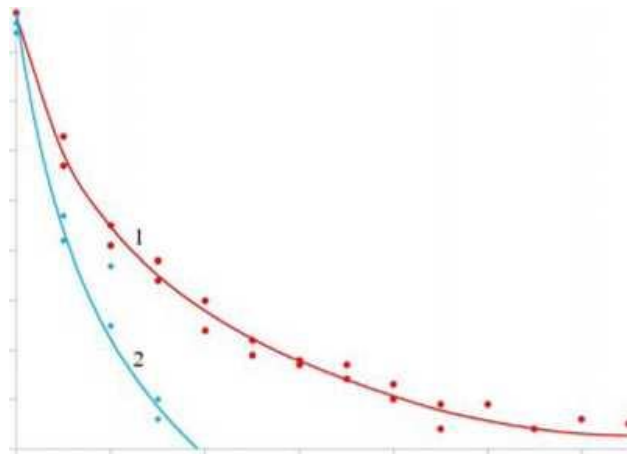


Рисунок 2.6 - Зміна температури поверхневого шару окалини в емкостях міжроликівих плит. 1 - поза екрануванням зверху; 2 - під екранами ТАЕ.

Очевидна низька вартість капітальних і особливо експлуатаційних витрат на реалізацію вживання повітряної окалини, як засіб теплового екранування нижньої поверхні підкату.

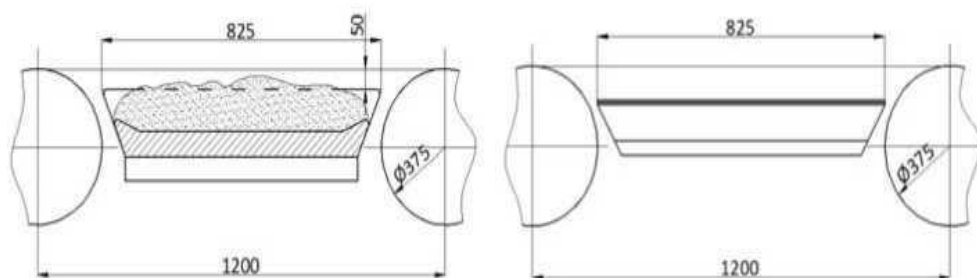


Рисунок 2.7 – Розташування міжроликівих плити (а) з емкостями для повітряної окалини і енкопанели (б) на проміжному рольгангах ШПСГП з міжроликівією відстанню 1200 мм.

У ТЗУ з касетами ТАЕ (енкопанелями) фірми ЕПСОТЕСЬ (Бауу МсЬкєє) екранування підкату з нижньої його поверхні по суті виконане по

аналогії з екрануванням верхньої поверхні (тобто за допомогою екопанелей; рис. 2.7,б). Природно, таке екранування, по-перше, вимагає великих капітальних вкладень, по-друге, збільшує експлуатаційні витрати.

У ТЗУ АТЕ фірми ТесИп! екранування нижньої поверхні підкату виконане за допомогою керамічних плит, розташування яких між роликками забезпечує схід повітряної окалини під рольганг.

### **Теплова і енергетична ефективність розглянутих ТЗУ.**

Оцінку відомих способів зниження охолодження підкату на проміжному рольгангу виконали розрахунковим методом. При цьому рішення лінійної задачі теплопроводності проводилося методом кінцевих різниць (метод сіток), з реалізацією схеми Кранко-Николсона [11]. Побудову різницевої схеми здійснювали методом балансу в граничних умовах II роду. Отримана система різницевих рівнянь вирішувалася методом прогону. Зведення тривимірного завдання теплопроводності до сукупності одновимірних виконувалося методом розщеплювання. Результати розрахунків зіставили з експериментальними даними, отриманими в лабораторних дослідженнях ТЗУ з касетами ПАТАЕ. Отриманий хороший збіг розрахованих і експериментальних значень температур екранів і окалини і їх змін у часі.

Для максимального виключення впливу побічних ефектів на результати аналізу енергетичної і теплової ефективності розглянутих способів екранування, за основу прийняли один і той же безперервний ШПС г.п. [ШПС г.п. 2000 ВАТ «НЛМК», Росія, розрахований на виробництво 6,1 млн. т/год гарячекатаних штаб завтовшки 1,2.16 мм, шириною до 1800 мм при питомій масі рулонів до 20 т/(м ширини)]. На проміжному рольганге стану встановлена ТЗУ з касетами ТАЕ (див. рис. 2.8), при цьому відстань між верхньою поверхнею екранів і верхнім рівнем рольганга рівні 250 мм, між нижньою поверхнею підкату і екранами 50 мм. Приймали, що саме також розташовані ТЗУ, що зіставляються. При цьому розглядали прокатка підкату

однієї і тієї ж товщини, ширина, маси і марки стали, що покидає останню чорнову кліть Я5 при однакових середній температурі і розподілі температури по товщині підкату (рис. 2,8) і що транспортується з однаковими швидкостями по проміжному рольгангу аж до першої кліті чистової групи Р\ . Для виключення впливу прискорення на температуру вступу підкату в кліть Р1 при різних способах екранування підкату приймали прокатку в чистовій групі клітей на постійній швидкості.

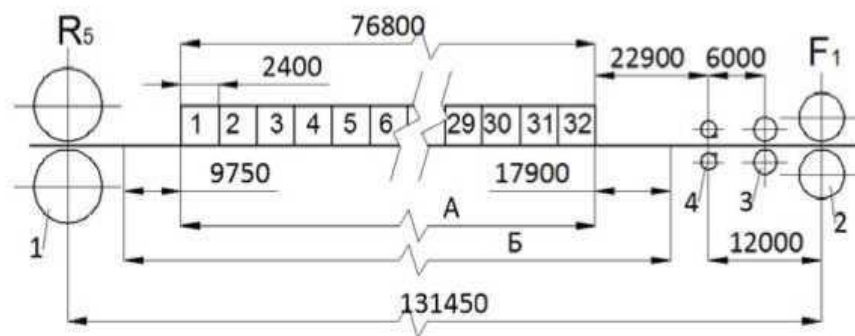


Рисунок 2.8 – Розташування ТЗУ на проміжному рольганзі ШПСГП 2000 ВАТ «НЛМК». 1 - остання кліть чорнової групи К5; 2 - перша кліть чистової групи Р\, 3 - окалиноламач; 4 - леткі ножиці; 1 ... 32 - секції ТЗУ; 9750 мм і 17900 екранування знизу повітряною окалиною до і після ТЗУ; А - екранування підкату знизу за допомогою энкопанелей (рис. 2.9); Б - найбільша протяжність екранування підкату знизу повітряною окалиною.

Зіставлення теплової і енергетичної ефективності розглянутих ТЗУ виконали на прикладі прокатки сляба товщиною 250 мм, шириною 1250 мм і завдовжки 10400 мм із здобуттям після чорнової групи (кліті №5) підкату 32 мм для здобуття штаб товщиною 1,5 мм і підкату 34 мм - для штаби завтовшки 3,0 мм. При цьому за основу прийняли роботу ШПСГП 2000 ВАТ «НЛМК» в 2007 р., коли сляби шириною 1200 -1350 мм склали 46,6 %, штаби завтовшки менше 3,0 мм - 63,5 % і підкати завдовжки понад 55 м - 31,9 %. Приймали швидкість прокатки в останній чорновій кліті К5 рівною 3,2 м/с, швидкість транспортування прокату по промрольгангу 5,0 м/с з

подальшим гальмуванням перед леткими ножицями і початком прокатки в першій кліті Р1 чистової групи підкату завтовшки 32 мм із швидкістю 0,59 м/с і підкату 34 мм із швидкістю 0,88 м/с.

Оскільки для ТЗУ з касетами ТОЕ і ТАЕ отримували практично однакові дані, нижче представлені відомості про роботу ТЗУ з касетами ТАЕ.

Теплова ефективність роботи ТЗУ. При аналізі теплової ефективності ТЗУ, що зіставляються, разом з аналізом зміни температури по товщині підкату на всій його довжині в процесі проходження промрольганга, основну увагу приділили впливу ТЗУ на температурний режим початку прокатки в першій кліті чистової групи Г1, як кінцевого результату впливу ТЗУ на умови прокатки в чистовій групі клітей [16].

Рівень температури підкатів у момент виходу з останньої кліті К5 чорнової групи при аналізі даних ТЗУ був однаковим; розподіл температури по ширині і товщині заднього кінця підкатів приведений на рис. 2.9.

В процесі оцінки теплової ефективності тунельної печі ТесИп! (ТЗУ АТЕ) розглядали різні значення теплового потоку, що підводиться до верхньої поверхні підкату. Отримано, що при тепловому потоці порядку 260-90 кВт/м (еквівалентно коефіцієнту тепловіддачі 250...300 Вт/(м·К) і температурі в печі 1350 °С) підкат практично при постійній температурі по його довжині (виключення складає передній кінець підкату завдовжки 18,9 м) поступає в першу кліть Р1 чистової групи (за прийнятої умови, що %1 = СоП81).

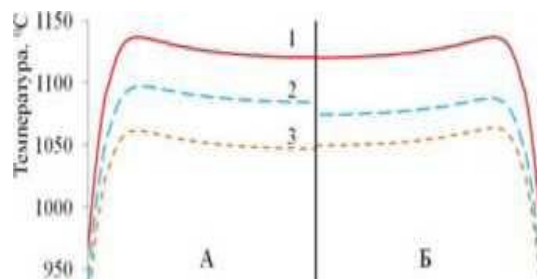


Рисунок 2.9 – Розподіл температури по ширині і товщині (товщина 32 ... 34 мм) підкату після виходу з чорнової групи (з кліті №5). 1 - центральні шари підкату; 2 - нижня поверхня підкату; 3 - верхня поверхня підкату;

Роботу ТЗУ з касетами ПАТАЕ розглядали в режимі хвиля, що «біжить» (патент РФ № 2268791 В21В; пріоритет від 28.06.2004 р.): подача напруги до касет секцій ТЗУ здійснюється у момент підходу підкату під секцію і відключення напруги - у момент виходу заднього кінця підкату з під секції. Відмічений режим роботи є найбільш переважним в частині витрат енергії. Отримано, що при вибраних параметрах екранів (560 x 180 x 1,0 мм) ПАТАЕ із сплаву залізоникеля з 44 - 46 % Ш потужність, що підводиться, до секції ПАТАЕ (2000 x 2400 мм) складає порядка 400 кВт і знижується до 176 кВт для підтримки температури поверхні екранів, рівній температурі підкату.

Результати розрахунків впливу способів екранування (типів ТЗУ) на температурні умови прокатки в чистовій групі клітей приведені в таблиці 1. Відзначимо також, що ТЗУ з пасивними способами дії на температуру підкату (енкопанелі, ТЗУ з касетами ТАЕ - 1, ТАЕ - 2 і ТОЕ) досить ефективні для ШПСГП з сім'ю чистовими клітями, оскільки, по - перше, істотно знижують температуру трьох чистових клітях (№1, №3) при прокатуванні рулонів підвищеної маси (особливо штаб завтовшки до 3,0 мм), по-друге, за рахунок прокатки масивніших рулонів знижують вживане в цій групі клітей прискорення без втрати продуктивності стану, по - третє, знижують рівень нагріву металу в печах.

Слід зазначити, що теплова ефективність пасивних способів дії на температуру підкатів на проміжному рольгангу ШПСГП досить детальний досліджена в багатьох роботах, зокрема в [1 - 7]. Тут лише визначимо вельми позитивну роль екранування нижньої поверхні підкату повітряною окалиною за межами ТЗУ (рис. 9). Відмічене на фіг. 9 додаткове екранування повітряною окалиною підвищує температуру підкату, наприклад, завтовшки 34 мм на вході в Р1 на 10 град. При цьому основний вклад в цю зміну значення температури вносить вказане екранування повітряною окалиною на ділянці ТЗУ - леткі ножиці. Відмітимо, що досвід експлуатації ТЗУ ТАЕ - 1 на ШПСГП показує, що вживання екранування нижньої поверхні підкату



повітряною окалиною на ділянці ТЗУ - леткі ножиці не впливає на процес проходження підкатом вогнища деформації кліті Р1.

Згідно даним таблиці 2.1 ТЗУ у вигляді прохідної тунельної печі (АТЕ) для підкату завтовшки 32 мм забезпечує на 30 До вище температуру вступу підкату в першу кліть Р1 чистової групи порівняно з ТЗУ ПАТАЕ - 1. Проте із збільшенням товщини підкату до 34 мм (і відміченою зміною швидкісних умов прокатки) ця різниця знижується до 23 К. Прі цьому обоє типа ТЗУ забезпечують практично однаковий температурний клин на довжині підкату у момент входу в чистову кліть Р1.

Враховуючи «згладжуючий» коефіцієнт чистової групи клітей, рівний для групи семикліті 5,25 для готової штаби завтовшки до = 1,2 мм, 4,5 для до = 1,5 мм і 2,75 для до = 3,0 мм [12], відміченою різницею в температурах вступу підкату в кліть Р1 можна було б також нехтувати, тим більше в групі семикліті прокатка здійснюють з прискоренням. Проте в будь-якому разі ця різниця в температурах виявиться в перевантаженнях перших клітей чистової групи, в подовжній разнотолщинности готових штаб [25].

При однаковому розподілі вихідної температури по товщині підкату на виході з кліті К5 наголошується істотна відмінність в розподілі температури по довжині і особливо товщині підкату у міру проходження ним тунельній печі фірми ТесИп! (ТЗУ АТЕ) і ТЗУ з касетами ПАТАЕ - 1 на проміжному рольганге ШПСГП і вступу підкату в першу кліть Р1 чистової групи.

Для проходження підкатом ділянки проміжного рольганга, обладнаного ТЗУ з касетами ПАТАЕ - 1 характерна істотна стабілізація розподілу температури по товщині підкату, порушення якої починається після виходу підкату з під ТЗУ і особливо після закінчення екранування підкату з нижньої поверхні повітряною окалиною (ділянка 8 на рис. 2.10).

Проходження підкатом тунельної печі (7 на рис. 2.11) наводить до формування істотного перепаду температури по товщині підкату (до 62 град на виході з печі), при цьому відмічене відбувається із-за інтенсивного підведення тепла до верхньої поверхні підкату, що піднімає температуру цієї

поверхні підкату (середню в 1 мм - крок прийнятої сітки розрахунку до 1130 °С). Є підстава передбачати, по-перше, що верхня поверхня підкату розігрівається ще вищим, по-друге, що вказаний рівень розігрівання підкату для ряду прокатуваних на ШПС г.п. сталей (наприклад, трубних) не бажаний.

