

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра металургії та інноваційних технологій

«Допущено до захисту»  
Гарант освітньої програми  
«Металургія чорних металів»

Христина МАЛІЙ

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
за підсумками виконання освітньо-професійної програми  
«Металургія чорних металів»  
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Розробка технології прокатки тонких штаб на БТЛС-1680»**

Керівник роботи

Юрій ДОБРОНОСОВ

Консультант  
від бази практики

Максим МЕДКОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Олексій ТУЧКОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя, 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>гірничо-металургійний</u>
Кафедра	<u>металургії та інноваційних технологій</u>
Ступінь вищої освіти	<u>бакалавр</u>
Спеціальність	<u>136 Металургія</u>
ОПП	<u>Металургія чорних металів</u>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми

Христина МАЛІЙ  
«10» квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

ТУЧКОВА Олексія Миколайовича  
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Розробка технології прокатки тонких штаб на "БТЛС-1680"

керівник роботи Доброносів Юрій Костянтинович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від № 41/23.02.2026 від 23.02.2026

2. Термін подання роботи 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи матеріал – вуглецеві та низьколеговані сталі, розміри – товщина <2 мм, ширина 1000-1200 мм, продуктивність по розміру 2x1200 мм – 1200 тис.т. Джерела інформації: навчальна література, державні стандарти, методична література зі спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики холодної прокатки смуг, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПАТ «Запоріжсталь» м. Запоріжжя, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Літературний огляд (аналіз стану питання). 2. Загальна частина ( склад обладнання, технологічний процес на стані БТЛС 1680 3. Спеціальна частина (Розрахунки та оптимізація режимів прокатки, розрахунки продуктивності, розрахунки вузлів робочої кліти). 4 Аналіз отриманих результатів, пропозиції з вдосконалення технологій та обладнання 5. Економічне обґрунтування запропонованих рішень .6 Заходи з техніки безпеки та охорони праці. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Склад обладнання стану тандем 1680, робоча кліть, вузол валків. Графіки розподілів по клітях обтиснень, сил і моментів прокатки, потужностей.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1	к.т.н., доцент Доброносів Юрій Костянтинович
2	к.т.н., доцент Доброносів Юрій Костянтинович
3	к.т.н., доцент Доброносів Юрій Костянтинович
4	к.т.н., доцент Доброносів Юрій Костянтинович
5	к.т.н., доцент Доброносів Юрій Костянтинович

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Літературний огляд .Загальна частина	11.05 – 13.06.2026
2	Спеціальна частина.	11.05 – 13.06.2026
3	Охорона праці та екологія	06 – 13.06.2026
4	Економічно-організаційна частина	06 – 13.06.2026
5	Оформлення пояснювальної записки	13 – 20.06.2026
6	Захист	за графіком

Здобувач

Олексій ТУЧКОВ

Керівник роботи

Юрій ДОБРОНОСОВ

## АНОТАЦІЯ

Тучков О.М. Розробка технології прокатки тонких штаб на "БТЛС-1680". - Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 136 Металургія, ОПП «Металургія чорних металів» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження – технологія та обладнання для прокатки штаб на БТЛС 1680 ПАТ «Запоріжсталь».

Предмет дослідження – закономірність впливу технологічних умов прокатки на стані 1680 на енергосилові параметри та якості рулонів при прокатці гарячекатаних штаб товщиною 1,5-2,0 мм..

Мета роботи – розширення сортаменту гарячекатаних штаб БТЛС 1680 ПАТ «Запоріжсталь» шляхом розробки технології прокатки штаб товщиною менше 2 мм із забезпеченням допустимих режимів обтискань.

У першому розділі розглянуто обладнання і технології прокатки на безперервних широкоштабових станах, встановлено сучасні тенденції в розробці технологій і обладнання.

У другому розділі проаналізовано особливості обладнання та технології виробництва тонких гарячекатаних штаб на БТЛС 1680.

У третьому розділі виконано оптимізацію режимів обтискань у чистовій групі клітей при прокатці штаб товщиною  $\leq 2$  мм, розроблено режими обтискань для ширини штаб 1200мм. Виконано розрахунок продуктивності за цими сортаментами. Визначено міцність та деформацію валків та можливості системи протизгину. Виконано аналіз результатів та запропоновано заходи з підвищення ефективності роботи стану.

У четвертому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування розроблених заходів, визначено параметри економічної ефективності. Очікуваний економічний ефект 105, 6 млн. грн/рік

У п'ятому розділі розроблено заходи із забезпечення техніки безпеки та охорони праці .

Об'єм роботи 84 с., 35 рис. в тексті, 13 табл., перелік посилань 13 найменувань.

**ТОНКА ГАРЯЧЕКАТАНА ШТАБА, БТЛС-1680, РЕЖИМИ ОБТИСКЕНЬ, ПРОДУКТИВНІСТЬ СТАНУ, ДЕФОРМАЦІЯ ВАЛКІВ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ОХОРОНА ПРАЦІ**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1.БЕЗПЕРЕРВНІ ШИРОКОШТАБОВІ СТАНИ (СТАН ПИТАННЯ).....	8
1.1 Призначення та склад обладнання безперервних ..... широкоштабових станів	8
1.2 Обладнання технологічної лінії стану.....	15
1.2.1 Нагрівальні печі.....	15
1.2.2 Системи видалення окалини (гідрозбив).....	16
1.2.3 Чорнові кліті.....	17
1.2.4 Обладнання проміжного рольганга.....	18
1.2.5 Летючі ножиці.....	20
1.2.6 Чистові кліті.....	20
1.2.7 Відвідний рольганг та зона охолодження.....	25
1.2.8 Моталки.....	26
1.3 Особливості технології прокатки на ШСГП.....	27
2 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	31
(ТЕХНОЛОГІЯ І ОБЛАДНАННЯ СТАНУ БТЛС-1680)	
2.1 Склад обладнання безперервного тонколистового..... стану 1680 ПАТ «Запоріжсталь»	31
2,2 Прокатка штаб на безперервному тонколистовому..... стані гарячої прокатки «1680»	39
2.3 Особливості прокатки штаб товщиною менше 2 мм.....	43
3 РОЗРАХУНКОВО_АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	46
3.1 Розрахунки та оптимізація режимів прокатки.....	46
3.2 Розрахунок продуктивності.....	56
3.3 Розрахунок валків на міцність і деформацію.....	60
3.4 Розрахунок гідроциліндру протизгину робочих валків.....	64
3.5 Аналіз отриманих результатів, пропозиції ..... з вдосконалення технологій	65

3.5.1. Аналіз схеми деформації та швидкісного режиму.....	65
3.5.2. Аналіз температурно-швидкісних та енергосилових.....	66
параметрів	
3.6 Пропозиції з удосконалення технологій БТЛС-1680.....	69
3.6.1. Оптимізація температурно-швидкісного режиму.....	69
3.6.2. Компенсація пружної деформації клітей та регулювання.....	69
профілю	
3.6.3. Удосконалення системи міжклітьового охолодження.....	70
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ...71	
4.1 Продуктивність стану, витратні коефіцієнти.....	71
та структура собівартості	
4.2 Розрахунок ефекту від зниження витратного коефіцієнта металу..	74
4.3 Розрахунок ефекту від оптимізації .....	75
температурно-швидкісного режиму	
4.4 Калькуляція собівартості та сумарний економічний ефект.....	75
4.5 Розрахунок інтегральних показників ефективності проекту.....	76
5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....78	
5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	78
у цеху гарячої прокатки	
5.2 Заходи щодо безпечної експлуатації обладнання стану 1680.....	80
5.2.1 Технічні засоби безпеки.....	80
5.2.2. Заходи при проведенні ремонтних робіт та перевалок.....	80
5.2.3. Електробезпека.....	81
5.2.4 Гігієна праці та пожежна безпека.....	81
ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83

## ВСТУП

Металургійна галузь взагалі і прокатне виробництво зокрема є провідними галузями економіки України. Споживання металу є одним з показників економічного розвитку країни. В умовах зростання конкуренції на світовому ринку металопродукції на перший план виходять поліпшення якості продукту при одночасному зниженні витрат на його виробництво.

Прокатне виробництво ПАТ «Запоріжсталь» наразі є єдиним в Україні виробництвом плоскої гарячекатаної і холоднокатаної металопродукції, а саме гарячекатаних штаб і листів і холоднокатаних смуг і листів. Гарячекатані штаби є як самостійною готовою продукцією, так і підкатом для виробництва холоднокатаних смуг та листів. Тому стан гарячої прокатки є ключовою ланкою всього прокатного виробництва комбінату.

Безперервний тонколистовий стан 1680 (БТЛС 1680) гарячої прокатки штаб, що відноситься до класу широкоштабових станів гарячої прокатки (ШСГП) після втрати внаслідок агресії металургійних підприємств МЕТІНВЕСТ Холдінгу у Маріуполі залишився єдиним в Україні станом такого типу. Він відноситься до ШСГП першого покоління, неодноразово проходив модернізацію обладнання, що дозволяє на сьогоднішній день випускати продукцію відповідно до міжнародних стандартів. Але майже за 80 років експлуатації БТЛС 1680 практично вичерпав можливості для подальшого вдосконалення устаткування. Тому подальша експлуатація стану на рівні сучасних вимог можлива переважно за рахунок подальшого вдосконалення технології прокатки. Зокрема це передбачає заходи з поліпшення якості та розширення сортаменту продукції як шляхом розширення марочного складу сталей, так і розмірів гарячекатаних штаб.

Однією з основних тенденцій у світовому виробництві гарячекатаних штаб є зниження їхньої товщини понад 2 мм з метою заміни верхнього сегменту холоднокатаних смуг. На стані БТЛС 1680 прокатують штаби товщиною 1,5-2,0 мм з вуглецевих сталей, але вони мають обмежений сортамент по ширині. Проблемними при прокатці

такого сортаменту є і питання якості, зокрема площинності прокату внаслідок поперечної різнотовщинності. Важливим є і забезпечення надійної роботи обладнання, відсутність перевантаження зношеного обладнання робочих клітей та їх приводів за усіма видами енергосилових параметрів. Тому вдосконалення технологічних режимів прокатки штаб товщиною менше 2 мм на БТЛС 1680 є актуальною задачею, яку можна вирішити шляхом аналізу існуючих технологій.

Мета роботи - розширення сортаменту гарячекатаних штаб БТЛС 1680 ПАТ «Запоріжсталь» шляхом розробки технології прокатки штаб товщиною менше 2 мм із забезпеченням допустимих режимів обтискань.

Завдання дослідження:

1. Виконати аналіз устаткування та існуючих технологій прокатки гарячекатаних штаб товщиною 1,5-2,0 мм на БТЛС 1680.

2. Розробити технології прокатки тонких штаб збільшеної ширини з рівномірним завантаженням у клітях чистової групи без перевищення допустимих навантажень..

3. Дати рекомендації з профілювання бочки валків.з урахуванням деформацій при розрахованих режимах навантажень.

4. Виконати техніко-економічну оцінку пропонованих заходів.

5. Проаналізувати стан ТБ та ОП на стані БТЛС-1680 та запропонувати заходи щодо поліпшення умов охорони праці.

Об'єкт дослідження: технологія та обладнання для прокатки штаб на БТЛС 1680.

Предмет дослідження: Закономірність впливу технологічних умов прокатки на стані 1680 на енергосилові параметри та якості рулонів при прокатці гарячекатаних штаб товщиною 1,5-2,0 мм.

Методи дослідження: інженерні методи визначення енергосилових параметрів гарячої прокатки плоского прокату, напружень та деформацій в елементах конструкції робочих клітей прокатних станів.

Практичне значення результатів роботи: розроблені технологічні передумови прокатки штаби розміром 1,5 – 2,0 мм x 1200 мм .

## 1. БЕЗПЕРЕРВНІ ШИРОКОШТАБОВІ СТАНИ (СТАН ПИТАННЯ)

### 1.1. Призначення та склад обладнання безперервних широкоштабових станів

Безперервні стани гарячої прокатки широкоштабової сталі (ШСГП) використовуються для виробництва листового та штабового прокату. Товщина готової продукції варіюється від 0,8 до 27 мм, а її ширина може досягати 2350 мм. Попри такий діапазон, найбільш затребуваним є прокат завтовшки 1,2–16 мм [1, 2].

У 1970-х роках металурги намагалися освоїти масове виробництво ультратонких штаб (0,8–1,0 мм) безпосередньо на ШСГП. Проте тогочасний досвід виявив суттєві технологічні перешкоди: випуск продукції тонше 1,2 мм різко знижував загальну продуктивність обладнання, ускладнював транспортування переднього кінця штаби до змотувальних пристроїв і призводив до погіршення якості металу порівняно з холоднокатаними аналогами. Наприкінці 1980-х років, завдяки стрибку в автоматизації та модернізації прокатних агрегатів, до ідеї прокатки штаб товщиною менше ніж 1 мм повернулися знову на вищому технічному рівні.

У металургійній практиці еволюцію ШСГП прийнято класифікувати за поколіннями [1].

#### Еволюція поколінь широкоштабових станів

##### Перше покоління:

Еталонним представником цієї групи є стан 1680 ПАТ «Запоріжсталь», спроектований для випуску штаб завтовшки 2–6 мм та завширшки до 1500 мм.