Таблиця 2.1 – Зміна температури входу заднього кінця підкату в першу кліть Р1 чистової групи ШСГП залежно від типу ТЗП, встановленою на проміжному рольгангу

Тип ТЗУ	Товщина підкату, мм				Спосіб дії на температуру підкату
	32		34		
	Підвищення температури на вході в Р1, До	Температурний клин на вході в Р1, До	Підвищення температури на вході в Р1, До	Температурний клин на вході в Р1, До	
Без ТЗУ	-	129	-	76	-
Екопанелі	52	85	31	52	Пасивний
ТАЕ - 2 (ТОЕ - 2)	66	70	45	38	
ТАЕ - 1 (ТОЕ - 1)	80	57	55	29	
ПАТАЕ - 2	89	50	62	25	Псевдоактивний
ПАТАЕ - 1	104	36	72	15	
АТЕ	134	34	95	19	Активний

Слід зазначити, що ТЗУ з касетами ПАТАЕ - 1 і прохідна тунельна піч (ТСУ АТЕ) помітно (на 12 - 16 %) знижують температурний перепад по ширині підкату, причому ТЗУ АТЕ більшою мірою.

Після виходу підкату з під ТЗУ АТЕ верхня поверхня підкату пропорційно четвертій мірі температури виходу підкату з печі знижується (рис. 12) і на вході в першу чистову кліть Р1 розподіл температури по товщині підкату істотно стабілізується, при цьому температура на його поверхнях складає 1012...1015 °С і в центрі 1045 °С (тобто з перепадом по товщині підкату на рівні 30 град.) [31].

Відмітимо, що для підкату, минулого ТЗУ з касетами ПАТАЕ - 1, картина розподілу температури по товщині підкату на вході в кліть Р1 практично аналогічна (рис. 2.11), з перепадом по товщині підкату на рівні 30

град., проте при цьому середня температура підкату завтовшки 34 мм на 23 град. нижче порівняно з впливом на температуру підкату процесу проходження тунельної печі.

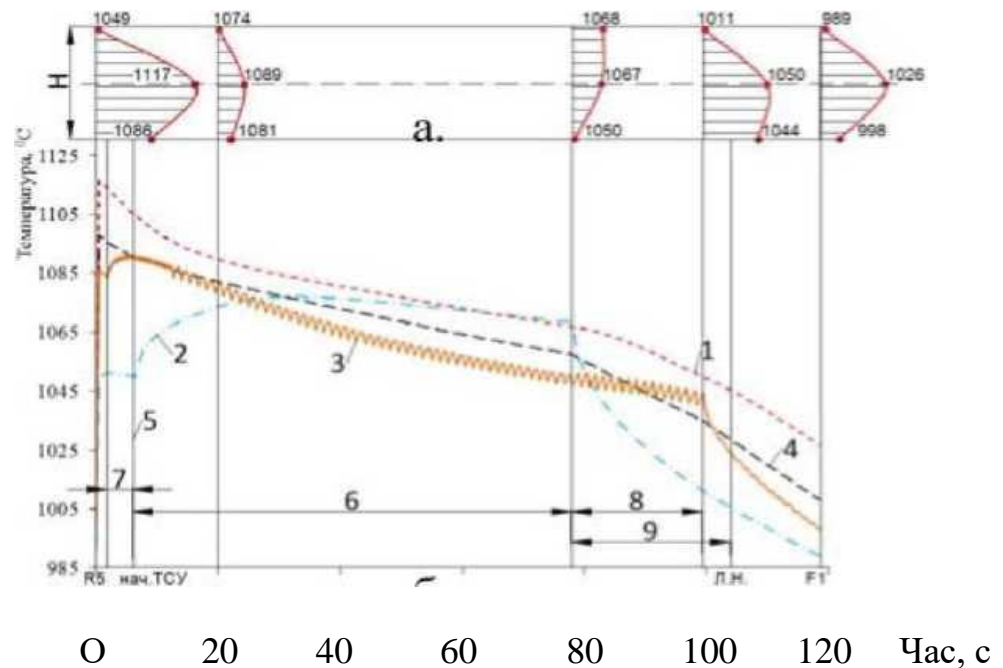


Рисунок 2.10 – Зміна температури по товщині (а) і довжині (б) заднього кінця підкату завтовшки 34 мм після виходу його заднього кінця з кліті К5 з приведеним на рис. 12 розподілом температури по його ширині і товщині і проходження по проміжному рольгангу, обладнаному секціями з касетами ПАТАЕ, - 1, і вступу в першу чистову кліть Р1. 1 - центральні шари підкату; 2 - верхня поверхня підкату; 3 - нижня поверхня підкату; 4 - середнемассовая по товщині температура підкату. Позначено (див. також мал. 11): 5 - почало ТСУ (після кліті К5); 6 - протяжність ТСУ з касетами ПАТАЕ; 7 - ділянка екранування нижньої поверхні підкату повітряною окалиною до входу в ТСУ; 8 - ділянка екранування нижньої поверхні підкату повітряною окалиною після виходу з ТСУ; 9 - відстань між ТСУ і віссю летких ножиць; Н - товщина підкату (34 мм).

*Енергетична ефективність роботи ТЗУ.* Енергоспоживання ТЗУ є важливим показником її ефективності при реалізації температурного режиму прокатки в чистовій групі клітей.

З цієї точки зору ТЗУ з пасивною дією на температуру підкату в процесі проходження ними ТЗУ на проміжному рольгангу (енкопанели, ТЗУ з касетами ТАЕ - 1, ТАЕ - 2 і ТОЕ) не вимагає витрат енергії, не рахуючи незначних витрат на роботу механізмів підйому/опусканню секцій ТЗУ, якими можна нехтувати. Характерною для цих ТЗУ є відносно проста їх конструкція[32].

Розраховані дані про витрату енергії при вживанні ТЗУ з касетами ПАТАЕ - 1 на проміжному рольгангу ШПСГП 2000 на при виконанні річного (2007 р.) замовлення, що враховують втрати на подачу електричного струму до екранів (прийняте 15 %), показують, що в річному численні витрата енергії при використанні прохідної тунельної печі ТесИп! (ТЗУ АТЕ) в цьому випадку в 7,5 разів вище.

Таблиця 2.2 – Витрата енергії на проміжному рольганге ШПСГП 2000 (рис. 2.10) при активній (тунельна піч) і псевдоактивній дії на температуру підкатів (задній кінець)

Тип ТСУ на рис. 11	Товщина підкату,					
	32			34		
	Підви- щений іє температ ури входу	Витрата енергії в ТЗУ, МДж/т	Витрата енергії на один град. підвищення температури, МДж/т К	Підвищення температури входу в Р1 °С	Витрата енергії в ТЗУ, МДж/т	Витрата енергії на один град. підвищення температури, МДж/т-К
ПАТАЕ - 2	89	24,9	0,28	62	19,2	0,31
ПАТАЕ - 1	104	24,9	0,24	72	19,2	0,27
АТЕ	134	152	1,13	95	152	1,6

## Висновки

Представлені теплозберігаючі установки (ТЗУ), що забезпечують зниження охолодження підкату на проміжному рольгангу ШПСГП ТЗУ розділені на пасивні (енкопанелі, теплоакumuлюючі і тепловідображаючі екрани) і активні (псевдоактивні і активні; до останніх віднесена прохідна тунельна піч фірми ТесИп!).

За однакових умов прокатки на ШПСГП до моменту входу підкату в першу чистову кліть прохідна тунельна піч в 1,3 разу ефективніше знижує охолодження підкату порівняно з псевдоактивними екранами і в 1,7 рази - порівняно з теплоакumuлюючими (і тепловідображаючими) екранами. У свою чергу ТЗУ з псевдоактивними екранами в 1,3 ефективніше знижує охолодження підкату порівняно з теплоакumuлюючими (і тепловідображаючими) екранами.

При рішенні однієї і тієї ж задачі зниження охолодження підкату на проміжному рольгангу використання пасивних екранів практично не вимагає витрати додаткової енергії. Використання псевдоактивних і активних екранів вимагає істотної витрати енергії (електричної, природного газу). За однакових умов прокатки витрата енергії на виконання річного замовлення при вживанні прохідної тунельної печі може в 7,5 разів перевищувати витрату енергії порівняно з використанням псевдоактивних екранів, що необхідно враховувати при ухваленні рішення про вживання прохідної тунельної печі.

Проходження підкатом тунельної печі закінчується формуванням істотного перепаду температури по товщині підкату із значеннями на верхній поверхні підкату, небажаними для ряду прокатуваних сталей.

Проходження підкатом ТЗУ з касетами псевдоактивних екранів закінчується на виході з ТЗУ приблизно в 2 рази меншим перепадом температури по товщині підкату порівняно з проходженням тунельної печі.

У обох випадках екранування до входу у вогнище деформації першої чистової кліті Р1 перепад температури по товщині підкату стабілізується з приблизно однаковим перевищенням температури в центрі підкату порівняно з його поверхнями.

5. ТЗУ з пасивною дією на температуру підкату має досить просте конструктивне виконання. Їх вживання технічно і економічно виправдано на проміжних рольгангах ШСГП з сім'ю чистовими клітями, прокатки в яких здійснюється з прискоренням.

ТЗУ з активними (тунельна піч) і псевдоактивними екранами обґрунтовано експлуатувати на рольгангах, після проходження яких прокатку здійснюють на постійній швидкості.

## 3 ПАРАМЕТРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОКАТУВАННЯ СТАЛІ

### 3.1 Розрахунок кінематичних і енергосилових параметрів прокатування до оптимізації одержання штаби з розмірами 2,7×1050 Ст. 70Г на стані ШСГП 1680

Вихідний сляб Н = 150 мм.

Розрахунки припустимих кутів захвата:

$$D = 0,92D_p;$$

$$1 \text{ кліть } D=0,92 \cdot 940=865 \text{ мм};$$

$$2 \text{ кліть } D=0,92 \cdot 810=745 \text{ мм};$$

$$3 \text{ кліть } D=0,92 \cdot 580=533 \text{ мм};$$

$$4 \text{ кліть } D=0,92 \cdot 590=543 \text{ мм}.$$

Допустимо, що мінімально можлива температура при в ході в чорнову групу клітей буде дорівнювати  $t = 1100$  °С. 1-2 кліть твердість поверхні робочих валків 40HSD.

Тому, що в чорновій групі клітей процес прокатки не є безперервним та швидкості прокатки не залежать від закону сталості обсягу.

$$V_{\text{дуо}}=0,99 \text{ м/с}, v_1=1,05 \text{ м/с}, v_2=1,1 \text{ м/с}, v_3=1,6 \text{ м/с}, v_4=2,2 \text{ м/с}.$$

Кліть ДУО

$$f = f_0 k_B k_t k_m k_v k_{ct} k_\varepsilon \quad k_m = 1$$

$$k_t = 1 + 0,43 \left( 1 - \frac{HSD}{65} \right)^2 \quad k_v = 0,76 + 0,82(1 + 0,1v)^2$$

$$k_b = 1 \div 1,1, k_{cm} = 1, k_m = 1, k_\varepsilon = 1$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{t^\circ}{400} - 2 \right)^2 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{1120}{400} - 2 \right)^2 = 0,221$$

$$k_v = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot 1.05)^2 = 1.175$$

$$k_T = 1 + 0.43 \left( 1 - \frac{40}{65} \right)^2 = 0,602$$

$$f_{ДНО} = 0.221 \cdot 1.06 \cdot 1.42 \cdot 0.95 = 0.397$$

1-2 кліть

$$f = f_0 k_B k_t k_m k_v k_{ct} k_\varepsilon \quad k_m = 1$$

$$k_t = 1 + 0.43 \left( 1 - \frac{HSD}{65} \right)^2 \quad k_v = 0.76 + 0.82(1 + 0.1v)^2$$

$$k_b = 1 \div 1.1, \quad k_{cm} = 1, \quad k_m = 1, \quad k_e = 1$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{t^\circ}{400} - 2 \right)^2 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{1100}{400} - 2 \right)^2 = 0,213$$

$$k_{v_1} = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot 1.05)^2 = 1.42$$

$$k_T = 1 + 0.43 \left( 1 - \frac{40}{65} \right)^2 = 1.06$$

$$f_1 = 0.213 \cdot 1.06 \cdot 1.42 \cdot 0.95 = 0.305$$

$$k_{v_2} = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot 1.1)^2 = 1.36$$

$$f_2 = 0.213 \cdot 1.06 \cdot 1.36 \cdot 0.95 = 0.291$$

3-4 кліть.

Твердість валків 70HSD  $t^\circ = 1090^\circ\text{C}$ .

$$f = f_0 k_B k_t k_m k_v k_{ct} k_\varepsilon \quad k_m = 1$$



$$k_b = 1 \div 1.1, k_{cm} = 1, k_m = 1, k_e = 1$$

$$f_{03} = 0.27 - 0.1 \left( \frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{1090}{400} - 2 \right)^2 = 0.217$$

$$k_{v3} = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot 1.6)^2 = 1.34$$

$$f_3 = 0.217 \cdot 1 \cdot 1.34 \cdot 0.95 = 0.276$$

$$f_{04} = 0.27 - 0.1 \left( \frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{1076}{400} - 2 \right)^2 = 0.222$$

$$k_{v4} = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot 2.2)^2 = 1.26$$

$$f_4 = 0.222 \cdot 1 \cdot 1.26 \cdot 0.95 = 0.266$$

Коефіцієнт тертя при захваті розкату  $k_z = 1,35$

$$f_z = f \cdot k_z$$

$$f_{z_{ДВО}} = 1,35 \cdot 0,26 = 0,351$$

$$f_{z_1} = 1,35 \cdot 0,26 = 0,351$$

$$f_{z_2} = 1,35 \cdot 0,25 = 0,337$$

$$f_{z_3} = 1,35 \cdot 0,25 = 0,337$$

$$f_{z_4} = 1,35 \cdot 0,26 = 0,351$$

обтиснення, що допускаються

$$[\Delta h] = R \cdot f_z^2$$

$$[\Delta h_{ДВО}] = 210 \cdot 0.351^2 = 25 \text{ мм}$$

$$[\Delta h_1] = 432.4 \cdot 0.351^2 = 53.2 \text{ мм}$$

$$[\Delta h_2] = 372 \cdot 0.337^2 = 42,3 \text{ мм}$$

$$[\Delta h_3] = 266.5 \cdot 0.337^2 = 30.2 \text{ мм}$$

$$[\Delta h_4] = 271.5 \cdot 0.351^2 = 33.4 \text{ мм}$$

Становимо таблицю попередніх обтиснень

$$H = 150 \text{ мм}, \Delta h_{\text{ок}} = 25 \text{ мм}, h_{\text{ок}} = 150 - 25 = 125 \text{ мм}$$

$$\Delta h_i / \Delta h \Sigma = 0.106 + 0.086(4 - ni)^{0.9}$$

$$\Delta h_1 / \Delta h \Sigma = 0.106 + 0.086(4 - 1)^{0.9} = 0,36$$

$$\Delta h_2 / \Delta h \Sigma = 0.106 + 0.086(4 - 2)^{0.9} = 0,316$$

$$\Delta h_3 / \Delta h \Sigma = 0.106 + 0.086(4 - 3)^{0.9} = 0,2$$

$$\Delta h_4 / \Delta h \Sigma = 0.106 + 0.086(4 - 4)^{0.9} = 0,106$$

$$h_{\text{пр}} = 20 \text{ мм.}$$

$$H_1 - h_4 = \Delta h \Sigma = 135 - 23 = 115 \text{ мм}$$

$$\Delta h_i = \Delta h \Sigma \cdot \left( \frac{\Delta h_i}{\Delta h \Sigma} \right)$$

$$\Delta h_1 = 0.36 \cdot 115 = 41,4 \text{ мм}$$

$$\Delta h_2 = 0.316 \cdot 115 = 36,34 \text{ мм}$$

$$\Delta h_3 = 0.2 \cdot 115 = 25,07 \text{ мм}$$

$$\Delta h_4 = 0.106 \cdot 115 = 12,19 \text{ мм}$$

### Чистова група клітей

В 5й кліті  $\varepsilon = 40\%$

$$\Delta h_5 = \varepsilon \cdot h_{\text{пр}} = 0,4 \cdot 20 = 8 \text{ мм}$$

В 10й кліті  $\varepsilon = 15\%$

$$\Delta h_{10} = h_{\text{к}} \left( \frac{1}{1 - \varepsilon} - 1 \right) = 1,2 \left( \frac{1}{1 - 0.15} - 1 \right) = 0.212 \text{ мм}$$

$$\Delta h \Sigma = h_{\text{пр}} - h_{\text{к}} - \Delta h_5 - \Delta h_{10} = 20 - 1,2 - 8 - 0.212 = 10.58 \text{ мм}$$

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

$$\Delta h_6 / \Delta h \Sigma = 0.085 + 0.089(9 - 6)^{1.3} = 0.456$$

$$\Delta h_7 / \Delta h \Sigma = 0.085 + 0.089(9 - 7)^{1.3} = 0.304$$

$$\Delta h_8 / \Delta h \Sigma = 0.085 + 0.089(9 - 8)^{1.3} = 0.174$$

$$\Delta h_9 / \Delta h \Sigma = 0.085 + 0.089(9 - 9)^{1.3} = 0.085$$

$$\Delta h_6 = 10.58 \cdot 0.456 = 4.82 \text{ мм}$$

$$\Delta h_7 = 10.58 \cdot 0.304 = 3.21 \text{ мм}$$

$$\Delta h_8 = 10.58 \cdot 0.174 = 1.84 \text{ мм}$$

$$\Delta h_9 = 10.58 \cdot 0.085 = 0.69 \text{ мм}$$

Розрахунки швидкостей.

Тому що в чорновій групі клітей процес прокатки не є безперервним те швидкості прокатки не залежать від закону сталості обсягу.

$$v_1 = 1.05 \text{ м/с}, v_2 = 1,1 \text{ м/с}, v_3 = 1.6 \text{ м/с}, v_4 = 2.2 \text{ м/с}.$$

А в чистовій групі йде безперервна прокатка  $v_{10} = 9 \text{ м/с}$ .

$$v_i = v_{10} h_{10} / h_i$$

$$v_9 = 9 \cdot 1,2 / 1,44 = 7,66 \text{ м/с}$$

$$v_8 = 9 \cdot 1,2 / 2,12 = 5,1 \text{ м/с}$$

$$v_7 = 9 \cdot 1,2 / 3,96 = 2,72 \text{ м/с}$$

$$v_6 = 9 \cdot 1,2 / 7,17 = 1,50 \text{ м/с}$$

$$v_5 = 9 \cdot 1,2 / 12 = 0,9 \text{ м/с}$$

Розрахунки втрат температури.

Умовно приймемо, що сляб у першу кліть повинен подаватися з температурою не менше  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$L_{1-2}=12 \text{ м.}$$

$$L_{2-3}=11 \text{ м.}$$

$$L_{3-4}=20 \text{ м.}$$

Падіння  $\Delta t$  на рольгангу між клітьями.

$$1-2 \Delta t \approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$2-3 \Delta t \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$3-4 \Delta t \approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$4-5 \Delta t \approx 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_H = 1100 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Delta t_i = 0.0021 \left( \frac{t_i + 273}{100} \right)^4 \frac{\tau_i}{H_i}$$

$$\Delta t_1 = 0.0021 \left( \frac{1100 + 273}{100} \right)^4 \frac{9}{135} = 5,8^\circ\text{C}$$

$$\tau_1 = L_1 / v_1 = 9/1 = 9$$

$t_2$  на вході в другу кліть

$$t_2 = t_H - \Delta t_1 - \Delta t_r - \Delta t_p = 1180 - 5,8 - 10 - 5 = 1079,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau_2 = L_2 / v_2 = 12/1,05 = 11,43$$

$$\Delta t_2 = 0.0021 \left( \frac{1079 + 273}{100} \right)^4 \frac{11,43}{93,6} = 8,57^\circ\text{C}$$

$t_3$  на вході в 3-у кліть.

$$t_3 = 1079 - \Delta t_2 - \Delta t_p - \Delta t_r = 1079 - 8,57 - 10 - 10 = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau_3 = L_3 / v_3 = 11/1,6 = 6,9$$

$$\Delta t_3 = 0.0021 \left( \frac{1050 + 273}{100} \right)^4 \frac{6,9}{57,26} = 7,7^\circ\text{C}$$

$t_4$  на вході в 4-у кліть.

$$t_4 = 1050 - \Delta t_3 - \Delta t_p = 1050 - 7,7 - 15 = 1027,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau_4 = L_4 / v_4 = 20/2,2 = 9$$

$$\Delta t_4 = 0.0021 \left( \frac{1027 + 273}{100} \right)^4 \frac{9}{34,26} = 15,76^\circ\text{C}$$

$t_5$  на вході в 5-у кліть

$$t_5 = 1027 - \Delta t_4 - \Delta t_{\text{пр}} = 1027 - 15,76 - 60 = 951 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Таблиця 3.1 – Режим деформації штаби  $2.7 \times 1050$  Ст. 70Г

№ кліті	H мм	h мм	$\Delta h$ мм	V м/с	$t^\circ\text{C}$
ДУО	150	125	25	0,99	1220
1	125	93,6	31,4	1,05	1200
2	93,6	57,26	36,34	1,1	1115
3	57,26	32,19	25,07	1,6	1090
4	32,19	20	12,19	2,2	1076
5	20	13	7	0,9	951
6	13	8,18	4,82	1,5	940
7	8,18	4,97	3,21	2,72	925
8	4,97	3,13	1,84	5,1	897
9	3,13	1,94	1,19	7,66	870
10	1,94	1,5	0,44	9	850

Температуру в клітях чистової групи знаходимо по формулі

$$t_i = t_{\text{нк}} - \left( \frac{t_{\text{нк}} - t_{\text{к}}}{\frac{h_{\text{нк}}}{h_{\text{к}}} - 1} \right) \left( \frac{h_{\text{нк}}}{h_i} - 1 \right)$$

$$t_6 = 951 - \left( \frac{951 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{7,18} - 1 \right) = 940^\circ\text{C}$$

$$t_7 = 951 - \left( \frac{951 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{3,97} - 1 \right) = 925^\circ\text{C}$$

$$t_8 = 951 - \left( \frac{951 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{2,13} - 1 \right) = 897^\circ C$$

$$t_9 = 951 - \left( \frac{951 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{1,44} - 1 \right) = 870^\circ C$$

$$t_{10} = 951 - \left( \frac{951 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{1,2} - 1 \right) = 850^\circ C$$

Розрахунок енергосилових параметрів прокатки

### Кліть 1

$$\Delta h = 31,4 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{470 \cdot 31,4} = 139,5 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{125 + 93,6}{2} = 114,3 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 1379,5 / 114,3 = 1,22$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{31,4}{114,3 + 20,7} = 0,31$$

$$u = \frac{1050 \cdot 0,31}{139,15} = 2,33 \text{ с}^{-1}$$

Вуглецевий коефіцієнт

$$N = C + Si + Mn + Cr + Ni + Cu + Al = 0,7 + 0,27 + 0,1 + 0,25 + 0,25 + 0,2 + 0,06 = 0,99\%$$

Базова границя текучості:

$$\sigma_{T\delta} = 80 + 25 \left[ 1 - \left( \frac{5 - N}{4.5} \right)^{1.8} \right] = 80 + 25 \left[ 1 - \left( \frac{5 - 0.99}{4.5} \right)^{1.8} \right] = 80,46 \text{ H / мм}^2$$

$$kt = 1.66 - 1.1 \left( \frac{1100}{400} - 2 \right)^{0.7} = 0,76$$

Таблиця 3.2 – Границя текучості металу Ст.70Г

Хімічний склад	%
Кремній (Si)	0,17 - 0,37
Марганець (Mn)	0,9-0,12
Мідь (Cu)	0,2
Нікель (Ni)	0,25
Сірка (S)	0,035
Вуглець (C)	0,67 – 0,75
Фосфор (P)	0,035
Хром (Cr)	0,25

$$k\varepsilon = 1 + 0.43 \left( 1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2 \right) = 1 + 0.43 \left( 1 + 6.3(0.5 - 0.31)^2 \right) = 1.52$$

$$ku = 0.22 + 0.072(7 + \ln u) = 0.22 + 0.072(7 + \ln 2.33) = 0.784$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u = 80,46 \cdot 0,76 \cdot 1,52 \cdot 0,784 = 72,9 \text{ H / мм}^2$$

$$f_n = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,305 - 0,018 = 0,47$$

$$p_{cp} = 1.15 \sigma_T (1 + 0,48 f_n \cdot l_d / hcc) = 1,15 \cdot 72,9 (1 + 0,48 \cdot 0,47 \cdot 1,2) = 106,9 \text{ H / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 1 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 106,9 \cdot 0,1395 \cdot 1,1 = 16,4 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

Для 1 кліті  $f/\alpha \approx 1$ 

$$\psi = (0,498 + 0,007)(1,22)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{1} \right)} = 0.494$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0.494 \cdot 0.1395 \cdot 16,4 = 1,13 \text{ МН}$$

Момент тертя в шейках валків  $d_{ш} = 660 \text{ мм}$

$$M_{mp1} = P \cdot f_{nod} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 16,4 \cdot 0,003 \cdot 0,66 \left( \frac{940}{1340} \right) = 0,0227 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,11(2M + M_{mp1}) = 0,11(2 \cdot 1,13 + 0,0227) = 0,25 \text{ МНм}$$

$$Mnp = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 2 \cdot 1,13 + 0,25 + 0,0227 = 2,532 \text{ МНм}$$

$$M\partial\partial = Mnp / i \quad i = 19,26$$

$$M\partial\partial = 2,532 / 19,26 = 0,13 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\partial\partial \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 1,05 \cdot 19,26 / 3,14 \cdot 0,94 = 411 \text{ об/мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{6300 \cdot 0,9}{411 \cdot 10^2} = 0,134 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$kn = \frac{M\partial\partial}{M_H} = 0,13 / 0,134 = 0,97$$

Двигун не перевантажений

$$N\partial\partial = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 2,532 \cdot 1,05 / 0,47 = 5430 \text{ кВт}$$

## Кліть 2

$$\Delta h = 36,34 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{405 \cdot 36,34} = 121,3 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{93,6 + 57,26}{2} = 75,43 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 121,3 / 75,43 = 1,61$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{36,4}{75,43 + 18,2} = 0,38$$

$$u = \frac{1100 \cdot 0,38}{121,4} = 3,44 \text{ с}^{-1}$$

$$fn = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,291 - 0,018 = 0,44$$



$$kt = 1.66 - 1.1 \left( \frac{1095}{400} - 2 \right)^{0.7} = 0.77$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43 \left( 1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2 \right) = 1 + 0.43 \left( 1 + 6.3(0.5 - 0.38)^2 \right) = 1.47$$

$$ku = 0.22 + 0.072(7 + \ln u) = 0.22 + 0.072(7 + \ln 3.44) = 0.812$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 0,77 \cdot 1,47 \cdot 0,812 = 73,9 \text{ H / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1.15 \sigma_T (1 + 0,48 f n \cdot l_d \cdot / hcc) = 1,15 \cdot 66,4 (1 + 0,48 \cdot 0,44 \cdot 1,61) = 102,32 \text{ H / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 2 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 102,32 \cdot 0,1213 \cdot 1,1 = 13,65 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 121,3 / 405 = 0,299$$

$$f / \alpha = 0,291 / 0,299 = 0,973$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 0,973) (1,61)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{0,973} \right)} = 0,478$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0,478 \cdot 0,1213 \cdot 13,65 = 0,791 \text{ МН}$$

Момент тертя в шейках валків  $d_{ш} = 480$  мм

$$M_{mp1} = P \cdot f_{нод} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 13,65 \cdot 0,003 \cdot 0,48 \left( \frac{840}{1240} \right) = 0,013 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,11(2M + M_{mp1}) = 0,11(2 \cdot 0,791 + 0,013) = 0,175 \text{ МНм}$$

$$M_{np} = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 2 \cdot 0,791 + 0,013 + 0,175 = 1,77 \text{ МНм}$$

$$M_{\delta\epsilon} = M_{np} / i \quad i = 19,5$$

$$M_{\delta\epsilon} = 1,77 / 19,5 = 0,091 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N \delta \delta \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 1,1 \cdot 19,5 / 3,14 \cdot 0,81 = 500 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{4000 \cdot 0,9}{500 \cdot 10^2} = 0,07 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$kn = \frac{M\partial\epsilon}{M_H} = 0,091/0,07 = 1,3$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\partial\partial = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 1,77 \cdot 1,1 / 0,405 = 4615 \text{кВт}$$