##### Конструктивні ознаки першого покоління:

- Роздільне (дискретне) розташування чорнових клітей. Раскат ніколи не знаходився одночасно у двох клітях, через що відстань між суміжними вузлами була значною.
- Використання клітей дуо безпосередньо за нагрівальними печами для первинного руйнування окалини.
- Застосування гідроструминного видалення окалини (гідрозбивання).
- Експлуатація універсальних чорнових клітей кварто.
- Подовжений проміжний рольганг (довший за максимальну довжину розкату, що виходить із чорнової групи).
- Летючі ножиці для торцювання та аварійного різання.
- Чистовий окалиноламах дуо перед фінішною групою.
- Безперервне розташування клітей кварто в чистовій групі.
- Протяжний відвідний рольганг після фінішних клітей.
- Моталки для формування рулонів.

#### Друге покоління

Зростання промислового попиту стимулювало створення станів другого покоління з розширеним сортаментом за шириною та товщиною (за рахунок подовження бочки валків), збільшеною масою слябів (до 45 т) та робочою швидкістю до 21 м/с.

Технологічна проблема: важчі сляби збільшували довжину розкату, що негативно впливало на температурний режим. За відносно низької швидкості прокатки метал сильно охолоджувався ще до входу в першу фінішну кліть.

Оскільки швидкість процесу лімітується безпечним захопленням переднього кінця штаби моталкою (не більше 10–12 м/с), на станах другого покоління вперше впровадили динамічне прискорення чистової групи клітей, яке активувалося одразу після фіксації штаби в моталці.

Приклади станів другого покоління:

- Стан 1700 Карагандинського меткомбінату (введений у експлуатацію у 1967 р.): обробляє сляби масою до 23 т у штаби товщиною 1,2–12 мм та шириною 700–1550 мм. Оснащений потужним вертикальним окалиноламахем, 6 чорновими та 7 чистовими клітками. Максимальна швидкість — 18 м/с. [1]

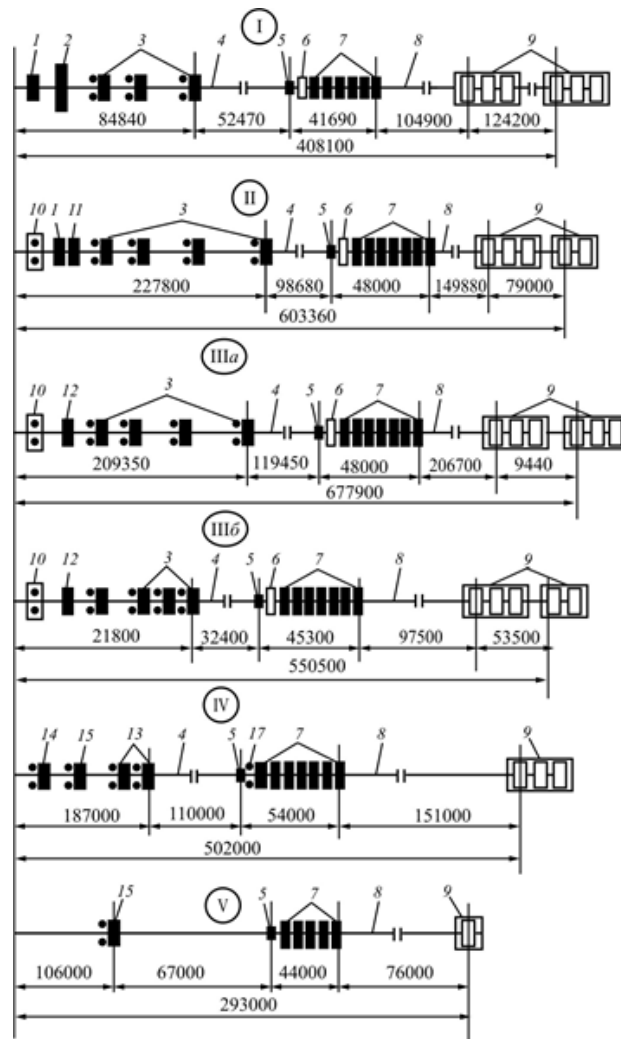
- Стани 2000 Новолипецького меткомбінату (НЛМК, 1969 р.) та «Северсталь» (1974 р.): розраховані на сляби до 36 т, випускають штаби 1,2–16 мм завширшки до 1850 мм зі швидкістю 20–21 м/с. Продуктивність обох агрегатів становить 6 млн тонн на рік. [1]

Відмінності між станами 2000 полягають в тому, що на НЛМК чорнова група побудована за класичною дискретною схемою, тоді як на «Северсталі» три останні чорнові кліти вперше у світовій практиці об'єднали в безперервну підгрупу. Крім того, на «Северсталі» відповідний рольганг суттєво коротший (97,5 м проти 206,7 м на НЛМК), що скорочує час руху передньої частини штаби на низькій швидкості та зменшує втрати тепла.

Попри переваги, стани другого покоління виявилися дуже металомісткими та дорогими, а за умови прокатки вузьких (менше 1500 мм) або товстих (понад 12–16 мм) штаб їхня потужність використовувалася лише на ~30%. [1]

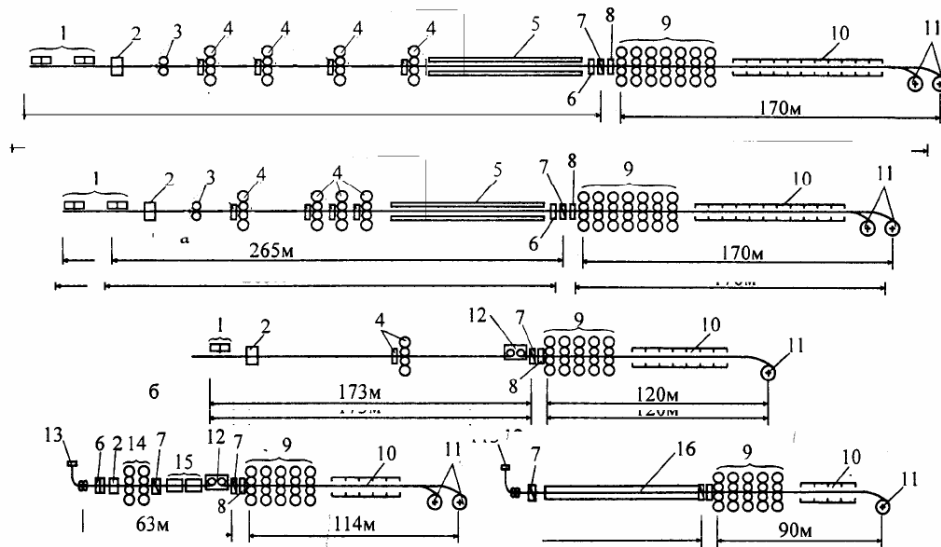
#### Третє покоління

У цих станах вдалося зменшити довжину чорнової групи завдяки інтеграції двох чи трьох клітей у безперервні підгрупи. Головна новація — використання універсальної реверсивної кліти в чорновій групі, що підвищило коефіцієнт обтиснення та скоротило габарити лінії. Деякі лінії отримали проміжні перемотувальні пристрої. Яскраві приклади: стан 2050 компанії *Baosteel* (Китай) та стан 1800 *EKO Stahl* (Німеччина).



1 - чорновий двовалковий окалиноломатель з горизонтальними валками; 2 - розширювальна кліть; 3 - універсальні нереверсивні чотиривалкові чорно-кліті; 4 – проміжний рольганг; 5 - леткі ножиці; 6 - чистовий двовалковий окалиноломатель; 7 - чотиривалкові кліті чистової безперервної групи; 8 - відвідний рольганг; 9 – моталки; 10 - вертикальний окалиноломатель; 11 - нереверсивна чорнова чотиривалкова кліть; 12 - нереверсивна двовалкова чорнова кліть; 13 - чорнова безперервна підгрупа універсальних чотиривалкових клітей; 14 - універсальна реверсивна двовалкова кліть; 15 - універсальна реверсивна чотиривалкова кліть.

Рисунок 1.1 – Схеми розташування основного обладнання традиційних ШСГП перших трьох поколінь: I – стан 1680 ВАТ «Запоріжсталь»; II – стан 1700 ВАТ «ІСПАТ-Кармет»; IIIа – стан 2000 року ВАТ «Новолипецький металургійний комбінат»; IIIб - стан 2000 ВАТ «Северсталь»; IV - стан 2050 Baostill, Китай; V - стан 1800 "EKO Stahl", Німеччина [1]



1-печі із крокуючими балками; 2 - гідрозбив грубої окалині; 3 - чорнова реверсивна кліть дуо й потужна кліть із вертикальними валками; 4 – універсальна чорнова реверсивна кліть кварто; 5 - теплоізолюючий екран над проміжним рольгангом; 6 - підігрівник крайок; 7 – ножиці; 8- гідрозбиття вторинної окалині; 9 - чистова група клітей; 10 - душова установка над рольгангом, що відводити; 11-моталки; 12 - проміжній перемотувальний пристрій (ППП); 13 - МБЛЗ; 14 - чорнові кліті кварто; 15 – індукційна піч для вирівнювання температури розкочування; 16 – прохідна піч – буфер

Рисунок 1.2 – Схеми розташування основного обладнання ШСГП різних поколінь [1]

#### Четверте та п'яте покоління (Ливарно-прокатні модулі)

До цієї категорії належать ливарно-прокатні модулі (ЛПМ), де машина безперервного лиття заготовок (МНЛЗ) інтегрована в єдиний комплекс із прокатним станом. Це дозволило поєднати розливу ріdkої сталі та деформацію твердого металу в наскрізний техпроцес. Піонерами напрямку стали фірми *SMS Schloemann-Siemag* (Німеччина), яка розробила технологію, та *Nucor* (США), яка першою ризикнула впровадити її у промислових масштабах.

Особливості ЛПМ залежно від товщини заготовки:

1. Товщина сляба 70–100 мм: у лінію встановлюють 1–2 чорнові універсальні кліті для попереднього обтиснення.
2. Товщина тонкого сляба 45–60 мм: така заготовка за товщиною відповідає підкату перед фінішною групою, тому потреба в чорнових клітях зникає взагалі. Чистові групи на ЛПМ ідентичні традиційним БСГПС.

Обов'язковим елементом ЛПМ є прохідні печі, розміщені між МНЛЗ та станом. Вони необхідні, оскільки температура сляба після кристалізації на 50–100 °С нижча за оптимальну для прокатки, а тепло розподілене нерівномірно. [2]

Функції прохідних печей в ЛПМ:

- Підігрів металу до заданої температури деформації;
- Гомогенізація (вирівнювання) температурного поля по перерізу;
- Мінімізація теплових втрат під час транспортування;
- Створення термічного буфера для синхронізації роботи МНЛЗ та стану в разі затримок чи збоїв.

Ключова проблема ЛПМ: дисбаланс швидкостей. Швидкість лиття на МНЛЗ зазвичай становить близько 8 м/хв, тоді як початкова швидкість задачі заготовки в стані — не менше 30 м/хв. Для компенсації цього розриву використовують двоструменеві МНЛЗ та спеціальні трансферні пристрої («човники») для переміщення заготовок між лініями.

На сьогодні найпопулярнішою конфігурацією ЛПМ є схема з двоструменевою МНЛЗ, представлена на рис. 1.3.

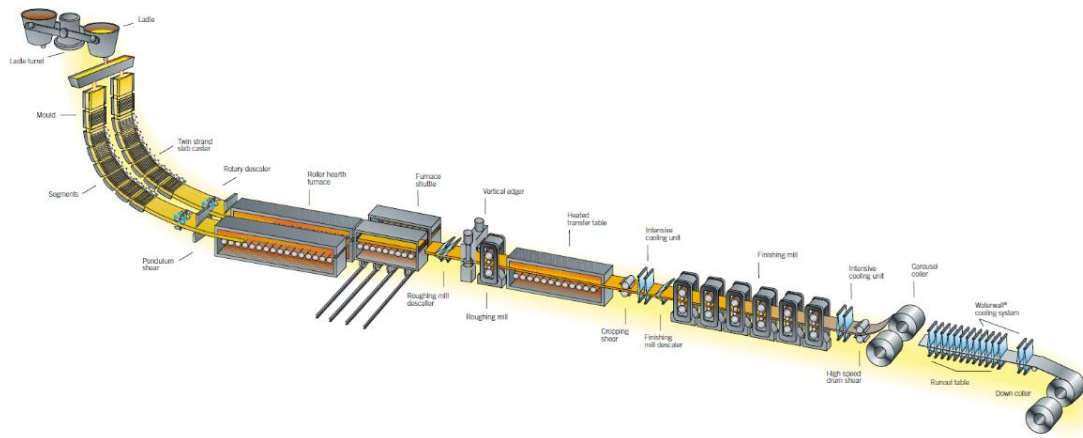


Рисунок 1.3 - Склад обладнання ЛПМ з двоструменевою МНЛЗ [3]

Зараз основу світового парку складають стани третього покоління. Завдяки реконструкції старі агрегати (1-го та 2-го покоління) модернізують до вищих стандартів.

Цілі реконструкції: поліпшення геометрії та механічних властивостей штаби, покращення якості поверхні, розширення марочного та розмірного сортаменту, зниження собівартості.

Три стратегічні підходи до модернізації:

1. Поетапне, безперервне вдосконалення окремих вузлів протягом тривалого часу.
2. Швидке виконання одного-двох масштабних капітальних заходів.
3. Глибока модернізація з демонтажем та переносом обладнання на новий майданчик (часто в іншу країну).

Попри високу продуктивність і точність, класичні ШСГП мають хронічні недоліки. Їхні кліті розраховані на максимальні навантаження для твердих марок сталі, тому понад 93% часу вони працюють із суттєвим недовантаженням. Крім того, за швидкості захоплення кінця штаби моталкою до 12,5 м/с практично неможливо втримати необхідну температуру прокатки для листів тонше 2 мм, через що ефективність станів на ультратонких профілях різко падає [1].

## 1.2 Обладнання технологічної лінії стану

Сучасний комплекс БСГПС забезпечує виконання наступного циклу: нагрів заготовок → видалення первинної окалини → чорнова прокатка → транспортування підкату → зняття вторинної окалини → обрізка нерівних кінців → чистова прокатка → охолодження → змотування. Загальна концепція розташування обладнання принципово не змінилася з часів перших поколінь.

### 1.2.1 Нагрівальні печі

Для підготовки слябів застосовують безперервні методичні печі.

- Штовхальні печі (минуле покоління): метал переміщувався проштовхуванням по охолоджуваних водою глісажних трубах. Недоліки: обмежена місткість, нерівномірний нагрів через утворення холодних «глісажних плям» у місцях контакту з трубами, складність аварійного розвантаження.

- Печі з крокуючими балками (сучасність): сляби переміщуються циклічним підйомом та перенесенням за допомогою паралельних балок. Вони не торкаються один одного, прогриваються рівномірно з усіх боків, а зони контакту з опорами постійно змінюються. Для плавного вивантаження металу без ударів на рольганг застосовують спеціальні машини безударної видачі.

Переваги цих печей перед печами штовхального типу обумовлені методом транспортування металу через піч. Піч з крокуючими балками – методична піч, у якій переміщення заготовок відбувається шляхом циклічного поступально-поворотного крокування паралельно розташованих балок. Сляби не контактують між собою і рівномірно прогриваються з усіх боків, а місця контакту з балками постійно оновлюються. Такі печі більш продуктивні, мають велику ємність та зручні в експлуатації.

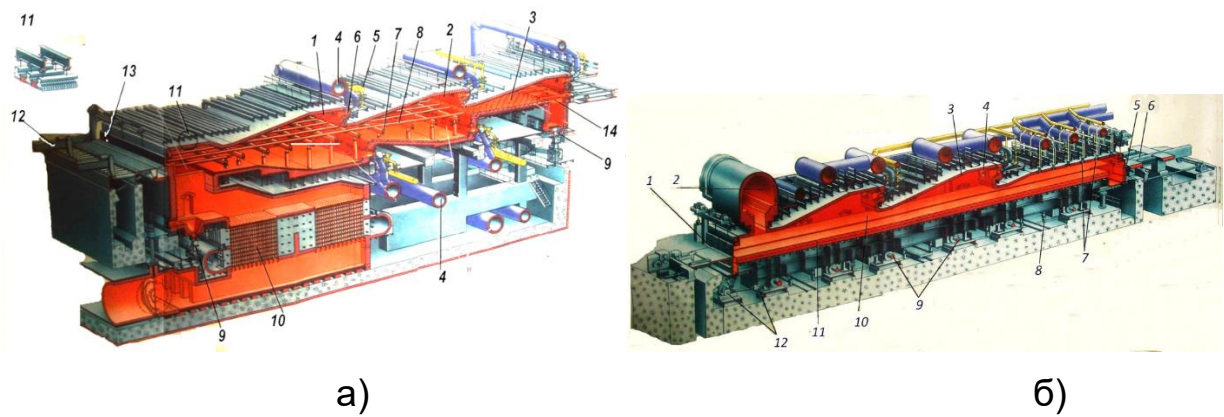


Рисунок 1.4 – Методичні печі: штовхальна (а), з крокуючими балками (б) [4]

Для виїмки слябів з печі та плавного укладання на рольганг використовують спеціальні машини ненаголошеної видачі слябів.

### 1.2.2 Системи видалення окалини (гідрозбив)

Окалина (оксиди заліза) негативно впливає на якість поверхні, призводячи до дефекту «втиснена окалина» та зносу валків. Раніше для її руйнування використовували механічні окалиноламачі (кліті дуо) разом із низьконапірним гідрозбиванням. Сьогодні промисловість перейшла на гідрозбивачі високого тиску (до 20 МПа), відмовившись від валкового руйнування.

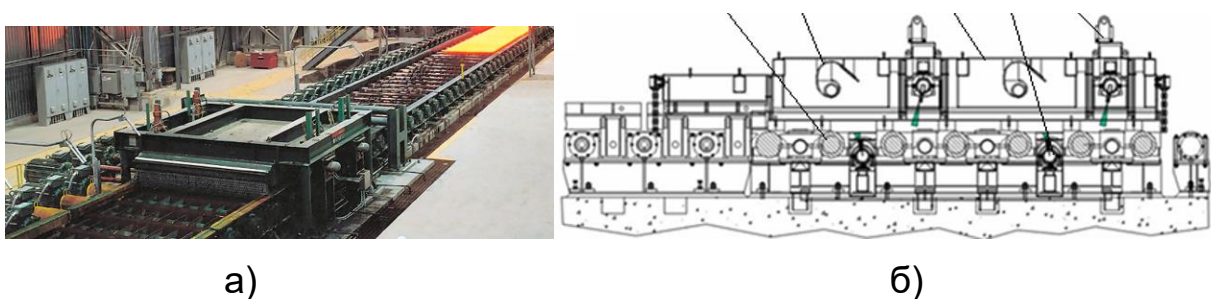


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд (а) та схема (б) гідрозбиву окалини [3]

Колектори з форсунками розташовані над і під рольгангом у спеціальному захисному кожусі. Руйнування окалини відбувається завдяки поєднанню чотирьох факторів:

- Механічна дія кінетичної енергії струменя.
- Термічні напруження через різницю температур поверхні та внутрішніх шарів.
- Паровий вибух (головний фактор): Вода, потрапляючи на розжарений метал, миттєво перетворюється на пару, буквально підриваючи шар оксидів.
- Змивання залишків окалини потоком води.

### 1.2.3 Чорнові кліті

Зазвичай це універсальні комплекси, що складаються з горизонтальних валків кварто та вертикальних валків дуо (еджерів). Раніше вони монтувалися в одній станині. У сучасних проєктах вертикальну та горизонтальну кліті встановлюють впритул одна до одної, що спрощує обслуговування.

Якщо раніше вертикальні валки лише контролювали уширення та формували кромку, то на станах, що працюють із безперервнолитими слябами, вони виконують інтенсивне обтиснення за шириною (редукування). Це дозволяє гнучко змінювати ширину прокату при обмеженому асортименті вихідних слябів. Альтернативою вертикальним валкам у деяких закордонних рішеннях є потужні горизонтальні редуційні преси. Натискні механізми сучасних клітей мають комбінований або повністю гідравлічний привід.

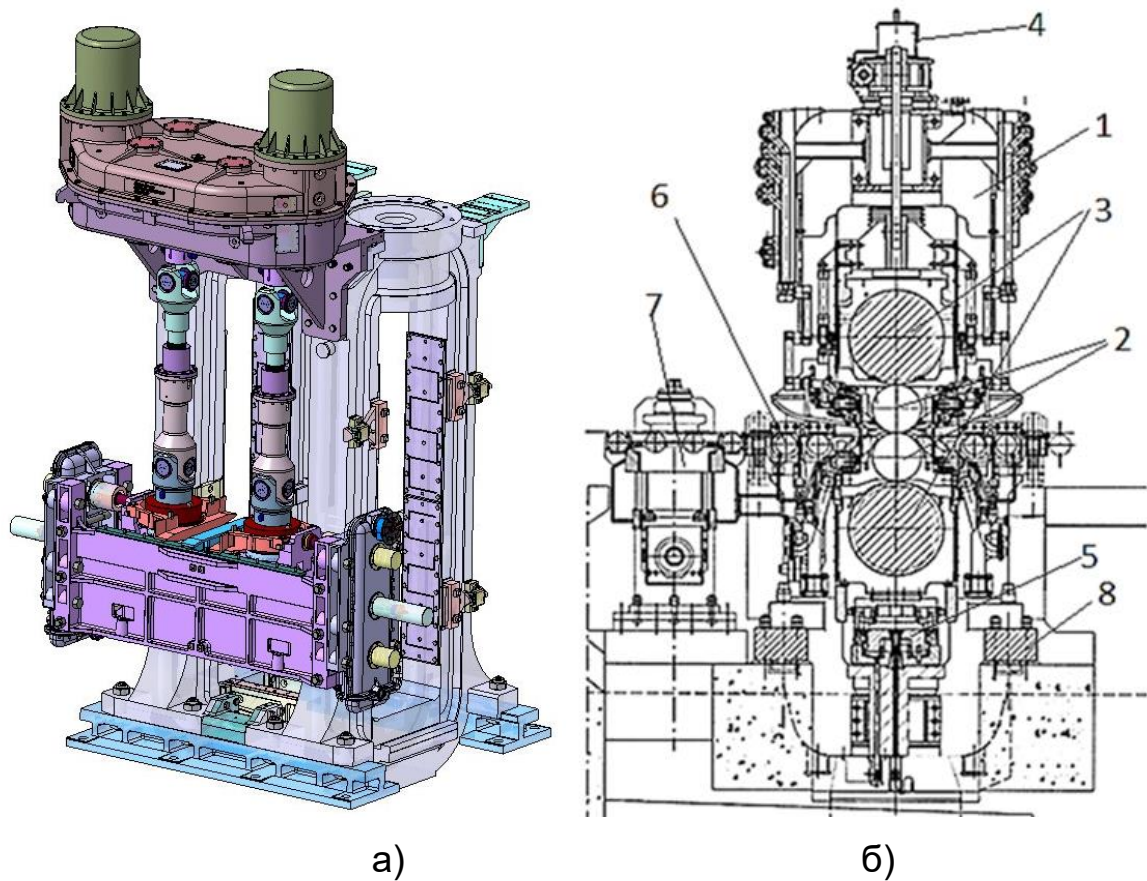


Рисунок 1.6 – Універсальна кліть (горизонтальні валки вивалені) (а) та комбінація вертикальної 7 та горизонтальної 1 клітей в універсальну (б) [4]

#### 1.2.4 Обладнання проміжного рольганга

Функції проміжного рольгангу на ШСГП - транспортування підкату з чорнової групи клітей та забезпечення «розриву» технологічного потоку, обумовленого перевищенням швидкості виходу підкату з чорнової групи клітей над швидкістю входу його в чистову групу клітей. Основна проблема на проміжному рольгангу – значне падіння температури розкату та поява температурного клина. Втрати тепла розкочуванням за час перебування на проміжному рольгангу досягають 60% від загальних теплових втрат штабою за час прокатки. Один із шляхів зниження цих втрат – використання екранів різного типу.

Теплозахисні екрани обмежують теплообмін між металом та атмосферою, тобто є свого роду «ковдрою» для прокату.

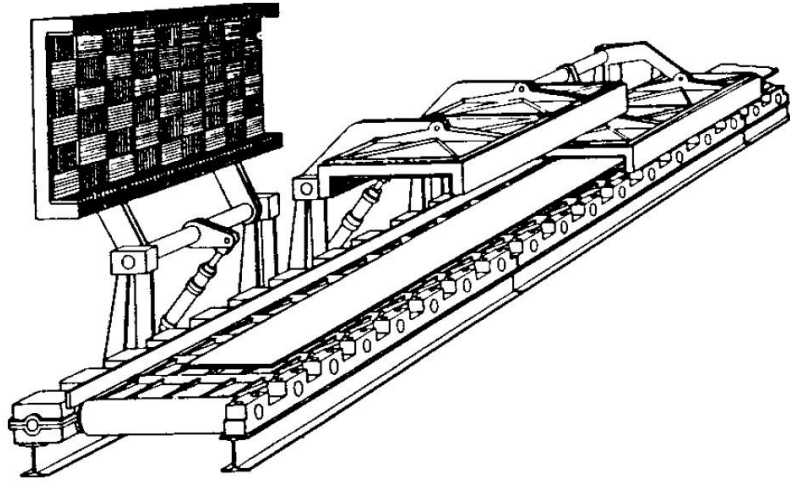


Рисунок 1.7 – Теплозахисний екран [2]

Екрани виконують у вигляді підйомних кришок з тепловідбивною або теплонакопичувальною внутрішньою поверхнею.

Іншою машиною для збереження тепла та усунення температурного клина є проміжний перемотний пристрій (ППУ) відомий як CoilBox. Принцип роботи ППУ полягає в змотуванні розкату на проміжному рольгангу в нещільний рулон і подальшому розмотуванні. Штаба в рулоні значно менше остигає, а при розмотуванні кінець штаби стає початком, тобто. усувається температурний клин. Схема ППУ CoilBox показано на рис. 1.8.