### Кліть 3

$$\Delta h = 25,07 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{290 \cdot 25,07} = 85,27 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{57,26 + 32,19}{2} = 44,725 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 85,27 / 44,725 = 1,9$$

$$u = \frac{v \cdot \epsilon}{l_d}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{25,07}{44,725 + 12,53} = 0,437$$

$$u = \frac{1590 \cdot 0,437}{85,27} = 8,14 \text{ с}^{-1}$$

$$f\dot{i} = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,276 - 0,018 = 0,42$$

$$kt = 1,66 - 1,1 \left( \frac{1090}{400} - 2 \right)^{0,7} = 0,781$$

$$k\epsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - \epsilon)^2) = 1 + 0,43(1 + 6,3(0,5 - 0,437)^2) = 1,44$$

$$ku = 0,22 + 0,072(7 + \ln u) = 0,22 + 0,072(7 + \ln 8,14) = 0,87$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\epsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 0,781 \cdot 1,44 \cdot 0,78 = 70,6 \text{ Н / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1,15\sigma_T(1 + 0,48f\dot{i} \cdot l_d / h_{cc}) = 1,15 \cdot 70,6(1 + 0,48 \cdot 0,42 \cdot 1,9) = 112,3 \text{ Н / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 3 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 112,3 \cdot 0,08527 \cdot 1,1 = 10,53 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{h_{cc}} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 85,27 / 290 = 0,294$$

$$f / \alpha = 0.276 / 0.294 = 0.94$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 0.94)(1.9)^{\left(0.0145 + \frac{0.097}{0.94}\right)} = 0.467$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0.467 \cdot 0.08527 \cdot 10,53 = 0.419 \text{ МН}$$

Момент тертя в шийках валків  $d_{ш} = 396$  мм

$$M_{mp1} = P \cdot f_{нод} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 10,53 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{580}{1240} \right) = 0,006 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,11(2M + M_{mp1}) = 0,11(0.838 + 0,006) = 0,093 \text{ МНН}$$

$$M_{np} = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0.838 + 0,006 + 0,093 = 0.937 \text{ МНм}$$

$$M_{\partial\partial} = M_{np} / i \quad i = 10,15$$

$$M_{\partial\partial} = 0.937 / 10.15 = 0.092 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\partial\partial \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 1.59 \cdot 10.15 / 3.14 \cdot 0.58 = 530 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{4000 \cdot 0,9}{530 \cdot 10^2} = 0,066 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$k_n = \frac{M_{\partial\partial}}{M_H} = 0,092 / 0,066 = 1,39$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\partial\partial = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0.937 \cdot 1.59 / 0.29 = 4932 \text{ кВт}$$

#### Кліть 4

$$\Delta h = 12,19 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{295 \cdot 12,19} = 59,9 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{32,19 + 20}{2} = 26,09 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 59,9 / 26,09 = 2,295$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{12,19}{26,09 + 6,095} = 0,378$$

$$u = \frac{2210 \cdot 0,378}{59,9} = 13,95c^{-1}$$

$$fi = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,266 - 0,018 = 0,41$$

$$kt = 1,66 - 1,1 \left( \frac{1076}{400} - 2 \right)^{0,7} = 0,81$$

$$k\varepsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0,43(1 + 6,3(0,5 - 0,378)^2) = 1,47$$

$$ku = 1,03 + 0,1(\ln u - 2,3) = 1,03 + 0,1(\ln 13,95 - 2,3) = 1,063$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 0,81 \cdot 1,47 \cdot 1,063 = 101,84H / \text{мм}^2$$

$$p_{cp} = 1,15\sigma_T(1 + 0,48fn \cdot l_d / h_{cc}) = 1,15 \cdot 101,84(1 + 0,48 \cdot 0,41 \cdot 2,295) = 170H / \text{мм}^2$$

Зусилля прокатки в 4й кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 170 \cdot 0,059 \cdot 1,1 = 11,03MH$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{h_{cc}} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 59,9 / 295 = 0,203$$

$$f / \alpha = 0,266 / 0,203 = 1,31$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 1,31)(2,295)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{1,31} \right)} = 0,471$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0,471 \cdot 0,059 \cdot 11,3 = 0,314MH$$

Момент тертя в шийках валків діш = 396 мм

$$M_{mp1} = P \cdot f_{nod} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 11,03 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{590}{1240} \right) = 0,006MH\text{м}$$

$$M_{mp2} = 0,11(2M + M_{mp1}) = 0,11(2 \cdot 0,314 + 0,006) = 0,069MH\text{м}$$

$$Mnp = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 2 \cdot 0,314 + 0,006 + 0,069 = 0,703MH\text{м}$$

$$M\delta v = Mnp / i \quad i = 7,36$$

$$M\delta v = 0,703 / 7,36 = 0,095MH\text{м}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\delta\delta \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 2,2 \cdot 7,36 / 3,14 \cdot 0,59 = 52606 / \text{мин}$$

$$M_n = 0,975 \frac{4000 \cdot 0,9}{526 \cdot 10^2} = 0,07 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$k_n = \frac{M_{\text{дв}}}{M_n} = 0,095 / 0,07 = 1,36$$

Перевантаження в межах допуску

$$N \Delta \sigma = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0,703 \cdot 2,2 / 0,295 = 5033 \text{ кВт}$$

Чистова група клітей, кліті 5, 6, 7, 8, 9, 10

**Кліть 5**

$$\Delta h = 7 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = \sqrt{310 \cdot 8} = 49,8 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{20 + 13}{2} = 16 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 49,8 / 16 = 3,11$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5 \Delta h} = \frac{7}{16 + 4} = 0,4$$

$$u = \frac{900 \cdot 0,4}{49,8} = 7,22 \text{ с}^{-1}$$

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{951}{400} - 2 \right)^2 = 0,255$$

$$k_v = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 0,9)^2 = 1,43$$

$$k_m = 1$$

$$f = 0,255 \cdot 1,43 \cdot 1 = 0,346$$

$$f_i = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,346 - 0,018 = 0,53$$

$$k_t = 1,66 - 1,1 \left( \frac{951}{400} - 2 \right)^{0,7} = 1,1$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0,43(1 + 6,3(0,5 - 0,4)^2) = 1,4$$

$$ku = 0,38 + 0,065(7 + \ln u) = 0,38 + 0,065(7 + \ln 7,22) = 0,96$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 1,1 \cdot 0,96 \cdot 1,4 = 118,95 \text{ H / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1,15\sigma_T(1 + 0,48fn \cdot l_d \cdot / hcc) = 1,15 \cdot 118,95(1 + 0,48 \cdot 0,53 \cdot 3,11) = 245 \text{ H / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 5 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 245 \cdot 0,0498 \cdot 1,1 = 13,4 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 49,8 / 310 = 0,16$$

$$f / \alpha = 0,2551 / 0,16 = 1,59$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 1,59)(3,11)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{1,59} \right)} = 0,467$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0,467 \cdot 0,0498 \cdot 13,4 = 0,312 \text{ МН}$$

Момент тертя в шийках валків  $d_{ш} = 396 \text{ мм}$

$$M_{mp1} = P \cdot f_{nod} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 13,4 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{620}{1240} \right) = 0,007 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,05(2M + M_{mp1}) = 0,05(0,624 + 0,007) = 0,0315 \text{ МНм}$$

$$Mnp = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0,624 + 0,0315 + 0,007 = 0,6625 \text{ МНм}$$

$$M\delta v = Mnp / i \quad i = 7,24$$

$$M\delta v = 0,6625 / 7,24 = 0,092 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\delta\delta \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 0,9 \cdot 7,24 / 3,14 \cdot 0,62 = 200 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{5000 \cdot 0,95}{200 \cdot 10^2} = 0,231 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$kn = \frac{M\delta v}{M_H} = 0,092 / 0,231 = 0,39$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\delta\delta = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0,6625 \cdot 0,9 / 0,31 = 1846,4 \text{ кВт}$$

**Кліть 6**

$$\Delta h = 4,82 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{310 \cdot 4,82} = 38,65 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H+h}{2} = \frac{13+8,18}{2} = 9,59 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 38,65 / 9,59 = 4,03$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{4,82}{9,59 + 2,41} = 0,4$$

$$u = \frac{1500 \cdot 0,4}{38,65} = 15,5 c^{-1}$$

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{940}{400} - 2 \right)^2 = 0,257$$

$$kv = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 1,5)^2 = 1,35$$

$$km = 1$$

$$f = 0,257 \cdot 1,35 \cdot 1 = 0,33$$

$$fi = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,33 - 0,018 = 0,51$$

$$kt = 1,66 - 1,1 \left( \frac{940}{400} - 2 \right)^{0,7} = 1,13$$

$$k\varepsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0,43(1 + 6,3(0,5 - 0,4)^2) = 1,4$$

$$ku = 1,03 + 0,1(\ln u - 2,3) = 1,03 + 0,1(\ln 15,5 - 2,3) = 1,07$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 1,13 \cdot 1,07 \cdot 1,4 = 136,2 \text{ Н / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1,15\sigma_T(1 + 0,48fn \cdot l_d / h_{cc}) = 1,15 \cdot 136,2(1 + 0,48 \cdot 0,51 \cdot 4,03) = 311 \text{ Н / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 6 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 311 \cdot 0,03865 \cdot 1,1 = 13,2 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 38,65 / 310 = 0,125$$

$$f / \alpha = 0,33 / 0,125 = 2,64$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 2,64)(4,03)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{2,64} \right)} = 0,48$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0,48 \cdot 0,03865 \cdot 13,2 = 0,245 \text{ МН}$$

Момент тертя в шийках валків  $d_{ш} = 396 \text{ мм}$

$$M_{mp1} = P \cdot f_{nod} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 13,2 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{620}{1240} \right) = 0,0078 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,05(2M + M_{mp1}) = 0,05(0,49 + 0,0078) = 0,025 \text{ МНм}$$

$$M_{np} = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0,49 + 0,025 + 0,0078 = 0,5228 \text{ МНм}$$

$$M_{дв} = M_{np} / i \quad i = 4,67$$

$$M_{дв} = 0,5228 / 4,67 = 0,112 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N \delta \delta \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 1,5 \cdot 4,67 / 3,14 \cdot 0,62 = 216 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{5000 \cdot 0,95}{216 \cdot 10^2} = 0,214 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$kn = \frac{M_{дв}}{M_H} = 0,112 / 0,214 = 0,52$$

Перевантаження в межах допуску

$$N \delta \delta = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0,5228 \cdot 1,5 / 0,31 = 1214 \text{ кВт}$$

**Кліть 7**

$$\Delta h = 3,21 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = \sqrt{310 \cdot 3,21} = 31,55 \text{ мм}$$



$$hcc = \frac{H+h}{2} = \frac{8,18+4,97}{2} = 5,58 \text{ мм}$$

$$l_d / hcc = 31,55 / 5,58 = 5,65$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{hcc + 0,5\Delta h} = \frac{3,21}{5,58 + 1,605} = 0,44$$

$$u = \frac{2720 \cdot 0,44}{31,55} = 37,9 \text{ с}^{-1}$$

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{t^\circ}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{925}{400} - 2 \right)^2 = 0,24$$

$$kv = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 2,72)^2 = 1,195$$

$$km = 1$$

$$f = 0,24 \cdot 1,195 \cdot 1 = 0,27$$

$$fi = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,27 - 0,018 = 0,41$$

$$kt = 1,66 - 1,1 \left( \frac{925}{400} - 2 \right)^{0,7} = 1,17$$

$$k\varepsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0,43(1 + 6,3(0,5 - 0,44)^2) = 1,44$$

$$ku = 1,03 + 0,1(\ln u - 2,3) = 1,03 + 0,1(\ln 37,9 - 2,3) = 1,16$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 1,17 \cdot 1,44 \cdot 1,16 = 157,2 \text{ Н / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1,15\sigma_T(1 + 0,48fn \cdot l_d / hcc) = 1,15 \cdot 157,2(1 + 0,48 \cdot 0,41 \cdot 5,65) = 381,8 \text{ Н / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 7 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 381,8 \cdot 0,03155 \cdot 1,1 = 13,25 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 31,55 / 310 = 0,101$$

$$f / \alpha = 0,27 / 0,101 = 2,67$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 2,67)(5,65)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{2,67} \right)} = 0,47$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0,48 \cdot 0,031 \cdot 13,52 = 0,2 \text{ МН}$$

Момент тертя в шийках валків  $d_{ш} = 396$  мм

$$M_{mp1} = P \cdot f_{нод} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 13,52 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{620}{1240} \right) = 0,0078 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,05(2M + M_{mp1}) = 0,05(0,38 + 0,0078) = 0,019 \text{ МНН}$$

$$M_{np} = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0,38 + 0,019 + 0,0078 = 0,41 \text{ МНм}$$

$$M_{дв} = M_{np} / i \quad i = 2,75$$

$$M_{дв} = 0,41 / 2,75 = 0,15 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\delta\delta \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 2,72 \cdot 2,75 / 3,14 \cdot 0,62 = 230 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{5000 \cdot 0,95}{230 \cdot 10^2} = 0,2 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$k_n = \frac{M_{дв}}{M_H} = 0,15 / 0,2 = 0,75$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\delta\delta = 960 \cdot M \cdot R = 960 \cdot 0,41 \cdot 2,72 / 0,31 = 3454 \text{ кВт}$$

**8 кліть**

$$\Delta h = 1,84 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{310 \cdot 1,84} = 23,8 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{4,97 + 3,13}{2} = 3,05 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 23,8 / 3,05 = 7,8$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{1,84}{3,05 + 0,92} = 0,46$$

$$u = \frac{5100 \cdot 0,46}{23,8} = 98,6 \text{ с}^{-1}$$

$$f_0 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{t^\circ}{400} - 2 \right)^2 = 0.27 - 0.1 \left( \frac{897}{400} - 2 \right)^2 = 0.264$$

$$kv = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot 5.1)^2 = 0.96$$

$$km = 1$$

$$f = 0.264 \cdot 0.96 \cdot 1 = 0.24$$

$$fi = 1.6 \cdot f - 0.018 = 1.6 \cdot 0.24 - 0.018 = 0.366$$

$$kt = 1.66 - 1.1 \left( \frac{897}{400} - 2 \right)^{0.7} = 1.25$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0.43(1 + 6.3(0.5 - 0.46)^2) = 1.42$$

$$ku = 1.03 + 0.1(\ln u - 2.3) = 1.03 + 0.1(\ln 98.6 - 2.3) = 1.26$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80.46 \cdot 1.25 \cdot 1.42 \cdot 1.26 = 179.9 \text{ H / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1.15 \sigma_T (1 + 0.48 fn \cdot l_d \cdot / hcc) = 1.15 \cdot 179.9 (1 + 0.48 \cdot 0.366 \cdot 7.8) = 490 \text{ H / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 8 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 490 \cdot 0.0238 \cdot 1.1 = 12.8 \text{ MH}$$

$$\psi = \left( 0.498 + 0.007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{-\left( 0.0145 + \frac{0.097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 23.8 / 310 = 0.076$$

$$f / \alpha = 0.24 / 0.076 = 3.16$$

$$\psi = (0.498 + 0.007 \cdot 3.16)(7.8)^{-\left( 0.0145 + \frac{0.097}{3.16} \right)} = 0.474$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0.474 \cdot 0.0238 \cdot 12.8 = 0.144 \text{ MH}$$