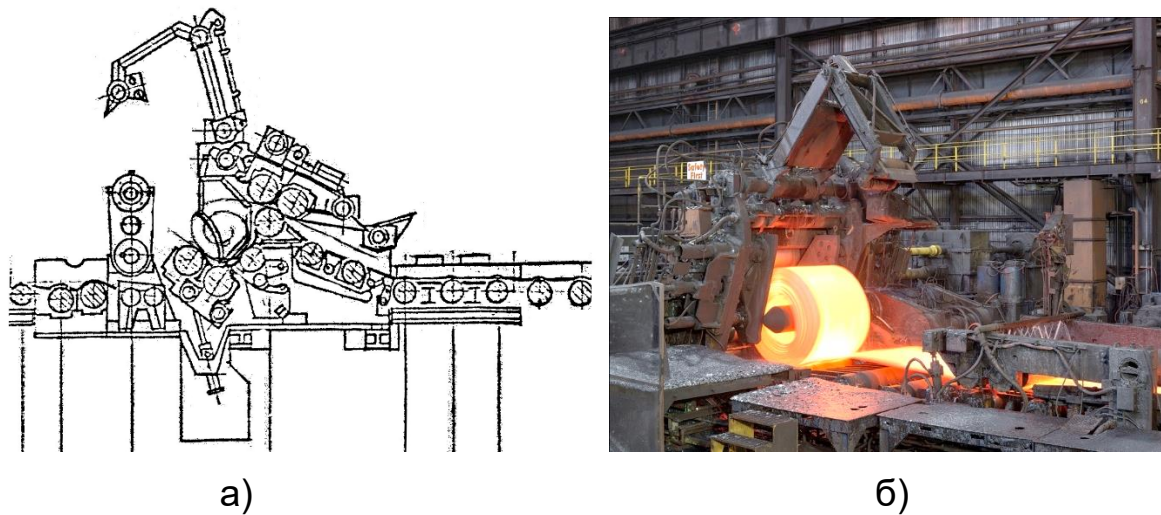


Рисунок 1.8 – Схема (а) та загальний вигляд (б) ППУ CoilBox [2]

### 1.2.5 Летючі ножиці

Встановлюються безпосередньо перед чистовим гідроозбивачем. Вони відсікають нерівні передні та задні кінці («язики») на повній швидкості руху металу. Найчастіше використовують барабанні летючі ножиці. Вони мають просту конструкцію, відмінно збалансовані та забезпечують високу швидкість різання.

На барабанах кріпляться дві пари ножів: шевронні (для фігурного обрізання переднього кінця, що полегшує його зачіплення фінішними валками та знижує ударні навантаження) та прямі (для торцювання заднього кінця). Ножиці працюють у старт-стопному режимі за сигналами від фотодатчиків наявності штаби. Для мінімізації простоїв при затупленні ножів на сучасних станах практикують швидку заміну всього блока ножиць повністю.

### 1.2.6 Чистові кліті

Чистові кліті на ШСГП утворюють безперервну групу з 6-7 клітей кварто. Робочі валки встановлені на підшипниках кочення, опорні – ПРТ.

Натискні механізми в клітях перших поколінь електромеханічні. Вони мають низьку швидкість та не забезпечують ефективної роботи системи автоматичного регулювання товщини штаб (САРТ). Тому під час реконструкції під натискні гвинти встановлюють гідрошайби (короткохідні гідроциліндри), які виконують роль ГНУ. На сучасних станах спочатку встановлюють або комбіновані (зазвичай в перших клітинах), або гідравлічні натискні механізми. Сучасні ГНУ мають гідравлічну систему із сервоклапаном, швидкість якої становить 0,05 с. Це дозволило відмовитися від систем САРТ із товщиномірами, а роботу ГНУ забезпечують датчики, встановлені у самих гідроциліндрах, та мікропроцесорна техніка. [4]

У чистових робочих клітях вирішується завдання зниження поперечної різнотовщинності та забезпечення пов'язаної з нею планшетності штаб. Причиною виникнення є прогин валків від сили прокатки і температурне розширення бочки валків. У першому випадку сильніше стискаються кромки, у другому – середина штаби. Найбільш істотно впливає прогинання валків, тому основні заходи спрямовані на його компенсацію або усунення.

Існує кілька способів зниження поперечної різнотовщинності. Верстатне профільування – на бочці валка виконується опуклість або увігнутість, протилежна за знаком деформації валка, що її компенсує. Широко застосовується на ШСГП. Але верстатне профільування не враховує зміни прогину валка від коливань сили прокатки. Тому її зазвичай використовують у поєднаннях з іншими способами.

Протизгин робочих валків. Найбільш поширений та оперативний спосіб регулювання. Складається в додатку до подушок робочих валків вертикальної сили, що створює прогин, зворотний прогин від сили прокатки. На станах перших поколінь силу створювали гідроциліндри, розміщені у подушках робочих валків. На сучасних станах використовують гідроблоки (рис.1.9), розміщені у вікнах станин між

подушками робочих валків. Недолік способу – додаткове навантаження на кліть силою протизгину.

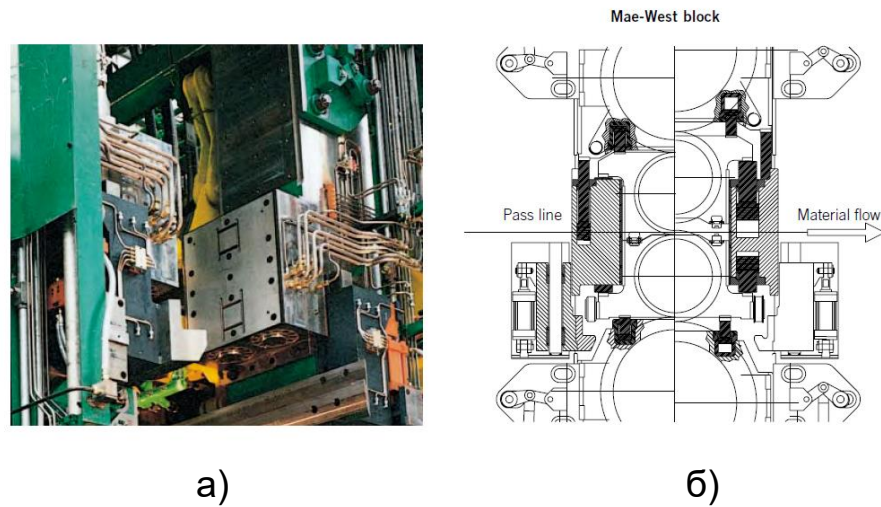


Рисунок 1.9 – Загальний вигляд (а) та схема (б) гідроблоку Mae West, що забезпечу протизгин - довігин робочих валків [3]

Довігин робочих валків. Валки роблять із опуклістю бочки, яка частково компенсується прогином валків від сили прокатки і остаточно – силою довігину, яка менша за силу противігину валків.

Сила довігину створюється між подушками робочого та опорного валків гідроциліндрами, встановленими в подушках опорних валків або спеціальних гідроблоках. У сучасних станах використовують комбінацію протизгину-довігину робочих валків.

Теплове профілювання валків полягає в нерівномірній подачі охолоджуючої рідини по довжині бочки валка. Так для компенсації вигину валків треба інтенсивніше охолоджувати краї бочки. Теплове профілювання не створює додаткових навантажень на кліть, але більш інерційне за часом.

Осьова зсув профільованих валків спочатку застосовувалася в 6-валкових клітях, де зрушувалися проміжні валки (рис. 1.10,а). У клітях кварто вона застосовується для спеціально спрофільованих робочих

валків. Для осьового зсуву в клітях застосовують спеціальні гідравлічні механізми (поз.8 на рис. 1.12).

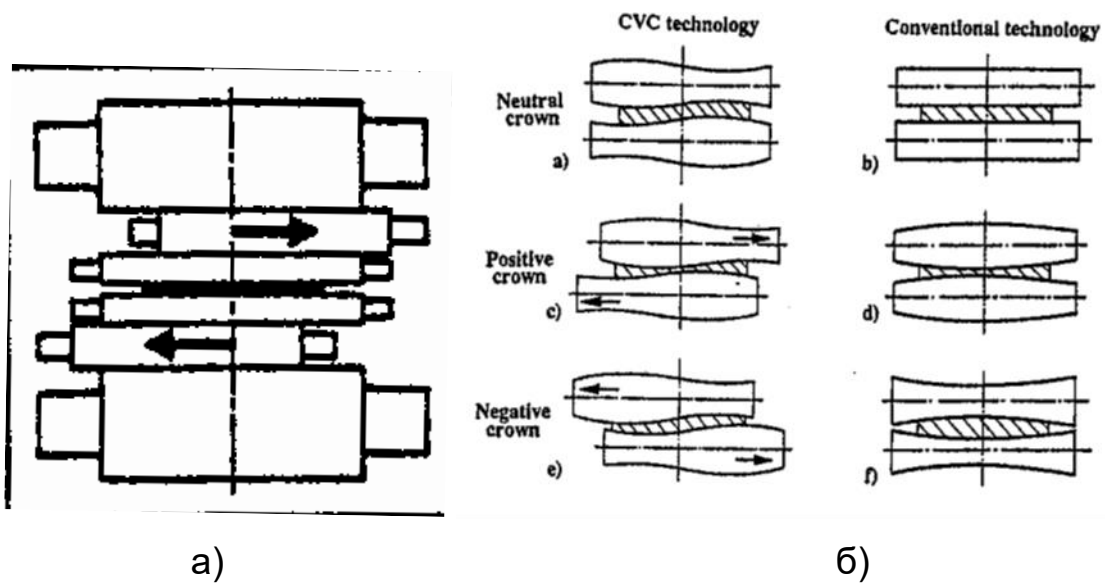


Рисунок 1.10 – Осьове зсув проміжних (а) та профільованих робочих валків [5]

Перехрещення осей валків у горизонтальних площинах (рис. 1.11) видається простим та ефективним способом. Але зазори між станиною та подушками валків знижують горизонтальну жорсткість клітей, а механізми для перехрещування валків складні та громіздкі, тому спосіб широкого поширення не набув.

Механізми довигину, осьового зсуву та перехрещення з'явилися на сучасних станах третього - п'ятого покоління.

На рис. 1.12, а показана типова сучасна чистова кліть кварто. Вона обладнана гідравлічним натискним механізмом, гідроблоками противигину - довигину валків і механізмом осьового зсуву валків (з зворотного боку кліті. Робоча кліть f2CR фірми Danieli (рис. 1.12,б) обладнана всіма розглянутими механізмами профілювання міжвалкового зазору.) Проте досвід експлуатації на одному з ЛПМ показав низьку надійність роботи механізму перехрещування валків.

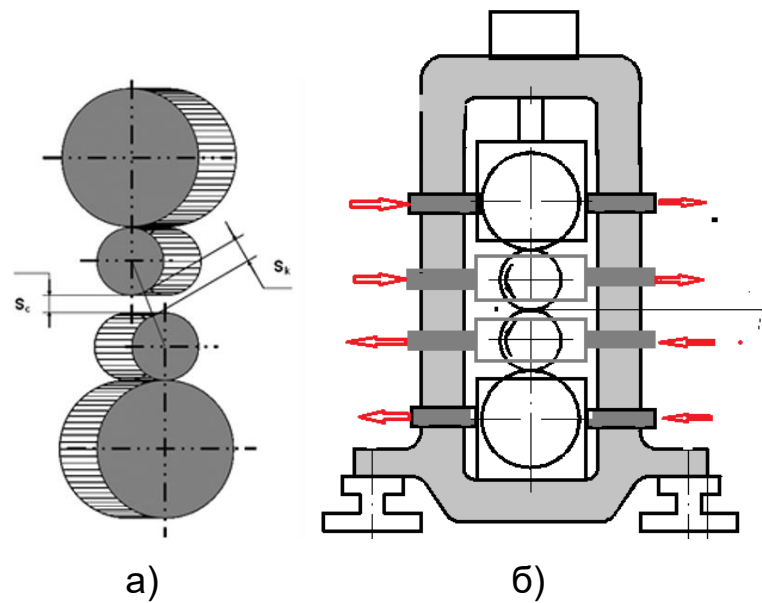


Рисунок 1.11 Принципові схеми профілювання міжвалкового зазору перехресцюванням осей валків (а) [2,5] та механізму перехресцювання (б)

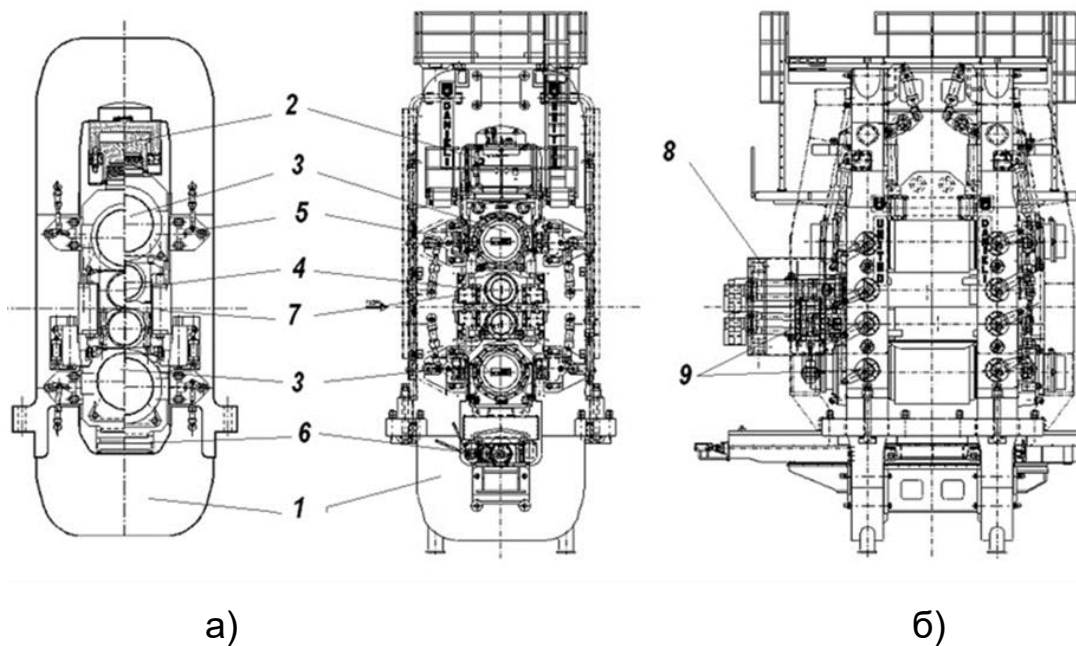
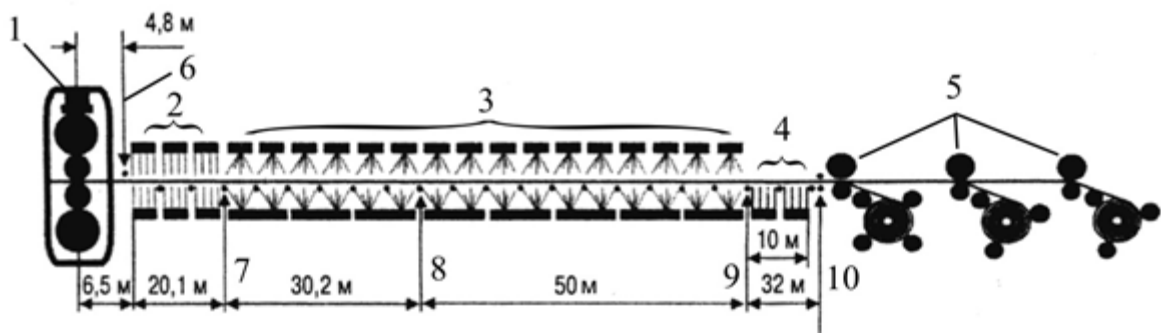


Рисунок 1.12 – Горизонтальні робочі кліти кварто фірми Danieli: чистова фінішна (а) та чистова f2CR (б): 1 - вузол станин, 2 - гідравлічний натискний механізм, 3 - опорні валки, 4 - робочі валки, 5 - пристрої фіксації опорних валків, 6 - механізм виведення валків на рівень прокатки, 7 - механізми протизгину робочих валків валків [3]

### 1.2.7 Відвідний рольганг та зона охолодження

На відвідних рольгангах нових БСГПС швидкість руху штаби досягає 25 м/с. Для стабілізації положення металу ролики встановлюють із невеликим перекосом у горизонтальній та вертикальній площинах, іноді з каскадним пониженням кожного наступного ролика. Це змушує штабу набувати стійкої жолобоподібної форми. Ролики мають внутрішнє водяне охолодження та індивідуальні електроприводи.

Для формування правильної дрібнозернистої структури металу над рольгангом встановлюють блоки примусового охолодження. Найбільш прогресивним рішенням є системи «водяної завіси» (розробка *Davy McKee*), які подають воду суцільними плоскими ламінарними струменями зверху та знизу штаби. Це забезпечує високу рівномірність охолодження та можливість гнучкого регулювання витрати води по довжині прокату (типова схема комбінованої системи охолодження представлена на рис. 1.13).



1 - остання кліть чистової групи стану; 2 - ділянка ламінарного охолодження; 3 - ділянка спреєрного охолодження; 4 - ділянка точного регулювання  $T_{зм}$ ; 5 - моталки; 6 - прилад, що фіксує температуру кінця прокати штаби; 7-9 - прилади контролю температури штаби; 10 - прилад, що фіксує температуру змотування штаби

Рисунок 1.13 – Схема душуючої установки, що діє на ШСГП фірми Thyssen Krupp Stahl [5]

### 1.2.8 Моталки

Для безперервного приймання штаб стани оснащують групами підземних моталок (зазвичай по 3 одиниці в групі). Перша група (ближча до клітей) обслуговує тонкий сортамент, друга — товстий. Направляючі лінійки скеровують штабу з рівня рольганга вниз на намотувальний барабан.

Замість старих пневматичних систем із 4–8 притискними роликками, які страждали від ударних навантажень через ексцентриситет рулону, на сучасних ШСГП застосовують три- або чотирироликові моталки з гідравлічним притисканням роликів (рис.1.14). Гідроциліндри в цьому випадку працюють як ефективні демпфери, гасячи динамічні удари.

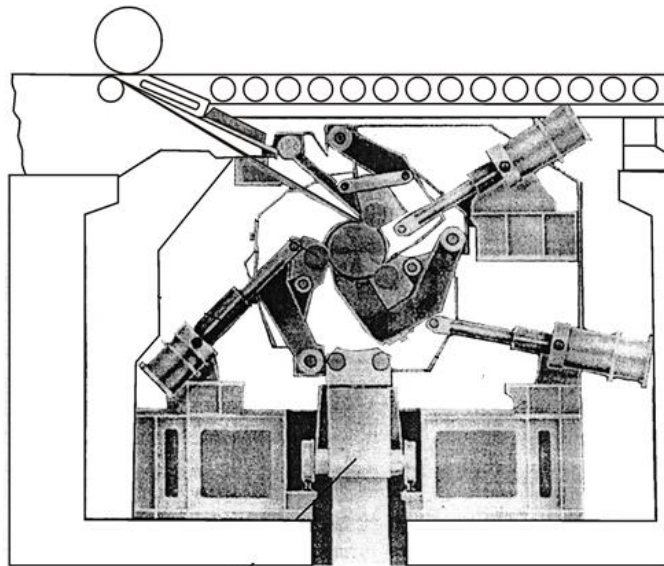


Рисунок 1.14 – Трироликова моталка з гідравлічним підтисканням роликів до барабана [3]

На ливарно-прокатних модулях для роботи з надтонкими гарячекатаними штабами часто монтують компактні карусельні моталки в безпосередній близькості до останньої чистової кліті.

### 1.3 Особливості технології прокатки на ШСГП

Послідовність операцій на ШСГП визначається складом обладнання станів і включає нагрівання заготовок (слябів) у методичних печах або транзитну прокатку, якщо ШСГП встановлений в одній лінії зі слябінгом, видалення пічної окалини, чорнову прокатку з досягненням 70-80% абсолютного обтискання, обрізання кінців розкатів на летучих ножицях, видалення вторинної окалини, чистову прокатку у розмір, охолодження штаб на відвідному рольгангу до температури змотування, змотування штаб у рулони моталками, зняття рулонів і переміщення їх транспортерами на склад або в цех холодної прокатки [1]. Видалення окалини на сучасних станах виконують гідрозбивом. Чорнову прокатку на станах 1-2 поколінь ведуть послідовно в чорнових універсальних клітках, на станах 3-го покоління реверсивною прокаткою в 1-2 універсальних клітках. Як заготовки на сучасних станах використовують безперервно литі сляби. У цьому випадку вертикальні валки для розширення сортаментів по ширині можуть виконувати обтискання до 50-100 мм. При використанні катаних слябів у вертикальних валках знімають розширення та формують кромки.

Послідовність операцій на ЛПМ до чистової групи істотно відрізняється від звичайних ШСГП, а у чистовій групі відрізняється лише режимами обтискань. Оскільки в дипломній роботі розглядаємо звичайний ШСГП, докладно зупинитись на технологіях ЛПМ не будемо.

При розробці технології прокатки основними показниками є режими обтискання та температурно-швидкісні режими. У технологічних інструкціях станів наведено максимально допустимі відносні обтискання по клітках чорнових та чистових груп. На станах, обладнаних датчиками контролю навантаження, поруч із максимально допустимими обтисканнями регламентують максимально допустимі значення енергосилових параметрів. Максимальні обтискання по проходах (клітках) в чорновій групі становлять у середньому 30/35 – 37/40 – 33 /35

– 42/45 - 40-50%. Менші значення обтискань відповідають штабам більшої ширини. Максимальні обтискання по клітях чистових груп (більшість станів 6-клітьові) становлять у середньому 50/45 - 50/45 - 45/40 - 40/35 -30/25 - 20/16 %. При цьому при розробці режимів обтискань необхідно прагнути рівномірного завантаження клітей. Обтискання в останній чистовій кліті зазвичай менше, це обумовлено збільшенням опору деформації металу і необхідністю знизити пружну деформацію кліті для отримання заданої точності розмірів штаб [2,6].

Температурно-швидкісні режими прокатки: для одержання необхідної структури металу, а отже, і його механічних властивостей, при прокатці на ШСГП слід суворо витримувати три параметри: температуру кінця прокатки  $t_{\text{кп}}$ , температуру змотування  $t_{\text{зм}}$  і величину відносного обтискання металу  $\varepsilon$  в останній кліті чистової групи. Для отримання сприятливої дрібнозернистої рівномірної структури низьковуглецевої сталі її прокатку необхідно закінчувати при  $t_{\text{кп}} > 850^{\circ}\text{C}$ , а змотувати в рулон при  $t_{\text{зм}} < 680^{\circ}\text{C}$ . Для забезпечення необхідних структури та механічних властивостей металу необхідно дотримуватись ще двох обмежень:  $t_{\text{кп}}$  не повинна перевищувати  $920^{\circ}\text{C}$ , а відносне обтискання в останній кліті ШСГП – перебувати в межах  $\varepsilon \geq 15\%$  [2,5].

Відмінності температурних умов прокатки на ШСГП пояснюються схемою розташування їх основного обладнання, довжиною технологічної лінії, параметрами технологічного процесу: температурою нагріву слябів, товщиною підкату, сортаментом стану, швидкісним режимом прокатки. Температура кінця прокатки штаб часто не відповідає оптимальному діапазону. Причому для штаб товщиною 2-2,5 мм вона нижча за оптимальну, а для товстих - 4 мм і більше – вище.

Теплові втрати підкату на проміжному рольгангу – домінуючі. Їх знижують застосуванням ППУ та теплозберігаючих екранів. Сприяє зниженню теплових втрат на цій ділянці і підвищення швидкості прокатки в останній кліті чорнової групи клітей до 5 м/с [ 1,2].

Ще одним фактором, що суттєво впливає на температуру прокатки, є робота гідрозбиву окалини, розміщеного перед чистовою групою клітей.

Для підвищення температури кінця прокатки на ШСГП 1-го покоління використовували можливе допустиме підвищення температури нагріву слябів, перерозподіл обтискань у клітях чорнової та чистової груп (велике завантаження останніх і меншу перших клітей), збільшення товщини підкату, можливе збільшення швидкості прокатки в чистовій групі клітей [1].

При пуску ШСГП 2-го покоління на них практично відразу було застосовано прокатка з прискоренням клітей чистової групи. Однак транспортування переднього кінця штаби товщиною 2 мм і менше до моталки зі швидкістю понад 10-11 м/с утруднене. Для забезпечення необхідних співвідношень швидкостей роботи моталки та прокатки з прискоренням були розроблені різні режими зміни швидкості по довжині штаби, що прокатується (рис.1.15) [2]. Тут  $V$  - швидкість задавання в моталку,  $V_1'$  - швидкість, що забезпечує температуру кінця прокатки,  $V_2$  - швидкість після прискорення

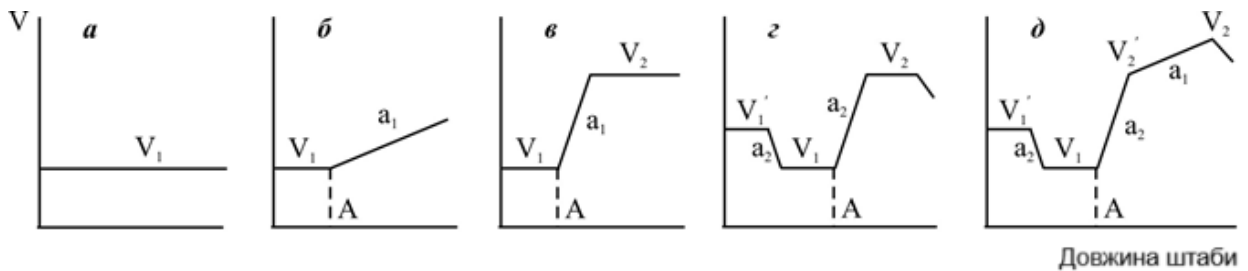


Рисунок 1.15 - Схеми швидкісних режимів прокатки на ШСГП [5]

Крім механічних властивостей найважливішим показником якості штаб є точність розмірів. На товщину та ширину штаби задаються граничні відхилення, перевищення яких неприпустимо. Розрізняють поздовжню та поперечну різнотовщинність штаб. Поздовжня різнотовщинність - відхилення від номінального розміру по довжині штаби. Її основні причини – вихідна різнотовщинність слябів,

нерівномірність температури по довжині штаби, биття валків. Різниця температур на початку і в кінці штаби, яка з'являється при втраті температури на проміжному рольгангу і може досягати 70°C, призводить до явища температурного клина, коли при чистовій прокатці товщина нагрітого початку штаби менше, ніж товщина кінця, що підстиг. Для боротьби з температурним клином використовують прокатку з прискоренням, теплозахисні екрани і особливо ППУ CoilBox. Для зниження поздовжньої різнотовщинності використовують системи автоматичного регулювання товщини (CAPT) на основі швидкодіючих гідравлічних натискних механізмів, що дозволяють оперативно регулювати міжвалковий зазор у процесі прокатки.