Момент тертя в шийках валків  $d_{ш} = 396 \text{ мм}$

$$M_{mp1} = P \cdot f_{нод} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 12.8 \cdot 0.003 \cdot 0.396 \left( \frac{620}{1240} \right) = 0.0075 \text{ MHм}$$

$$M_{mp2} = 0.05(2M + M_{mp1}) = 0.05(0.288 + 0.0075) = 0.0148 \text{ MHм}$$

$$Mnp = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0.288 + 0.0148 + 0.0078 = 0.311 \text{ MHм}$$

$$M\delta\epsilon = Mnp / i \quad i = 2$$

$$M_{\partial\partial} = 0,311/2 = 0,155 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\partial\partial \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 5,1 \cdot 2 / 3,14 \cdot 0,62 = 314 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{5000 \cdot 0,95}{314 \cdot 10^2} = 0,147 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$k_n = \frac{M_{\partial\partial}}{M_H} = 0,155 / 0,147 = 1,05$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\partial\partial = 960 \cdot M \cdot R = 960 \cdot 0,311 \cdot 5,1 / 0,31 = 4912 \text{ кВт}$$

## Кліть 9

$$\Delta h = 1,19 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{310 \cdot 0,69} = 14,6 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{3,13 + 1,94}{2} = 1,785 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 14,6 / 1,785 = 8,18$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{1,19}{1,785 + 0,345} = 0,32$$

$$u = \frac{7660 \cdot 0,32}{14,6} = 167,8 \text{ с}^{-1}$$

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{t^\circ}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{870}{400} - 2 \right)^2 = 0,266$$

$$k_v = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 7,66)^2 = 0,805$$

$$k_m = 1$$

$$f = 0,266 \cdot 0,805 \cdot 1 = 0,203$$

$$f_i = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,203 - 0,018 = 0,307$$

$$k_t = 1,66 - 1,1 \left( \frac{870}{400} - 2 \right)^{0,7} = 1,33$$

$$ku = 1,03 + 0,1(\ln u - 2,3) = 1,03 + 0,1(\ln 167,8 - 2,3) = 1,31$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 1,33 \cdot 1,52 \cdot 1,31 = 213 \text{ H / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1,15\sigma_T(1 + 0,48fn \cdot l_d / hcc) = 1,15 \cdot 213(1 + 0,48 \cdot 0,307 \cdot 8,18) = 540 \text{ H / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 9 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 540 \cdot 0,0146 \cdot 1,1 = 8,67 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 14,6 / 310 = 0,047$$

$$f / \alpha = 0,203 / 0,047 = 4,32$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 4,32)(8,18)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{4,32} \right)} = 0,488$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0,488 \cdot 0,0146 \cdot 8,67 = 0,062 \text{ МН}$$

Момент тертя в шийках валків  $d_{ш} = 396 \text{ мм}$

$$M_{mp1} = P \cdot f_{нод} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 8,67 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{620}{1240} \right) = 0,0051 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,05(2M + M_{mp1}) = 0,05(0,124 + 0,0051) = 0,0064 \text{ МНм}$$

$$M_{np} = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0,124 + 0,0051 + 0,0064 = 0,135 \text{ МНм}$$

$$M_{\delta v} = M_{np} / i \quad i = 1,56$$

$$M_{\delta v} = 0,135 / 1,56 = 0,0865 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\delta\delta \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 7,66 \cdot 1,56 / 3,14 \cdot 0,62 = 368 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{5000 \cdot 0,95}{368 \cdot 10^2} = 0,125 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$kn = \frac{M_{\delta v}}{M_H} = 0,0865 / 0,125 = 0,7$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\delta\delta = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0,135 \cdot 7,66 / 0,31 = 3202 \text{ кВт}$$

**Кліть 10**

$$\Delta h = 0,44 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{310 \cdot 0,24} = 8,63 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H+h}{2} = \frac{1,94+1,5}{2} = 1,32 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 8,63 / 1,32 = 6,54$$

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{0,44}{1,44} = 0,17$$

$$u = \frac{9000 \cdot 0,17}{8,63} = 177,3 \text{ с}^{-1}$$

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{850}{400} - 2 \right)^2 = 0,27$$

$$kv = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 9)^2 = 0,768$$

$$km = 1$$

$$f = 0,27 \cdot 0,768 \cdot 1 = 0,197$$

$$fi = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,197 - 0,018 = 0,297$$

$$kt = 1,66 - 1,1 \left( \frac{850}{400} - 2 \right)^{0,7} = 1,4$$

$$k\varepsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0,43(1 + 6,3(0,5 - 0,17)^2) = 1,135$$

$$ku = 1,03 + 0,1(\ln u - 2,3) = 1,03 + 0,1(\ln 177,3 - 2,3) = 1,32$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80,46 \cdot 1,4 \cdot 1,135 \cdot 1,32 = 168,8 \text{ Н / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1,15\sigma_T(1 + 0,48fn \cdot l_d / h_{cc}) = 1,15 \cdot 168,8(1 + 0,48 \cdot 0,297 \cdot 6,54) = 375,1 \text{ Н / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 10 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 375,1 \cdot 0,00863 \cdot 1,1 = 3,56 \text{ МН}$$

$$\psi = \left( 0,498 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{h_{cc}} \right)^{\left( 0,0145 + \frac{0,097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 8,63 / 310 = 0,028$$

$$f / \alpha = 0.197 / 0.028 = 7,03$$

$$\psi = (0,498 + 0,007 \cdot 7,03)(6,54)^{\left(0,0145 + \frac{0,097}{7,03}\right)} = 0,518$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0,518 \cdot 0,00863 \cdot 3,56 = 0,016 \text{ МН}$$

Момент тертя в шийках валків  $d_{ш} = 396 \text{ мм}$

$$M_{mp1} = P \cdot f_{нод} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 3,56 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{620}{1240} \right) = 0,0021 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,05(2M + M_{mp1}) = 0,05(0,032 + 0,0021) = 0,053 \text{ МНН}$$

$$M_{np} = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0,032 + 0,0021 + 0,053 = 0,087 \text{ МНм}$$

$$M_{\partial\partial} = M_{np} / i \quad i = 1,41$$

$$M_{\partial\partial} = 0,087 / 1,41 = 0,062 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\partial\partial \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 9 \cdot 1,41 / 3,14 \cdot 0,62 = 391 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{5000 \cdot 0,95}{391 \cdot 10^2} = 0,118 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$k_n = \frac{M_{\partial\partial}}{M_H} = 0,062 / 0,118 = 0,525$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\partial\partial = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0,087 \cdot 9 / 0,31 = 2425 \text{ кВт}$$

Таблиця 3.3 – Геометричні і енергосилові параметри прокатки штаб 2.7×1050 Ст. 70Г до модернізації

№ кліті	ld,мм	ld/h <sub>ср</sub> , мм	σ <sub>т</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	f	ρ <sub>ср</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	Р, МН	ψ	М <sub>пр</sub> , МНм	N, кВт
ДУО	106,5	0,772	52,58	0,367	62,5	7,99	0,476	1,92	2414
1	139,5	1,22	72,9	0,305	106,9	16,4	0,494	2,532	5430
2	121,3	1,61	73,9	0,291	102,32	13,65	0,478	1,77	4615
3	85,27	1,9	70,6	0,276	112,3	10,53	0,467	0,937	4932
4	59,9	2,295	101,8	0,266	170	11,03	0,471	0,703	5033
5	49,8	3,11	118,95	0,346	245	13,4	0,467	0,6625	1846,4
6	38,65	4,05	136,2	0,33	311	13,2	0,48	0,5228	1214
7	31,55	5,65	157,2	0,27	381,8	13,25	0,47	0,41	3454
8	23,8	7,8	179,9	0,24	490	12,8	0,474	0,311	4912
9	14,6	8,18	213	0,203	540	8,67	0,488	0,135	3202
10	8,63	6,54	168,8	0,197	375,1	3,56	0,498	0,087	2425

### 3.2 Розрахунок кінематичних і енергосилових параметрів прокатування після оптимізації одержання штаби з розмірами 2.7×1050 Ст. 70Г на стані ШСГП 1680

Після нагріву штаби на проміжному рольгангу перед входом у чистову групи клітей, температура розкату збільшується на 40-60 °С. Приблизно температура при в ході в чистову групу клітей буде дорівнювати t=1020 °С. 1-2 кліть твердість поверхні робочих валків 40HSD.

#### Чистова група клітей

В 5й кліті ε=40%

$$\Delta h_5 = \varepsilon \cdot h_{np} = 0,4 \cdot 20 = 8 \text{ мм}$$



В 10-й клітї  $\varepsilon=15\%$

$$\Delta h_{10} = h_{\kappa} \left( \frac{1}{1-\varepsilon} - 1 \right) = 1,2 \left( \frac{1}{1-0,15} - 1 \right) = 0,212 \text{ мм}$$

$$\Delta h_{\Sigma} = h_{np} - h_{\kappa} - \Delta h_5 - \Delta h_{10} = 20 - 1,2 - 8 - 0,212 = 10,58 \text{ мм}$$

$$\text{Тоді } \Delta h_i / \Delta h_{\Sigma} = 0,085 + 0,089(9 - ni)^{1,3}$$

$$\Delta h_6 / \Delta h_{\Sigma} = 0,085 + 0,089(9 - 6)^{1,3} = 0,456$$

$$\Delta h_7 / \Delta h_{\Sigma} = 0,085 + 0,089(9 - 7)^{1,3} = 0,304$$

$$\Delta h_8 / \Delta h_{\Sigma} = 0,085 + 0,089(9 - 8)^{1,3} = 0,174$$

$$\Delta h_9 / \Delta h_{\Sigma} = 0,085 + 0,089(9 - 9)^{1,3} = 0,085$$

$$\Delta h_6 = 10,58 \cdot 0,456 = 4,82 \text{ мм}$$

$$\Delta h_7 = 10,58 \cdot 0,304 = 3,21 \text{ мм}$$

$$\Delta h_8 = 10,58 \cdot 0,174 = 1,84 \text{ мм}$$

$$\Delta h_9 = 10,58 \cdot 0,085 = 0,69 \text{ мм}$$

Розрахунки втрат температури.

$t_5$  на вході в 5-ту кліть

$$t_5 = 1116 - \Delta t_4 - \Delta t_{np} = 1116 - 20,5 - 30 = 1065,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Температуру в клітях чистової групи знаходимо по формулі

$$t_i = t_{нк} - \left( \frac{t_{нк} - t_{\kappa}}{\frac{h_{нк}}{h_{\kappa}} - 1} \right) \left( \frac{h_{нк}}{h_i} - 1 \right)$$

$$t_6 = 1065,5 - \left( \frac{1065,5 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{7,18} - 1 \right) = 1040^\circ\text{C}$$

$$t_7 = 1065,5 - \left( \frac{1065,5 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{3,97} - 1 \right) = 1010^\circ\text{C}$$

$$t_8 = 1065,5 - \left( \frac{1065,5 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{2,13} - 1 \right) = 950^\circ\text{C}$$

$$t_9 = 1065,5 - \left( \frac{1065,5 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{1,44} - 1 \right) = 888^\circ\text{C}$$

$$t_{10} = 1065,5 - \left( \frac{1065,5 - 850}{\frac{20}{1,2} - 1} \right) \left( \frac{20}{1,2} - 1 \right) = 873^\circ\text{C}$$

### *Розрахунок енергосилових параметрів прокатування*

#### **5 кліть**

$$\Delta h = 7 \text{ мм}$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{310 \cdot 8} = 49,8 \text{ мм}$$

$$h_{cc} = \frac{H + h}{2} = \frac{20 + 13}{2} = 16 \text{ мм}$$

$$l_d / h_{cc} = 49,8 / 16 = 3,11$$

Таблиця 3.4 – Режим деформації штаби 2.7×1050 Ст. 70Г

№ кліті	H мм	h мм	Δh мм.	V м/с	t°c
ДУО	150	125	25	0,99	1220
1	125	93,6	31,4	1,05	1100
2	93,6	57,26	36,34	1,1	1095
3	57,26	32,19	25,07	1,6	1090
4	32,19	20	12,19	2,2	1076
5	20	13	7	0,9	1065,5
6	13	8,18	4,82	1,5	1040
7	8,18	4,97	3,21	2,72	1010
8	4,97	4,13	1,84	5,1	950
9	4,13	3,54	1,19	7,66	888
10	3,54	2,7	0,44	9	873

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{cc} + 0,5\Delta h} = \frac{7}{16 + 4} = 0,4$$

$$u = \frac{900 \cdot 0,4}{49,8} = 7,22c^{-1}$$

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \left( \frac{951}{400} - 2 \right)^2 = 0,255$$

$$k_v = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 0,9)^2 = 1,43$$

$$k_m = 1$$

$$f = 0,255 \cdot 1,43 \cdot 1 = 0,31$$

$$f_i = 1,6 \cdot f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,346 - 0,018 = 0,53$$

$$kt = 1.66 - 1.1 \left( \frac{951}{400} - 2 \right)^{0.7} = 1.1$$

$$k\varepsilon = 1 + 0.43(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2) = 1 + 0.43(1 + 6.3(0.5 - 0.4)^2) = 1.4$$

$$ku = 0.38 + 0.065(7 + \ln u) = 0.38 + 0.065(7 + \ln 7.22) = 0.96$$

$$\sigma_T = \sigma_{T\delta} \cdot kt \cdot k\varepsilon \cdot ku = 80.46 \cdot 1.1 \cdot 0.96 \cdot 1.4 = 90.18 \text{ H / мм}^2$$

$$p_{cp} = 1.15\sigma_T(1 + 0.48fn \cdot l_d \cdot / hcc) = 1.15 \cdot 118.95(1 + 0.48 \cdot 0.53 \cdot 3.11) = 177.7 \text{ H / мм}^2$$

Зусилля прокатки в 5 кліті

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B = 245 \cdot 0.0498 \cdot 1.1 = 9.65 \text{ MH}$$

$$\psi = \left( 0.498 + 0.007 \frac{f}{\alpha} \right) \left( \frac{l_d}{hcc} \right)^{\left( 0.0145 + \frac{0.097}{\alpha} \right)}$$

$$\alpha = l_d / R = 49.8 / 310 = 0.16$$

$$f / \alpha = 0.2551 / 0.16 = 1.59$$

$$\psi = (0.498 + 0.007 \cdot 1.59)(3.11)^{\left( 0.0145 + \frac{0.097}{1.59} \right)} = 0.475$$

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P = 0.467 \cdot 0.0498 \cdot 13.4 = 0.312 \text{ MH}$$

Момент тертя в шейках валків  $d_{ш} = 396 \text{ мм}$

$$M_{mp1} = P \cdot f_{нод} \cdot du \left( \frac{Dp}{Doo} \right)$$

$$M_{mp1} = 13,4 \cdot 0,003 \cdot 0,396 \left( \frac{620}{1240} \right) = 0,007 \text{ МНм}$$

$$M_{mp2} = 0,05(2M + M_{mp1}) = 0,05(0,624 + 0,007) = 0,0315 \text{ МНм}$$

$$M_{np} = 2M + M_{mp1} + M_{mp2} = 0,624 + 0,0315 + 0,007 = 0,489 \text{ МНм}$$

$$M_{дв} = M_{np} / i \quad i = 7,24$$

$$M_{дв} = 0,6625 / 7,24 = 0,092 \text{ МНм}$$

$$M_H = 0,975 \frac{N\delta\delta \cdot \eta}{n \cdot 10^2}$$

$$n = 60 \cdot v \cdot i / \pi \cdot D = 60 \cdot 0,9 \cdot 7,24 / 3,14 \cdot 0,62 = 200 \text{ об / мин}$$

$$M_H = 0,975 \frac{5000 \cdot 0,95}{200 \cdot 10^2} = 0,231 \text{ МНм}$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$k_n = \frac{M_{дв}}{M_H} = 0,092 / 0,231 = 0,39$$

Перевантаження в межах допуску

$$N\delta\delta = 960 \cdot M \cdot v / R = 960 \cdot 0,6625 \cdot 0,9 / 0,31 = 1363 \text{ кВт}$$

Розрахунок наступних клітей робимо аналогічно розрахунку енергосилових параметрів прокатування в 5 кліті. Всі результати заносимо в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Геометричні і енергосилові параметри прокатки штаб 2,7×1050 Ст. 70Г після встановлення теплозахисних екранів на проміжному рольгангу

№ кліті	ld,мм	ld/h <sub>ср</sub> , мм	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$f$	$\rho_{ср}$ , Н/мм <sup>2</sup>	P, МН	$\psi$	M <sub>пр</sub> , МНм	N, кВт
Чорнова група клітей									
1	139,5	1,22	57,5	0,26	81,2	12,5	0,494	1,927	4133
2	121,3	1,61	59,2	0,25	88,02	11,75	0,471	1,501	3914
3	85,27	1,9	90	0,229	135,6	12,71	0,46	1,113	5858
4	59,9	2,295	90,5	0,222	142,7	9,4	0,46	0,583	4158
Чистова група клітей									
5	49,8	3,11	90,18	0,31	177,7	9,65	0,475	0,489	1363
6	38,65	4,05	107,3	0,3	233,7	9,93	0,476	0,39	1812
7	31,55	5,65	127,7	0,272	314	10,9	0,473	0,347	2933
8	23,8	7,8	159,2	0,237	430	11,3	0,473	0,273	4311
9	14,6	8,18	203	0,202	513	8,25	0,488	0,1289	1968
10	8,63	6,54	159	0,195	351	3,33	0,517	0,0335	641

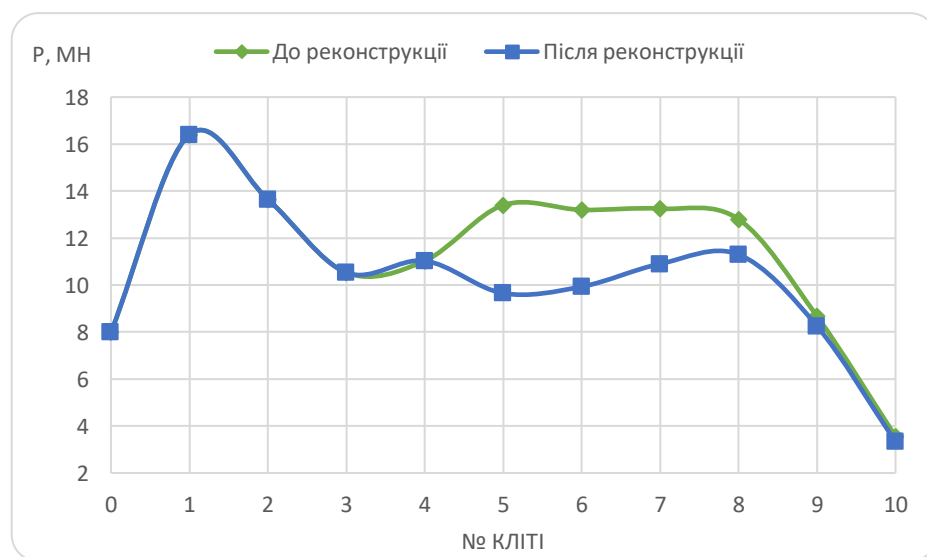


Рисунок 3.1 – Графік розподілу зусилля прокатування по клітях

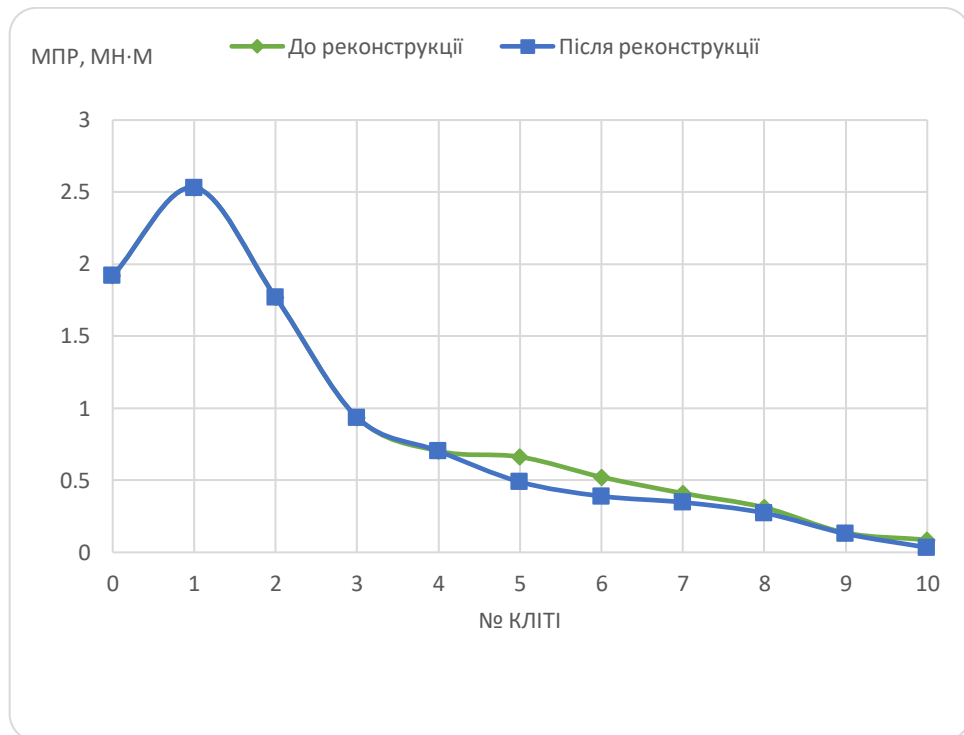


Рисунок 3.2 – Графік розподілу моменту прокатування по клітях

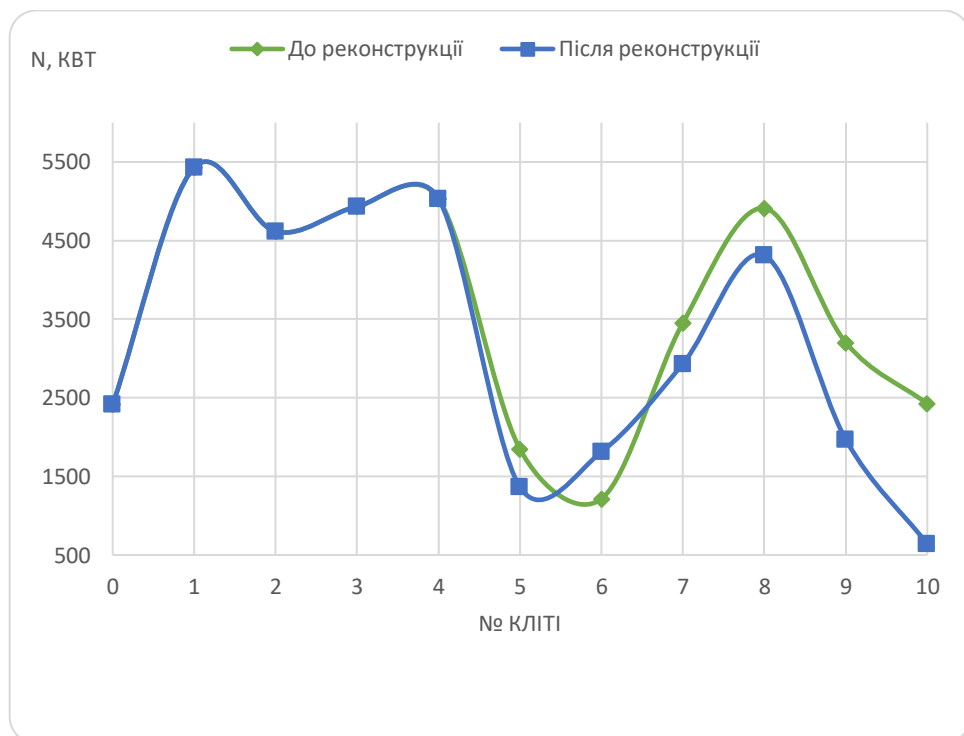


Рисунок 3.3 – Графік розподілу потужності двигуна при прокатування по клітях

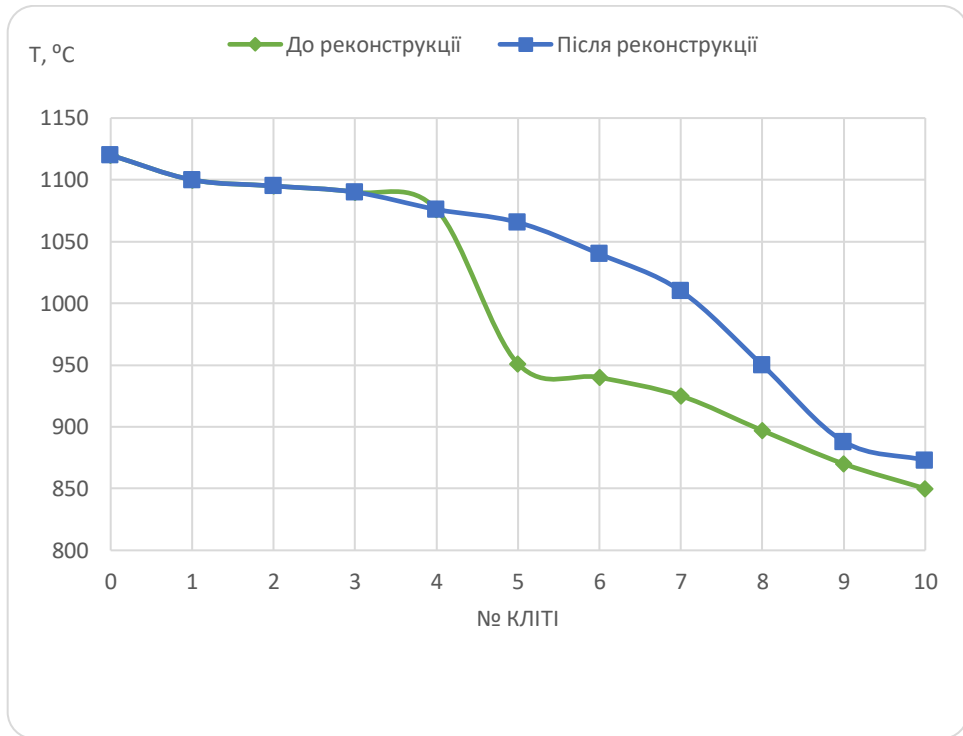


Рисунок 3.4 – Графік розподілу температури штаби при прокатуванні по клітях

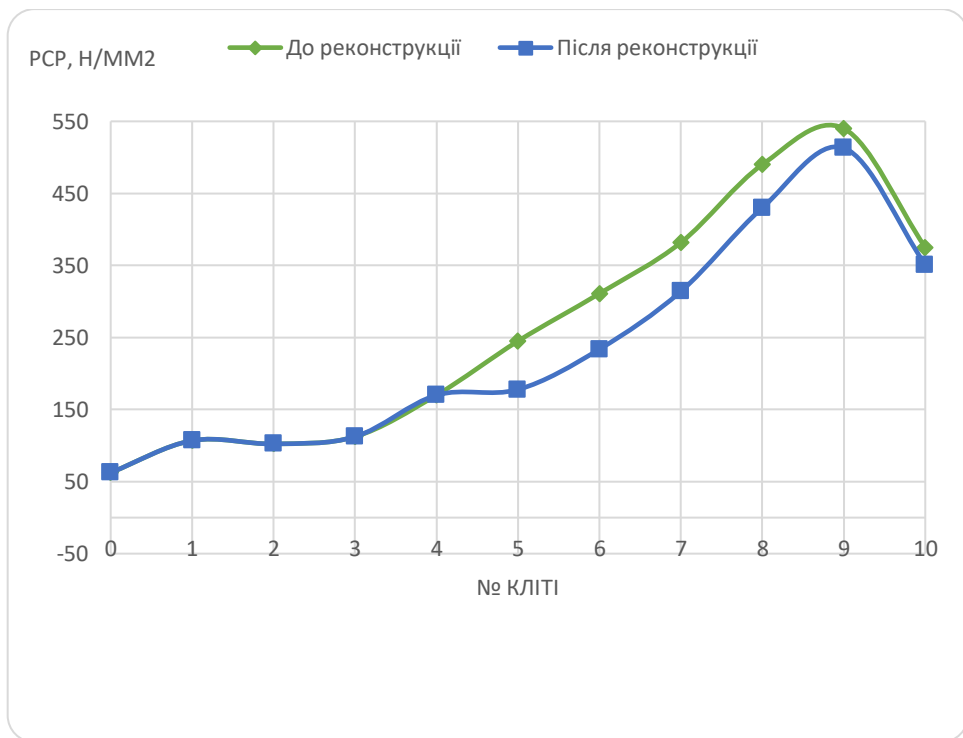


Рисунок 3.5 – Графік розподілу середнього контактного тиску при прокатуванні по клітях