Поперечна різнотовщинність – це нерівномірність товщини по ширині штаби. Основні її причини – нерівномірна теплова зміна діаметра по довжині бочки валка (випуклість посередині бочки) та прогинання валків під дією сили прокатки. У першому випадку товщина штаби менша посередині, у другому - по краях. Нерівномірне обтискання призводить до різниці витяжок по ширині, більших там, де товщина менша. Це в свою чергу веде до появи дефектів площинності штаби, таких як хвилястість кромки і коробуватість. Способи боротьби з поперечною різнотовщинністю: верстатне та теплове профілювання валків, протизгин, осьовий зсув валків та ін., розглянуті в пункті 1.2.6.

Одним із шляхів зниження вартості листової продукції є заміна частини холоднокатаної штаби гарячекатаною, собівартість тонни якої як мінімум на 20 доларів США нижча, ніж холоднокатаного. Вдосконалення обладнання, технологічного процесу, систем автоматики дозволило наприкінці 80-х – середині 90-х років минулого століття повернутися до проблеми виробництва гарячекатаних штаб завтовшки менше 1,2 мм. Для вирішення цієї проблеми опрацьовано різні варіанти. Найбільш раціональні два з них. Це освоєння виробництва тонких штаб на ШСГП та ЛПМ [1,5].

## 2 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА (ТЕХНОЛОГІЯ І ОБЛАДНАННЯ СТАНУ БТЛС-1680)

### 2.1 Склад обладнання безперервного тонколистового стану 1680 ПАТ «Запоріжсталь»

Безперервний тонколистовий стан 1680 ПАТ «Запоріжсталь (БТЛС 1680) на даний момент – єдиний в Україні безперервний широкоштабовий стан.

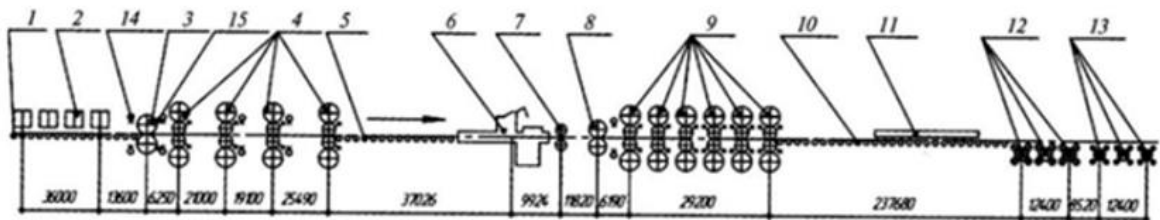
БТЛС 1680 - класичний ШСГП першого покоління, введений в експлуатацію в 1936 р. На ньому була передбачена прокатка штаб товщиною 2-6 мм і шириною до 1500 мм. Особливістю стану 1680 була наявність у чорновій групі розширювальної кліті та пресу. Розширювальну кліть використовували при прокатці штаб, коли їх ширина була більша за ширину слябу, а прес - для вирівнювання «завалених» кромek розкату і забезпечення йому однакової ширини по довжині. Обтискання в пресі становило 50-150 мм.

Аж до середини 40-х років минулого століття стан 1680 залишався кращим ШСГП в Європі, а його продукція за точністю розмірів, механічних властивостей і якості поверхні була кращою для ШСГП в СРСР до середини 70-х років. Після реконструкції 1956-1958 р.р. на стані 1680 прокатку з розширенням слябів перестали використовувати. А прес перестали експлуатувати ще раніше через малу швидкість операції обтиснення і низки конструктивних недоліків. З широким впровадженням у 70-х роках нових ШСГП другого, а потім третього поколінь стан став швидко застарівати.

На даний момент БТЛС 1680 застарів морально і фізично. В процесі кількох модернізацій обладнання його вдається підтримувати на рівні, що забезпечує випуск гарячекатаних листів та штаб за сучасними вимогами. Останнім суттєвим рішенням щодо реконструкції

стану стала установка ППУ типу CoilBox, яка вирішила проблему температурного режиму та температурного клину. Однак використання сучасних технологій прокатки особливо тонких гарячекатаних штаб, контрольованої прокатки, розширення марочного асортименту є проблематичним.

БТЛС 1680 встановлений у цеху гарячої прокатки в одній лінії зі слябінгом 1150, що дозволяє виконувати транзитну прокатку. Склад обладнання стану наведений на рис. 2.1.



1 – рольганг пічний нижній; 2 – методичні печі; 3 – чорновий окалиноломач; 4 чорнові кліті; 5 – проміжний рольганг; 6 ППУ CoilBox; 7 – летучі ножиці; 8 – чистовий окалиноломач, 9 - чистова група клітей; 10 – відвідний рольганг; 11 – установки охолодження штаб; 12,13 – моталки; 14 – системи гідрозбиву окалини; 15 – система охолодження валків

Рисунок 2.1 – Склад обладнання БТЛС 1680 [6]

Нагрівальні методичні печі призначені для нагрівання слябів холодного посаду або підігрівання слябів гарячого посаду до температури прокатки 1180-1240°C. На стані встановлені чотири методичні печі штовхального типу. Печі дворядні шириною 5220 мм та довжиною 31,5 м. Мають газове опалення через 21 інжекційний пальник сумішшю природного, доменного та коксового газів. Посадка і видача слябів з торців печі.

Чорнова група клітей складається з послідовно встановлених окалиноломача, кліті кварто (№1) та трьох універсальних клітей (№2-4) з горизонтальними кварто та вертикальними (еджерними) валками. –

Окалиноломач - це кліть дуо з діаметром валків 900-810 мм для механічної та гідравлічної (водою під тиском) ламки окалини. Сила прокатки 8 МН. Окрім механічного руйнування окалини можливе обтиснення до 25%.

Чорнові кліті мають горизонтальні валки кварто з робочими валками на підшипниках кочення та опорними валками на ПРТ. Натискні механізми електромеханічні, врівноваження валків гідравлічне. Характеристики чорнових клітей наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Характеристики чорнових робочих клітей [6]

№	Потужність головного двигуна, кВт	Тип двигуна	Частота обертання двигуна, об/хв	Частота обертання валків об/хв	Швидкість прокатки, м/с	Відстань до попередньої кліті, м	Натискний механізм		
							кількість	потужність	Частота обертання
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
дуо	2000	МПС 2000-450УЗ	350 - 500	14,6- 20,9	0,65- 0,94		2	9	900
1	6300	СДПЗ-6300-428 УХЛ4	428	22,2	0,93- 1,09	6,25	1	50	875
2	4000	СДПЗ-4000-500 УХЛ4	500	25,5	1,04- 1,14	21,0	2	34	580
3	4000	МП4000-500УЗ-С	400- 600	39,4- 59,1	1,22- 1,83	19,1	2	35	830
4	4000	МП4000-500УЗ-С	400- 600	54,5- 81,5	1,69- 2,53	25,49	2	35	830

Сила прокатки: сили деформації на цій ділянці є максимальними і можуть досягати 25000 кН у першій і 20000 кН у універсальних клітях.

Це зумовлено великою площею контакту металу з валками та значною товщиною заготовки (сляба).

Швидкість прокатки: через великий опір металу деформації та необхідність утримання стабільного профілю, швидкість у чорнових клітях відносно невисока — від 1,5 до 3 м/с.

Момент прокатки та потужність двигунів: для подолання опору металу кліті оснащені потужними електродвигунами 4000 кВт з можливим коефіцієнтом перевантаження 1,5. Високий крутний момент є характерною особливістю чорнової групи.

Вертикальні валки, або як їх називають, вертикальні кліті у трьох останніх клітях призначені для зняття розширень, що виникають при деформації розкату горизонтальними валками. Потужність приводів валків становить 250 кВт [6].

Проміжний рольганг призначений для транспортування розкату від чорнової до чистової групи клітей. Він складається з 41 ролика з індивідуальними приводами, потужність кожного 10 кВт. Довжина рольгангу 50 м. На рольгангу встановлений ППУ CoilBox (рис. 2.2.). Потужність приводу згинальних роликів становить 317 кВт, швидкість до 5 м/с. Формувальний ролик встановлений на хитній рамі з гідравлічним приводом підйому від двох паралельних гідроциліндрів. Гідравлічні приводи переміщення мають також притискний і виштовхувальний ролики. Пристрій має три пари люлечних роликів з приводами потужністю відповідно 317 кВт, 75 кВт, 75 кВт. Три правильно-тягнучі ролики з приводом 75 кВт забезпечують розмотування рулону [6].

Перед чистовою групою встановлені барабанні летучі ножиці для обрізання некондиційних кінців розкату. Вони ріжуть штабу товщиною 18-28 мм при температурі не менш 900°C. Максимальна сила різання 1700 кН, потужність приводу 1000 кВт, максимальна швидкість 2,2 м/с.

1- підвідний рольганг і вхідні бічні напрямні; 3 – вхідний жолоб;  
 4 – згинальні ролики; 5 – формувальний ролик; 6 – люлечні ролики № 1;  
 7 – люлечні ролики № 2; 8 – люлечні ролики № 3; 9 – важіль відгинача;  
 10 – основна рама; 11 - надбудова люлькових роликів; 12 – притискний ролик;  
 13 - виштовхувальний ролик; 14 – бічні напрямні розмотування;  
 15 – теплові екрани; 18 – стабілізатори; 19 - вхідні бічні напрямні кінцевих ножиць;  
 20 – верхній правильний механізм з тягучими роликами; 21 – нижній правильний механізм з тягучими роликами

Рисунок 2.2 – ППУ CoilBox [6]

Чистовий окалиноломач встановлений за ножицями перед чистовою кліттю №5. Це кліть дуо з валками діаметром 600 мм, потужність головного приводу становить 500 кВт. Він призначений виключно для механічного руйнування і змивання окалини і не здійснює технологічних обтиснень.

Чистова група – це неперервна група з шістьох клітей кварто (рис. 2.3), уніфікованих за конструкцією. Потужність головних приводів кожної кліті становить 7000 кВт. Кліті мають литі станини закритого типу. Діаметр робочих валків 630\*585 мм, опорних – 1250/1170 мм. Робочі

валки литі чавунні, опорні куті сталеві. Робочі і опорні валки встановлені на 4-рядних конічних підшипниках, опорні – на ПРТ.

Натискні механізми електромеханічні, врівноваження валків гідравлічне. Допустима сила прокатки становить 20 МН. Характеристики чистових клітей наведені у табл. 2.2 [6].

Рисунок 2.3 – Чистова кліть кварто

Таблиця 2.2 – Параметри чистових клітей [ 6 ]

№	Потужність головного двигуна, кВт	Розмір бочки валків $D_p/D_o \times L$	Частота обертання двигуна, об/хв	Частота обертання валків об/хв	Швидкість прокатки, м/с	Відстань до передньої кліті, м	Натискний механізм		
							кількість	потужність	Частота обертання
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Чист. Окал.	500	598-585 x 1680	315-1000	51,2	0,65-0,94	58,77	2	8	1250
5	7000	630-585/1240-1170 x 1680	50-650 (базова 340)	37,4-69,0	1,16-2,92	6,19	2	46	625

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	7000	630-585/ 1240-1170 x 1680	50-650 (базова 340)	57,8- 107,0	1,89- 4,5	5,84	2	46	625
7	7000	630-585/ 1240-1170 x 1680	50-650 (базова 340)	98,2- 182,0	3,30- 7,67	5,84	2	46	625
8	7000	630-585/ 1240-1170 x 1680	50-650 (базова 340)	135- 250	4,16- 10,88	5,84	2	46	625
9	7000	630-585/ 1240-1170 x 1680	50-650 (базова 340)	173,0- 320,0	5,35- 13,53	5,84	2	46	625
10	7000	630-585/ 1240-1170 x 1680598- 585	50-650 (базова 340)	191,0- 354,0	5,90- 14,97	5,84	2	46	625

Відвідний рольганг розміщений між останньою чистою кліткою і групою моталок і складається з двох частин – до установки охолодження і під установкою охолодження. Перша має довжину 105 м і включає 231 ролик, друга частина має довжину 95 м і 257 роликів. Діаметр роликів 260 мм з приводами кожного ролика потужністю 2 кВт.

Душувальна установка призначена для прискореного охолодження штаб до необхідної температури змотування. Тип охолодження – ламінарне. Вода з ванн верхніх секцій подається на штабу за принципом "водяної завіси", а з ванн нижніх секцій – за принципом "водяного стовпа". Подача води на ванни здійснюється затворами  $\varnothing$  150мм із системою дроселювання пневмоприводу триходовими відсічними клапанами, які керуються повітрям від пневмосистеми. Регулювання витрати води на ваннах верхньої системи грубого охолодження проводиться спарено (на секцію), а на ванни верхньої системи тонкого охолодження та нижні ванни - індивідуально. Робочий тиск води на верхніх ваннах 0,2 МПа, на нижніх 0,3 МПа [6].