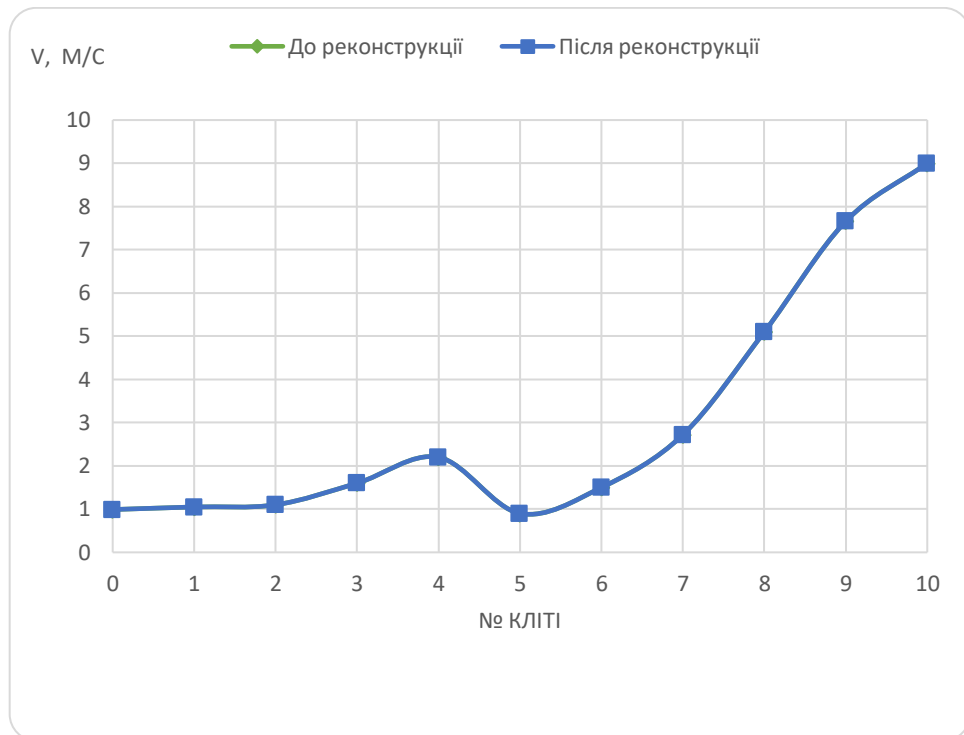


Рисунок 3.6 – Графік розподілу швидкості при прокатуванні по клітях

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Характеристика потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища

Цех гарячої прокатки металу в своєму складі має ділянки з різними шкідливими умовами праці. Однією з основних ділянок цеху є стан гарячої прокатки, на якому проводять гарячу обробку металу тиском.

Технологічний процес на НШСГП 1680 механізований і автоматизований, операції з металом здійснюються без безпосередньої участі обслуговуючого персоналу.

На виробництві застосовують наступні технічні засоби забезпечення безпеки праці: захисні пристрої, що створюють перешкоду між людиною і небезпечним чинником, надійно оберігають працівника незалежно від правильності або не правильності його дій; запобіжні пристрої на випадок аварійних режимів – відключення устаткування при порушенні контрольованого параметра (температури, тиск, переміщення, величини струму або напруги, зусилля); гальмівні пристрої для швидкої зупинки рухомих частин механізму в певному стані; сигналізація перед наступаючою або такою, що наступила небезпекою (світлова, звукова, кольорова і знакова). Велике значення має правильний розподіл функції між людиною і машиною для зменшення тяжкості праці.

Основними шкідниками і небезпекою в цеху є: шум, вібрація, надлишкові теплові виділення на ділянках нагрівальних колодязів, робочої кліті стана, ножиців, рольгангів; запиленість і загазованість на деяких робочих ділянках; електронебезпечність; імовірність падіння вантажів із кранів [33].

Ступінь небезпеки виробничого процесу при гарячій прокатці значно вище, ніж при холодній, що пояснюється високою температурою прокатуємого металу. При експлуатації прокатного стана існують такі

небезпечні зони: зона біля валків, біля обертових шпинделів і з'єднання муфт. Характерна небезпека, з якою зв'язана робота прокатного стана - відлітання окалини й часток металу. Ділянками робіт із професійними шкідниками є також ділянки підвищеної загазованості та запиленості. Це ділянки нагрівальних печей, листопривильних машин, зачищення листів [34].

Додатковими небезпечними факторами при гарячій прокатці є температурний режим нагрівання, режим прокатки, швидкість його охолодження при деформації й т.д. При різанні металу на ножицях небезпечними є локальні зони що рухаються й обертаються частин механізму. Значно підвищує фактор безпеки процесу використання в потоці машин вогневого зачищення металу. При вогневому зачищенні можливий вибух газів. Інші технологічні операції (охолодження, таврування, складування металу) особливого впливу на рівень безпеки технологічного процесу не роблять. Наведена вище характеристика основних шкідників і небезпек змушує звернути увагу на проведення наступних заходів щодо оздоровлення умов праці:

- автоматизація технологічного процесу;
- обдування робочих місць за рахунок подачі охолодженого повітря;
- механізація трудомістких робіт;
- заземлення всіх металевих частин електроустаткування;
- застосування звукопоглинаючого облицювання;
- застосування захисних кожухів і екранів.

Інструкція з охорони праці для робітників механослужби ЦГПТЛ №05.04.99, є документом, що встановлює вимоги безпеки при виконанні робітниками та службовцями покладених на них обов'язків, а також безпечного поведіння на робочих місцях і території цеху [33].

У таблиці 4.1 наведена оцінка факторів виробничого і трудового процесу.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого і трудового процесу

Фактори	Нормативне значення, ГДУ, ГДР	Фактичне значення	3 класи небезпечних умов., і характер праці			Час дії фактора, % за зміну
			1 ст	2 ст	3ст	
<i>1. Шкідливі хімічні речовини, мг/м<sup>3</sup></i>						
<i>1 клас небезпеки</i>						
Ангідрид хромовий	0,01	0,02	2 р.			83,1
<i>2 клас небезпеки</i>						
Марганцю оксиди	0,3	0,56	1,87р			83,1
<i>3-4 клас небезпеки</i>						
Масла мінеральні	5	6,5	1,3р			83,1
Азоту діоксид	2	4	2 р.			83,1
Ангідрид сірчистий	10	13,5	1,35р			83,1
Вуглецю оксид	20	9,2				83,1
<i>2. Пил фібро генної дії, мг/м<sup>3</sup></i>						
Вміст кремнію діоксид 2,5%	4	26,4			6,6р	83,1
<i>3. Шум, дБА</i>						
	80	93		13		100
<i>4. Мікроклімат у приміщенні</i>						
температура (тепл. період) повітря, °С	18 - 27	40,5			13,5	83,1
швидкість руху повітря, м/сек	0,2 - 0,4	0,27				83,1
відносна вологість повітря, %	40 – 60	46				83,1
інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	140	654		654		79,8
<i>5. Робоча поза</i>						
Нахил корпусу в просторі, обумовлений технологічним процесом	перебування в похилому положенні понад					
	28,10%	30%				
<i>5. Категорія робіт</i>		Середньої тяжкості (2а)				

Висновок: Характер праці ставляться до III класу 3 ступені. Робочі місця мають у наявності: 2 фактора 3 ступені, 5 факторів 1 ступеня, 1 фактор 2 ступені шкідливих і небезпечних умов праці. По показниках робоче місце варто вважати з особливо шкідливими і особливо важкими умовами праці.

## 4.2 Заходи з поліпшення умов праці

Для усунення осідання пилу в приміщенні прокатного цеху, зменшуючи її кількість у повітрі, все устаткування закрите (витяжна вентиляція), з'єднаними за допомогою воздуховодів із пристроями для очищення повітря, що видаляється.

Також у прольоті металургійної ділянки використовують природну вентиляцію повітря. У такому виді вентиляції повітря надходить і видаляється через щілини вікна, двері, ворота, ліхтарі.

Опалення побутових приміщень прокатного цеху здійснюється за допомогою панелей (батарей) у які як теплоносії використовують пару. Опалення побутових приміщень здійснюється від цеху тепlopостачання [34].

Ефективним засобом забезпечення необхідних гігієнічних якостей повітря, що сприяють нормальній роботі, і відповідають вимогам СНіП 2-33-75 передбачена вентиляція деяких робочих місць. Норми мікроклімату на постійних робочих місцях зазначені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Нормовані величини температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Категорія робіт	Температура повітря в приміщенні, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Середньої важкості (2а)	18 - 27	40 - 60	0,2 - 0,4

Характеристика приміщення металургійної ділянки ЦГПТЛ:

- характер робіт.....середня точність
- розмір об'єкта розпізнавання, мм.....від 0,5 до
- розряд зорової роботи.....IV
- підрозділ роботи.....В
- контрастність об'єкта розпізнавання.....середня
- $E_H$  - штучна, лк..... 300

Для ремонту устаткування прокатного цеху ЦГПТЛ передбачене штучне освітлення.

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення» для приміщень, у яких проводяться роботи 6 розряду, тобто спостереження за ходом виробничого процесу, передбачається комбіноване освітлення.

Природне освітлення нормується. Основним показником нормування служить коефіцієнт природної освітленості (КПО).

Місто Запоріжжя перебуває в 4 поясі світлового клімату, тому КПО для нього буде обчислюватися по формулі:

$$\begin{aligned} \text{КПО}_{ln}^4 &= \text{КПО}_{ln}^3 \cdot m \cdot e; \\ \text{КПО}_{ln}^4 &= 1,8 \cdot 0,9 \cdot 0,85 = 1,38\% \end{aligned} \quad (4.1)$$

де  $\text{КПО}_{ln}^3$  – значення КПО для 3 пояси світлового клімату;

$m$  – коефіцієнт світлового клімату;

$e$  – коефіцієнт сонячності клімату.

Освітленість повинна бути забезпечена не менш 75% максимуму, що досягається застосуванням комбінованого освітлення.

Для попередження попадання пилу і шкідливих хімічних речовин в організм операторів чистової групи необхідно користуватися засобами захисту органів дихання – респіраторами.

Для захисту органів зору від механічних травм, хімічних і термічних опіків і пошкоджень променистою енергією робочі стану користуються запобіжними окулярами або щитками.

Механічних травм очей завдаються частинками окалини, осколками металу. Для захисту очей працівників стану застосовують окуляри захисні відкритого і закритого типів.

Для захисту працівників стану від різкої або тривалої дії шуму застосовують противошуми: навушники, шоломи, заглушки, що забезпечують ослаблення шуму до рівня, що не перевищує допустимий.

Застосування засобів захисту слуху перешкоджає розвитку професійної глухоти.

### 4.3 Електробезпека

Електроустаткування ділянки, якої ставиться до установок до 1000В (електричний привод, електроустаткування під'ємно-транспортних конструкцій, зварювальні апарати). Умови безпечної експлуатації залежать значною мірою від захищених пристроїв.

Всі струмоведучі частини ізолювані. Як захисна ізоляція застосовують теплостійкі лаки, чи електроізолюючі плівки, емалеві й олійні фарби.

Покриття повинні швидко сохнути, добре зв'язуватися з поверхнею, щоб утворювати на ній струмонепровідну плівку, вологонепроникну, механічно міцну плівку.

Як індивідуальний захист працівників від поразки електричним струмом передбачається забезпечення працівників захисними засобами:

- інструментом, що ізолює оперативні й вимірювальні штанги;
- гумовими діелектричними ботами, брезентовими рукавицями;
- додатковими засобами (ковриками, ковпаками);
- окулярами.

Для захисту від короткого замикання використовують швидкодіючий релейний захист і вимикачі, плавкі запобіжники. У цеху використають трифазну 4х-лінійну мережу.

Приєднання корпусів і інших конструктивних металевих часток електроустаткування до заземлюючого нульового дроту називається захисним зануленням. Мета захисного занулення – перетворити пробій на корпус в коротке замикання між фазним і нульовим дротами, викликати тим самим протікання більшого струму через захист і швидко відключити пошкоджене устаткування від мережі.

Пристрій, що автоматично відключає електроустановку за час не більш 0,2сек. при виникненні в ній струмів великої сили, у тому числі при появі напруги на корпусі і інших металевих частках, називається захисним відключенням.

При обслуговуванні електроустановок застосовують основні і додаткові захисні засоби. До основних відносяться захисні засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу установки і при користуванні якими допускається безпосередній дотик до струмопровідних часток, що знаходяться під напругою. До додаткових відносяться засоби захисту, що підсилюють дію основних засобів і що забезпечують безпеку при напрузі дотику і кроковій напрузі. До засобів індивідуального захисту відносяться: ізолююча штанга, ізолюючі кліщі, діелектричні боти, діелектричні рукавички, що ізолюють підставки і ін. Для забезпечення безпечної, безаварійної і високопродуктивної роботи електроустановок необхідно поряд з досконалим їх оснащенням засобами захисту так організувати їх експлуатацію, щоб була виключена всяка можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу [33].

#### **4.4 Пожежна та техногенна безпека**

Ділянка має категорію пожежонебезпеці Г (не горючі речовини розпечені або розплавлені, і горючі речовини спалюються або утилізуються як паливо). Будинок металургійної ділянки прокатного цеху відноситься до 1 ступеня вогнебезпечності.

До первинних засобів пожежогасіння в цеху відносять: вогнегасники, пожежний інвентар (вогнегасники, покривало з негорючого теплоізоляційного полотна (брзент), ящики з піском, бочки з водою, пожежні цебра, совкові лопати); пожежний інвентар (багри, сокири і ін.).



В цеху застосовуються пінні вогнегасники ВП-5 і вуглекислотні вогнегасники ВВ-2, ВВ-5 і ВВ-8 і пересувні двобалонні й одно балонні ВП-2 і ВП-1.

На території комбінату забороняється:

- курити в неналежних місцях, а курити необхідно в спеціально відведених місцях;
- закривати й захаращувати фраги, проїзди, під'їзди й підходи до будинків, водопроводам і пожежним гідрантам;
- виключати окремі ділянки водогінної мережі, внутрішні пожежні крани, знижувати встановлений тиск у мережах;
- допускати до вогневих робіт осіб, що не пройшли інструктаж з пожежного безпеки;
- користуватися водою з пожежних водойм і засобами пожежогасіння не по прямому призначенню.