Штаба змотується на двох групах моталок по три моталки в кожній.

Перша група (моталки №1-3) призначена для змотування рулонів подвійної маси до 15 т (рис. 2.4,а). Товщина змотуваних штаб до 9 мм,

зовнішній діаметр рулону до 1600 мм. Швидкість змотування 6 – 15 м/с. Це відносно нові ролико-барабанні моталки з чотирма притискними формувальними роликами. Діаметр барабана 750 мм, потужність приводу – 610 кВт. Діаметр формувальних роликів 320 мм, потужність приводів 4x22 кВт [6].

Друга група (моталки №4-6) призначена для змотування рулонів одиничної маси до 7,5 т (рис. 2.4,б). Товщина змотуваних штаб до 6 мм, зовнішній діаметр рулону до 1200 мм. Швидкість змотування до 10,2 м/с. Це старі ролико-барабанні моталки з вісьмома притискними формувальними роликами. Діаметр барабана 700 мм, потужність приводу – 100 кВт. Діаметр формувальних роликів 300 мм, потужність приводів 8x16 кВт [6].

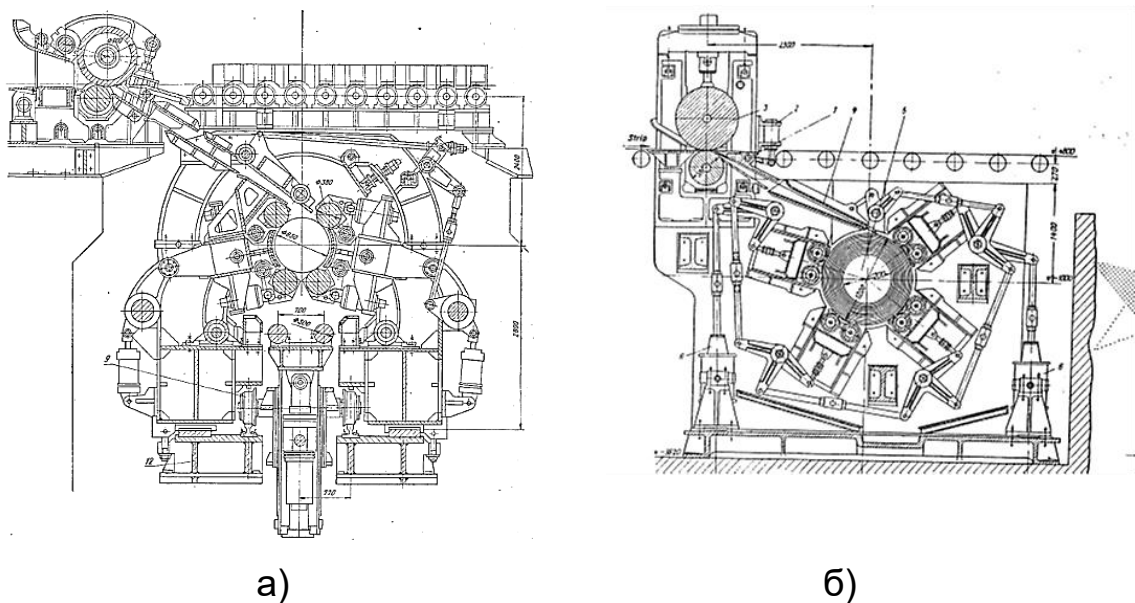


Рисунок 2.4 – Моталка чотирьохроликова №1-3 (а) та восьмироликова № 4-6 (б)

Моталки оснащені зйомниками і кантувачами рулонів, які передають їх на секції відвідних конвеєрів з поворотними столами. Рулони обв'язують на обв'язувальних машинах.

Стан також має додаткове обладнання, призначене для розрізання штаб на листи: два рольганги, встановлені паралельно відвідному рольгангу, на яких встановлені барабанні ножиці.

## 2.2 Прокатка штаб на безперервному тонколистовому стані гарячої прокатки «1680»

Безперервний тонколистовий стан 1680 (БТЛС 1680) гарячої прокатки призначений для виготовлення штаб з вуглецевих та низьколегований марок сталі товщиною 1,5-8 мм, шириною 850-1500 мм, в рулонах вагою до 16 т та в листах довжиною 1400-6000 мм. Марочний склад сталей наведений у табл. 2.3. [6]

Таблиця 2.3 - Сортамент гарячекатаних штаб та листів, що прокатуються на БТЛС 1680 [6]

Група сталі	Товщина штаби, мм	Ширина штаби, мм
Напівспокійні, киплячі, нестаріючі (08Ю)	1,5	970-1030
	1,8	970-1100
	1,9	970-1100
	2,0-2,4	1000-1250
	2,5	860-1250
	2,6-2,9	860-1360
	3,0-3,9	860-1500
	4,0-8,0	860-1500
	8,1-10,0	1000-1520
Спокійні, заспокоєні	2,0-2,4	1000
	2,5-3,1	1000-1250
	3,2-10,0	860-1400
Конструкційна вуглецева для суднобудування (А36)	3,0-6,0	1170-1260

Низьколеговані	2,0-2,9	970-1000	
	3,0-3,9	970-1250	
	4,0-10,0	970-1400	
Високовуглецеві (65Г) для подальшого переділу	2,7-2,9	970-1050	
	3,0-6,0	970-1250	
Продовження табл. 2.3			
Високовуглецеві 45, 55	2,7-3,9	970-1080	
	4,0-6,0	1000-1100	
Сортамент гарячекатаного товстого листа			
Марка сталі	Товщина листа, мм	Ширина листа, мм	Довжина листа, мм
20, 45, 65Г, S355J2, 09Г2С, Ст1-3пс, 08кп, 09Г2Д, S235JR, Ст4пс, Ст5пс	8,0-120,0	1000-1500	2000- 9100
Конструкційна легована 30ХН2МА, 30ХГСА	6,0-8,0	1000-1100	2000- 6000
Легована боровмісна 30MnB5	6,0-8,0	1250	2000- 6000

Товщина, ширина, форма (площинність, серповидність) та якість поверхні гарячекатаних штаб повинні відповідати вимогам ДСТУ 8540:2015, ДСТУ 7808:2015, ДСТУ 2834-94 (ГОСТ 16523-97), ДСТУ 8803:2018, а також технічним умовам та стандартам підприємства.

Відхилення від площинності на 1м довжини прокату, що виготовляється листах товщиною від 1,5 до 3,9 мм, не повинно перевищувати 15 мм, а для прокату товщиною від 4,0 до 10,0мм – 12мм [7].

Для транзитної прокатки використовуються зливки I та II груп марок сталі гарячого та холодного посада (у тому числі зливки плавок із

призначенням для прокатки на «жерсть») та зливки гарячого посаду стали марок 09Г2, 09Г2Д. Для забезпечення мінімальних втрат тепла при транзитній прокатці металу видача злитків з осередків нагрівальних колодязів і прокатка їх на комплексі «Стан слябінг 1150 - БТЛС 1680» має проводитися з однаковим темпом. Узгодження темпів прокатки двох станів здійснюється за допомогою системи узгодження темпу прямої прокатки та стеження за рухом металу від обтискного стану до кліті ДУО стану БТЛС 1680, селекторного зв'язку.

Сляб, нагрітий до необхідної температури, видається з печі і транспортується рольгангом до кліті ДУО і далі до робочих клітей №№ 1, 2, 3 і 4, де обтискається з урахуванням максимально допустимих обтискань (табл.2.4). Температурний режим прокатки слябів подвійної маси у чорновій групі клітей БТЛС 1680 повинен відповідати [6]:

- температура перед кліттю ДУО щонайменше 1070°С
- температура за 4-ю кліттю повинна перебувати в межах 1060 – 1120 °С.

Таблиця 2.4 - Максимальні обтискання по клітях чорнової групи залежно від ширини слябу [6]

Кліть	Максимальні обтискання при прокатці вуглецевих та низьколегованих сталей, %	
	ширина сляба до 1250мм (включно)	ширина сляба понад 1250мм
ДУО	25	20
№ 1	37	35
№ 2	40	37
№ 3	40	37
№ 4	40	37

При транзитній прокатці всього сортаменту та всіх призначень металу видалення окалини проводиться в установках гідрозбиву окалини. Збив окалини проводиться за допомогою води високого тиску, що витікає зі спеціальних сопел, встановлених на гідравлічних

колекторах води високого тиску перед та за кліттю ДУО, за чорновими клітнями №№ 2 та 3 та чистовим окаліноломачем. Для збиття окалини з верхньої та нижньої поверхонь слябів та розкатів встановлено по одному колектору з кожної сторони на всіх гідрозбивах.

Розкат з чорнової групи надходить до летючих ножиць для обрізки переднього та заднього кінця. Обов'язковому обрізанню переднього і заднього кінця розкату піддаються розкату [6]:

- а) прокатувані в чистовій групі на штаби завтовшки від 1,5 до 3мм;
- б) при постачанні металу на експорт у рулонах (незалежно від кінцевої товщини) штаби);
- в) гарячекатані рулони для подальшого переділу в ЦХП;
- г) з видимими дефектними ділянками на головній та хвостовій частині розкатів

Прокатка гарячекатаних штаб проводиться з наступними паузами по кліті №5 [6]:

- при прокатці товщини до 2,35 мм час паузи перед кліттю №5 – 15 секунд.

- при прокатці товщини понад 2,35 мм час пауз перед кліттю №5 складає: для подвійних розкатів 7 секунд, для одинарних розкатів 4 секунди за умови відсутності обмежень щодо стану.

При розподілі обтискань у клітинах чистової групи необхідно контролювати, щоб навантаження на двигуни не перевищували гранично допустимі.

Швидкості прокатки в клітях чистової групи повинні забезпечити умови заданих величин обтискань необхідні температури кінця прокатки для даного профілю та даної групи марок сталі. Забезпечення температури кінця прокатки досягається шляхом зміни швидкості прокатки в клітях чистової групи та товщини підкату в межах допустимих навантажень.

Для отримання штаб з необхідною площинністю та мінімальною поперечною різнотовщинністю застосовується система протизгину робочих валків клітей №№ 8, 9 та 10.

Перед змотуванням в рулони штаби охолоджуються по режимах згідно марки сталі.

Рулони, призначені для подальшого переділу в ЦХП після підйомно-поворотного столу № 1 транспортуються до підйомно-поворотного столу № 2 та після встановлення на ланцюгу конвеєра передаються в ЦХП.

### 2.3 Особливості прокатки штаб товщиною менше 2 мм

Для прокатки штаб товщиною 1,5-2,0 мм використовуються сляби одинарної маси. Спочатку прокатують штаби товщиною 2 мм, потім 1,8 мм і після припрацювання валків 1,5 мм [6].

У чорновій групі прокатку ведуть до товщини 17-18 мм для штаб 1,5 мм, 18-20 мм – для штаб 1,8 мм і 20-23 мм - для штаб 2,0 мм. За технологією, що використовується для штаби товщиною 1,5 мм режим обтискань по клітях чорнової групи наступний: 150 → 130 → 82 → 50 → → 30 → 18 мм [6].

Температура на виході із чорнової групи клітей не повинна бути нижчою за 1100 °С. Для отримання заданого температурного режиму з урахуванням інтенсивного охолодження тонкого підкату гідрозбив використовують тільки у окалиноломачі ДУО, у інших клітях чорнової групи подачу води гідрозбивом відключають. Обов'язковим є використання ППУ CoilBox. Швидкість змотування становить 3 м/с. Це дозволяє зберігати при передачі рулонів із чорнової в чистову групу темп прокатки, що відповідає прокатці без перемотування на швидкості 2 м/с.

Кінці розкатів перед чистовою прокаткою відрізаються барабанними ножицями на довжину  $\approx$  150 мм. Швидкість різання

становить 2,2 м/с, ця швидкість дорівнює швидкості розмотування рулоні на CoilBox. Перед входом у кліть №5 швидкість знижують до швидкості прокатки.

Режим обтиснень у чистовій кліті для штаб товщиною 1,5мм, який зараз має місце, складає: 18 → 10 → 5 → 3,1 → 2,18 → 1,69 → 1,5 мм. Швидкість у останній кліті – 8 м/с [6].

Для забезпечення допустимої поперечної різнотовщинності і площинності штаб використовують верстатне профілювання валків і протизгин в останніх трьох клітях. Тиск мастила в гідроциліндрах протизгину не більше 20 МПа.

Температура кінця прокатки не регламентується. Температура змотування не регламентується також, рулони змотуються без попереднього охолодження на відповідному рольгангу.

Рекомендовані сучасні рішення для прокатки штаб товщиною менше за 2 мм, такі як прокатка з прискоренням у чистовій групі клітей, потребують додаткового розгляду. По-перше, в цьому випадку має місце аеродинамічне злітання штаби на рольгангу на швидкостях вище за 10 м/с, тобто створювати прискорення можна після захоплення штаби моталкою. В цьому випадку внаслідок довжини відповідного рольгангу 220 м при довжині штаби біля 350 м прокатується з прискоренням тільки третина її довжини, хоча така можливість існує. Більш перспективною така схема може бути в разі освоєння прокатки штаби зі слябів подвійної маси.