До заходів щодо захисту від виробничого шуму відносять:

- застосування спеціальних прокладок, що амортизують, при з'єднанні вузлів устаткування;
- застосування звукоізовльованих і звукопоглинаючих матеріалів при будівництві приміщень для операторів постів керування;
- застосування індивідуальних засобів захисту(антифони, пристрої по захисту органів слуху).

До заходів щодо захисту від вібрації передбачається:

- на ділянці зачищення металу встановити агрегати вибіркового зачищення;
- забезпечити працівників індивідуальними засобами захисту (віброрукавицями, вібровзуттям);
- для працівників кожні 1-1,5 години роботи невеликі перерви в роботі з активною гімнастикою рук.

Можливі причини виникнення аварій на об'єкті, пов'язані з відмовою (неполадками) устаткування. До основних причинах належать:

- корозія устаткування і трубопроводів;
- фізичне зношування, механічне ушкодження, руйнування або температурна деформація устаткування і трубопроводів;
- відмови або збої в роботі автоматичних систем (збої в енергопостачанні).

Корозія устаткування і трубопроводів може стати причиною часткового руйнування технологічного устаткування. Аналіз аварій на аналогічних об'єктах дозволяє зробити висновки про те, що корозійне руйнування при достатній міцності конструкцій устаткування або трубопроводів, найчастіше має локальний характер. Однак, при несвоєчасній локалізації, воно може послужити джерелом ланцюгового розвитку аварійної ситуації (витоку газу, утвору газоповітряної токсичної хмари, пожежі або вибуху газоповітряної суміші).

Фізичне зношування, механічне ушкодження, руйнування або температурна деформація устаткування й трубопроводів може привести як до часткового, так і до повного руйнування технологічного устаткування і трубопроводів.

Рівень автоматизації технологічного процесу вимагає від обслуговуючого персоналу високої кваліфікації і підвищеного уваги. Особливу небезпеку представляють помилки при пуску і зупинці устаткування, ведення ремонтних, профілактичних і інших робіт, пов'язаних з нестійкими перехідними режимами, зі спорожнюванням і заповненням устаткування небезпечними речовинами. У випадку неправильних дій персоналу існує небезпека руйнування технологічних систем і виникнення аварій.

Аналіз матеріалів розслідування аварій показує, що 66,5% вибухів, пожеж і загорянь відбувається в результаті помилок при експлуатації устаткування, з них 20% аварій - через недотримання норм технологічного регламенту.

До зовнішніх впливів природного й техногенного характеру можна віднести - стихійні лиха:

- сніжні замети, сильна ожеледь, сильна заметіль;
- дуже сильний мороз ( $- 30^{\circ}\text{C}$  и нижче);
- дуже сильна жара ( $+ 40^{\circ}\text{C}$  и більш);
- зсувні явища, осідання (провал) земної поверхні;
- сильний вітер, включаючи шквали й смерчі;
- великий гради, дуже сильний дощ, дуже сильний снігопад;
- сильне налипання (відкладання) снігу;
- грозові розряди й розряди статичної електрики;
- аварії на комунально-енергетичних мережах;
- навмисні дії (диверсія) [34].

При пожежі в електроустановках, що перебувають під напругою застосовують порошки типу СЧ. Для гасіння пожеж в прокатному цеху споруджена мережа зовнішнього й внутрішнього протипожежного водопроводу, що полягає із запасних резервуарів, насосної станції, водозабірних споруджень, трас трубопроводу, на яких через кожні 100м розміщують пожежний гідрант. Внутрішні пожежні крани для подачі води встановлені у шафках на майданчиках сходових кліток, у коридорах, обладнані пожежним рукавом довжиною 10 – 20 м, пожежним стовбуром зі сприском.

## 5 ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ

Безперервний 10-х клітьовий стан горячої прокатки "1680" металургійного комбіната "Запоріжсталь" призначений для виробництва гаряче катаних листів (штаб) з товщиною листа від 1,5 мм до 8 мм із максимальним діаметром гарячекатаного рулону 1600 мм і внутрішнім до 700 мм, проектна продуктивність стану ~3,5 млн т/рік.

Частина роботи пов'язана з організацією виробничого процесу при урахуванні насамперед обладнання намотувально-натяжних пристроїв які визначають рівень енергосилових параметрів, питому продуктивність, точність геометричних характеристик, наявність поверхневих дефектів, якість змотки рулонів.

Основна спрямованість на вирішення таких задач як: забезпечення економічного розвитку на основі раціонального використання потенціалу, відтворення місцевих ресурсів та охорони природного середовища; розв'язання міжгалузевих науково-технічних та управлінсько-організаційних проблем, підвищення технологічного та інформаційного рівня функціонування підприємства з метою виробництва конкурентоспроможної продукції, підвищення енергозбереження та підвищення рівня доходів.

У наш час у зв'язку збільшенням цін на паливо, всі підприємства, і металургійні в тому числі, або замінюють технології виробництва на менш енерговитратні, або вдосконалюють з метою зменшення витрат енергоносіїв. З теорії процесів прокатки відомо, що натяг металу поміж клітями неперервних станів суттєво впливає на величини сили, моменту і потужності прокатки.

При цьому задній натяг зменшує вище зазначені величини значно більше ніж передній.

При прокатуванні металу натяг викликає більше зменшення довжини дуги контакту, що пояснюється великим впливом пружних зон, що усуваються частково натягом, і великим зменшенням зусилля прокатки.

Отже, передній натяг у більшій мірі зменшує осередок деформації при прокатуванні більш товстої штаби з меншими обтисненнями, тоді як задній натяг сильніше зменшує дугу контакту при прокатуванні тонких і особливо тонких штаб і при великих обтисненнях.

Зусилля прокатки в усіх випадках при використанні натягу зменшується. Причому задній натяг робить більш істотний вплив через те, що зона відставання при прокатуванні більше чим зона випередження.

Таким чином вище означені зміни технологій прокатки дають можливість зменшити електровитрати і досягти покращення якості.

Одним з напрямків підвищення ефективності виробництва служить використання ресурсозберігаючих і удосконалених технологій, що дозволяють випускати продукцію з найменшими витратами.

Подальший розвиток прокатного виробництва гарячекатаних штаб нерозривно пов'язаний з необхідністю розширення сортаменту, підвищення якості та зниження собівартості готової металопродукції.

Таблиця 5.1 – Виробнича програма НСГП 1680

Річна виробнича програма прокатного стану	
Тривалість капітального ремонту	7 діб
Тривалість планового (запобіжного ремонту)	23 доби
Годинна продуктивність	427 т/год
Поточний простій	19,5 %
Номінальний час роботи устаткування	$365 - 7 - 23 = 335$ діб, або $335 \times 24 = 8040$ годин
Поточні простої до номінального часу складе	$8040 \times 19,5/100 = 1567,8$ годин.
Ефективний фактичний час роботи прокатного стану	$8040 - 1567,8 = 6472,2$ години;
Річний об'єм виробництва продукції	$427 \times 6472,2 = 2763629,4$ т;

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз режимів деформації на безперервних станах гарячої прокатки та проблеми температурно-швидкісних параметрів прокатування інструментальних сталей показав необхідність регулювання температури металу в ключових точках технологічної лінії «нагрів слябів - гаряча прокатка штаб». Це дозволить підвищити швидкість прокатки і скоротити ресурсо - і енерговитрати, та призведе до скорочення витрат виробництва сталі.

Було визначено алгоритми розрахунку швидкості прокатування, алгоритми розрахунку температури, а також режиму деформації. Встановлено дві проблеми подальшого підвищення ефективності виробництва: недостатнє використання швидкісних можливостей стану при забезпеченні високої якості прокату та високу енергоємність листопрокатного комплексу «печі - стан», відсутність теоретичного обґрунтування принципів енергозбереження, а також автоматизованих систем, що дозволяють реалізувати енергозберігаючі принципи і наукомісткі технології.

Температурний режим прокатки штаб на безперервному стані обумовлює енергосилові параметри деформації металу, витрату електроенергії на одну тонну готової продукції, точність, планшетність і механічні властивості штаб. У загальному випадку температура штаби визначається кількістю тепла, отриманою при нагріві, часом охолодження, кількістю тепла, що виділяється в прокаті під час його деформації і ін. Тепло втрачається конвекцією при зіткненні з деталями кліти (з валками), випромінюванням, а так само віддається воді.

Визначено, що теплозберігаючі установки (енкопанелі, теплоакумуючі і тепловідображаючі екрани) забезпечать зниження охолодження підкату на проміжному рольгангу ШПСГП. Також при рішенні однієї і тієї ж задачі зниження охолодження підкату на

проміжному рольгангу використання пасивних екранів практично не вимагає витрати додаткової енергії.

Встановлено, що запровадження на проміжних рольгангах ШСПП теплозберігаючих технологій технічно і економічно виправдано та оптимізує температурно-швидкісні параметри прокатки інструментальних сталей.

Запропоновані технологічні процеси виробництва дозволяють збільшити продуктивність станів і підвищити вихід і якість придатного металу. Це дозволить вітчизняним підприємствам гідно конкурувати як на зовнішніх, так і на внутрішніх ринках металопродукції.

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ТІ\_226-ОВЗ-12-2014 Прокатка полос на тонколистовому стані.
2. ТИ 226-ОБЗ-21-2011 Виробництво гарячекатаного прокату.
3. В. А. Николаев. Горячая прокатка листов и полос Учебное пособие. Часть 1. Запорожье, ЗНТУ, 2012. - 178 с
4. ТИ 226 П.ГЛ-01-2010 Нагрів слябів
5. Чижиков Ю.М. Процессы обработки давлением легированных сталей и сплавов. М.: Metallurgiya, 1965 - 168 с.
6. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali. Spravochnik. Tom II. М.: Metallurgiya, 1983-286 с.
7. *Николаев, В. А.* Формирование толщины полосы при прокатке на широкополосных станах [Текст] / В. А. Николаев, А. Ю. Путноки. – Запорожье : Дикое Поле, 2011. – 180 с. – Биб-лиогр. : с. 166-179. – ISBN 978-966-2994-67-4.
8. *Николаев, В. О.* Виробництво плоского прокату [Текст] / В. О. Николаев, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2010. – 320 с. – Бібліогр. : с. 310-317. – ISBN 978-966-8462-27-6.
9. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов - М. Metallurgiya, 1985. - 376 с.
10. Полухин П.И., Федосов Н.М. и др. Прокатное производство. М: Metallurgiya, 1982. - 696 с.
11. Данченко В. Н. Непрерывная прокатка полос [Текст]/ Штехно О. Н., Молчанов А. И; под ред. В. Н. Данченко. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – С. 7–136
12. Серета Б. П. Металознавство і термічна обробка чорних і кольорових металів. Навч. пос - Запоріжжя; Вид-во ЗДІА, 2002.-264с.
13. Термічна обробка Навчальний посібник для студентів ЗДІА (упор. Серета Б.П. - Запоріжжя; Вид-во ЗДІА, 2003.270с.



14. Нікберг І. М. Пристрій і експлуатація прокатних станів. Металургія, 1961-654с.
15. В. А. Николаев. Теория процессов прокатки (изд. 3-е, дополн.): Учеб. Пособие / Запорожье: Издательство ЗГИА, 2001. – 188 с.
16. Н. С. Спиридонов. Графоаналитический метод определения плеча полной равнодействующей. Сб. «Прокатное производство». Труды Института черной металлургии, т. X., изд. АНУССР, 1956.
17. Н. М. Кирилин. Аналитическое определения положения равнодействующей давления металла на валки. Известия высших учебных заведений, Машиностроение, 1959, №11.
18. R. B. Sims. Devy United Engineering, vol., №2, 1956. (реф. Экспресс-информация, «Прокатка и прокатное оборудование», № 114-117, 1957).
19. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: «Металлургия», 1985. 376 с.
20. В. А. Николаев. Влияние различных факторов на коэффициент плеча момента при прокатке полос.
21. Сафьян М. М., Холодный В. П. Экспериментальное определение плеча крутящего момента при холодной прокатке легированных сталей // Обработка металлов давлением, сб. тр. ДМетИ, XLVIII. – М. : Металлургия, 1962. – с. 228-236.
22. М. М. Сафьян. Экспериментально исследование плеча момента при холодной прокатке. Сборник трудов ДМетИ, вып. 39. Металлургиздат, 1960.
23. В.Л.Мазур. Некоторые пути решения проблемы теплосбережения в прокатном производстве. /Сучасні проблеми в металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ „Системні технології”, - 2005. -576с.

24. Чекмарев А. П., Клименко П. Л. Удельное давление и плечо момента прокатки // Обработка металлов давлением, сб. тр. ДМетИ, XLIX. М.: Metallurgy, 1965. – с. 210-237.
25. Экспериментальное определение коэффициента плеча момента при холодной прокатке/ М. М. Сафьян, Я. Д. Василев, Ю. Я. Кармазин и др. // Обработка металлов давлением, сб. тр. ДМетИ, LVII. – М.: Metallurgy, 1971. – с. 184-187.
26. Теория прокатки: Справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин и др. – М.: Metallurgy, 1982.-335 с.
27. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М. : Metallurgy, 1969. – 464 с.
28. Бернштейн М. Л., Капуткина Л. М., Добаткин С. В., Пахомова М. Я. Коррозионные и механические св-ва ферритно-аустенитной стали // ФХММ. 1984. №2. с. 38-42.
29. Добаткин С. В., Пахомова М. Я., Аринушкин И. Д. Структурные изменения в ферритно-аустенитной стали 03Х26Н6 при горячем кручении // Изв. Вузов. Черная металлургия. 1985. №3. с. 153-154.
30. Бернштейн М. Л., Добаткин С. В., Капуткина Л. М., Прокошкин С. Д. Процессы динамического разупрочнения в ходе горячей деформации. – В кн.: Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов. – Тула: ТПИ. 1980. с. 41-46.
31. Капуткина Л. М., Добаткин С. В., Пахомова М. Я. Влияние исходной структуры на сверхпластическую деформацию двухфазовой стали 03Х26Н6 // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их упрочнения: Материалы семинара. – М.: МДНТП, 1984. с. 32-35.
32. Оптимізація процесів обробки металів тиском. Метод. Вказівки до практичних занять та самостійної роботи / Укладачі Б. П. Середя, І. В. Кругляк, Ю. О. Белоконь. – Запоріжжя, 2006. – 79 с.
33. Охрана праці в чорній металургії. Бринза В. М. Зінківський М.М. М.: Metallurgy, 1982-366с.