Важливим є термічний фактор: тонкий метал швидко охолоджується. Щоб закінчити прокатку при температурі не нижче 850°C, необхідно максимально скорочувати час перебування металу в чистовій групі, тобто працювати на граничних швидкостях. При товщині штаби менше 2 мм виникає конфлікт чинників:

- Швидке охолодження: Через велику площу поверхні тонка штаба втрачає тепло дуже швидко.

- Необхідність прискорення: Щоб утримати температуру в межах 850 -900°C (для завершення фазових перетворень), необхідно збільшувати швидкість прокатки.

Висока швидкість деформації при відносно низькій температурі призводить до пікових навантажень на валки, але дозволяє отримати дуже дрібне зерно фериту, що забезпечує високу міцність сталі при збереженні її здатності до штампування.

У чистовій групі БТЛС-1680 механічне обладнання працює в нерозривному зв'язку з цифровими системами контролю. Будь-яке розсинхронування в роботі клітей приводить до браку по товщині або площинності, тому надійність приводів та систем охолодження валків є пріоритетом для цеху гарячої прокатки ПАТ «Запоріжсталь».

### 3 РОЗРАХУНКОВО\_АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Розрахунки та оптимізація режимів прокатки

Однією з основних задач при розробці технології є розробка та обґрунтування раціонального режиму деформації при гарячій прокатці штаби збільшеної ширини  $B = 1200$  мм з кінцевою товщиною  $h_k = 1,5 - 2$  мм з вихідної заготовки товщиною  $H_0 = 150$  мм з конструкційної вуглецевої сталі звичайної якості. Як матеріал для дослідження було обрано вуглецеву сталь марки Ст5сп, яка має більший опір деформації у порівнянні з іншими вуглецевими сталями. Розрахунок спрямований на перевірку завантаження механічного обладнання клітей прокатного стану в умовах підвищеного розширення сортаменту за шириною, а також на забезпечення стабільності енергосилових параметрів.

Розрахунок енергосилових параметрів при гарячій прокатці штаби в кожній робочій кліті виконаємо за методикою роботи [ 8 ]. Обтиснення у вертикальних клітях, спрямоване на усунення уширення, не розраховуємо. Попередньо приймаємо режими обтиснень, рекомендовані для клітей стану (див. п.2.2).

Вихідними даними є: геометричні розміри перерізу прокату перед і після прокатки  $h_0, h_1, b$  (внаслідок обтиснення у вертикальних клітях та відсутності розширення у чистовій групі приймаємо ширину  $b$  постійною); температура прокатки  $t^\circ\text{C}$ ; швидкість прокатки  $V$ ; матеріал штаби; наявність натяжінь, яка задається відповідними коефіцієнтами  $\sigma_{(0,1)}/2K_c$ , коефіцієнт тертя  $f$  при сталій прокатці (приймаємо для чорнових клітей  $f=0,25$ , для чистових  $f=0,22$ ), радіус робочого валка  $R$  (див. табл. 2.1,2.2)

Знаходимо показники деформації та параметри осередку деформації: абсолютне та відносне обтиснення  $= h_0 - h_1$ ;  $\varepsilon = \Delta h / h_0$ ; довжина осередку деформації  $L = \sqrt{R * \Delta h}$ ; середня товщина прокату

$(h_0 + h_1)/2$ ; відношення  $L/h_{cp}$ ; кут захоплення (рад)  $\alpha = (\Delta h/R)^{0.5}$ ; швидкість деформації  $U = V * \varepsilon / L$ ;

Знаходимо показники напруженого стану: середнє напруження текучості  $\sigma_{TC}$  в осередку деформації в залежності від матеріалу, ступеню, швидкості та температури деформації за графіками або аналітично  $\sigma_{TC} = S * \sigma_0 * U^{a1} * (\frac{20}{3} \varepsilon)^{a2} * (\frac{t}{1000})^{a3}$  (формула Андреюка), в останньому випадку для матеріалу задаються параметри  $S, \sigma_0, a_1, a_2, a_3$ ; подвоєний опір чистому зсуву  $2K_c = 1,15 * \sigma_{TC}$ ; коефіцієнт напруженого стану матеріалу, який залежить від  $L/h_{cp}$ :

$$\text{при } L/h_{cp} < 1 \quad n_\sigma = 1 + 1.5 * (1 - L/h_{cp})^3;$$

$$\text{при } 1 < L/h_{cp} < 2.5 \quad n_\sigma = 1 + 0.2 * (L/h_{cp} - 1);$$

$$\text{при } L/h_{cp} > 2.5 \quad n_\sigma = 1 + 0.5 * f * (L/h_{cp} - 1);$$

середнє нормальне контактне напруження в осередку деформації  $p_{cp} = n_\sigma * 2K_c$ .

Знаходимо енергосилові параметри: сила прокатки  $P = p_{cp} * b * L$ ; для визначення моменту прокатки знаходимо коефіцієнт плеча в залежності від  $L/h_{cp}$ :

$$\text{при } L/h_{cp} < 0,7 \quad \psi = 0,6 - 0,3 * (0,5 - L/h_{cp})^2;$$

$$\text{при } 0,7 < L/h_{cp} < 2.5 \quad \psi = 0,6 - 0.15 * (L/h_{cp} - 0,7)^{0,5};$$

$$\text{при } L/h_{cp} > 2.5 \quad \psi = 0,44 - 0,022 * (L/h_{cp} - 2,5)^{0,5} * 0,0044 (10 - \alpha);$$

момент прокатки  $M = 2P * \psi * L$ ; потужність прокатки  $N = M * \omega = M * V/R$ .

При прокатці у чистовій безперервній групі слід враховувати зміну швидкостей прокатки пропорційно обтисканню  $V_i = V_{i-1} * h_{i-1} / h_i$

З використанням цієї методики розроблена програма в Excel, по якій розраховані режими обтиснень при прокатці сталі Ст.5 сп товщиною 1,5 мм шириною відповідно 1000 і 1200 мм. Результати занесені в табл. 3.1 – 3.3

Всі вихідні та розраховані параметри існуючого режиму прокатки штаби 1,5 мм зведені в табл. 3.1, оптимізованого режиму прокатки зведені в табл. 3.2., а режим прокатки штаби 1,5x1200мм – в табл. 3.3

Таблиця 3.1 – Режими прокатки штаби 1,5 x1000мм (існуючий)

№ кліти	H0 мм	H1 мм	ΔH мм	ε	L мм	T°C	V м/с	2Kc МПа	пσ	ρ ср МПа	P (МН)	M кНм	N кВт
дуо	150	130	20	0,133	95	1120	0,65	54	1,05	65,3	6,194	693,4	1002
№1	130	82	48	0,37	150,2	1115	1,05	78,8	1,08	97,8	14,7	2075	4636
№2	82	50	32	0,39	116,3	1110	1,12	98,2	1,15	112,9	13,138	1351	3561
№3	50	30	20	0,4	79,3	1105	1,5	110,5	1,2	133	10,55	721	3432
№4	30	18	12	0,4	61,2	1100	1,9	120,8	1,19	143,7	8,838	522	3146
№5	18	10	8	0,44	50,2	1100	1,33	120,8	1,28	154,3	7,763	358,5	1365,8
№6	10	5	5	0,5	39,7	1060	2,4	158,7	1,47	233,3	9260	327	2076
№7	5	3,1	1,9	0,38	24,4	1020	3,87	193,2	1,55	299	7329	160	1960
№8	3,1	2,18	0,92	0,3	17	980	5,5	224,5	1,6	359,3	6116	91,6	1600
№9	2,18	1,8	0,38	0,17	10,9	940	6,7	234,7	1,49	349,7	3,826	37,3	792,5
№10	1,8	1,5	0,3	0,17	9,7	900	8	279	1,53	426,7	4,118	35,7	907

Таблиця 3.2 – Режими прокатки штаби 1,5 x1000мм (розроблений)

№ кліти	H0 мм	H1 мм	ΔH мм	ε	L мм	T°C	V м/с	2Kc МПа	пσ	ρ ср МПа	P (МН)	M кНм	N кВт
дуо	150	130	20	0,133	95	1120	0,65	54	1,05	65,3	6,194	693,4	1002
№1	130	82	48	0,37	150,2	1115	1,05	78,8	1,08	97,8	14,7	2075	4636
№2	82	50	32	0,39	116,3	1110	1,12	98,2	1,15	112,9	13,138	1351	3561
№3	50	30	20	0,4	79,3	1105	1,5	110,5	1,2	133	10,55	721	3432
№4	30	18	12	0,4	61,2	1100	1,9	120,8	1,19	143,7	8,838	522	3146
№5	18	10,4	7,6	0,42	48,9	1100	1,15	118,3	1,26	149,1	7,355	328,4	1199
№6	10,4	6,2	4,2	0,4	36,4	1060	1,93	148	1,37	203	7,317	242	1482
№7	6,2	3,9	2,3	0,37	26,9	1020	3,07	182,8	1,55	299	7,237	175	1708
№8	3,9	2,55	1,35	0,35	20,6	980	4,7	225	1,59	358	7,368	134,1	2001
№9	2,55	1,8	0,75	0,29	15,3	940	6,7	268	1,66	446	6,897	91,9	1954
№10	1,8	1,5	0,3	0,17	9,7	900	8	279	1,58	440,6	4,283	36,9	937

Таблиця 3.3 Режими прокатки штаби 1,5 x1200мм (розроблений)

№ кліти	H0, мм	H1, мм	ΔH мм	ε	L мм	T,°C	V м/с	2Kc МПа	пσ	ρ ср МПа	P(МН)	M кНм	N кВт
Дуо	150	130	20	0,133	95	1120	0,65	54	1,05	65,3	7,4	832,2	1202
1	130	82	48	0,37	150,2	1115	1,05	79	1,08	98,2	17,6	2490,4	5563,6
2	82	50	32	0,39	116,6	1110	1,12	85,4	1,15	113	15,8	1658,5	4370,6
3	50	30	20	0,4	79,4	1105	1,5	96,4	1,2	133	12,7	864,8	4118
4	30	18	12	0,4	61,5	1100	1,9	105	1,2	145	10,7	631,3	3807,6
5	18	10	8	0,44	50,2	1100	1,2	105,1	1,3	157,1	9,5	437	1664,6
6	10	6	4	0,4	35,5	1060	2	130	1,4	208,8	8,9	284,1	1803,8
7	6	3,8	2,2	0,37	26,3	1020	3,16	159,5	1,48	271,5	8,6	203,2	2038,4
8	3,8	2,5	1,3	0,34	20,2	980	4,8	196,3	1,6	361,2	8,8	156,2	2380,5
9	2,5	1,8	0,7	0,28	14,8	940	6,7	230,8	1,6	424,7	7,6	98,9	2103,2
10	1,8	1,5	0,3	0,17	9,7	900	8	242,5	1,54	429,5	5	42,9	1088,6

На рис. 3.1 -3.4 наведені порівняльні діаграми обтискань та енергосилових параметрів для сортаменту 1,5x1000 мм, а на рис. 3,5-3,8 – розподіл обтискань та енергосилових параметрів для сортаменту 1,5x1200 мм.

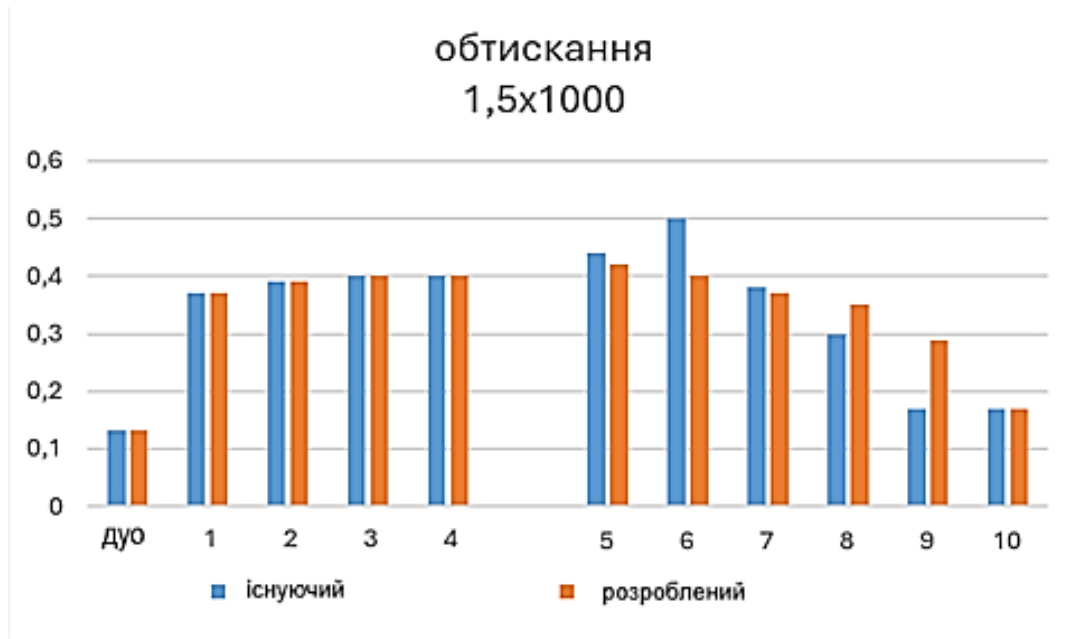


Рисунок 3.1 – Розподіл обтискань по клітках для штаби 1,5x1000 мм



Рисунок 3.2 – Розподіл сили прокатки по клітках для штаби 1,5x1000 мм

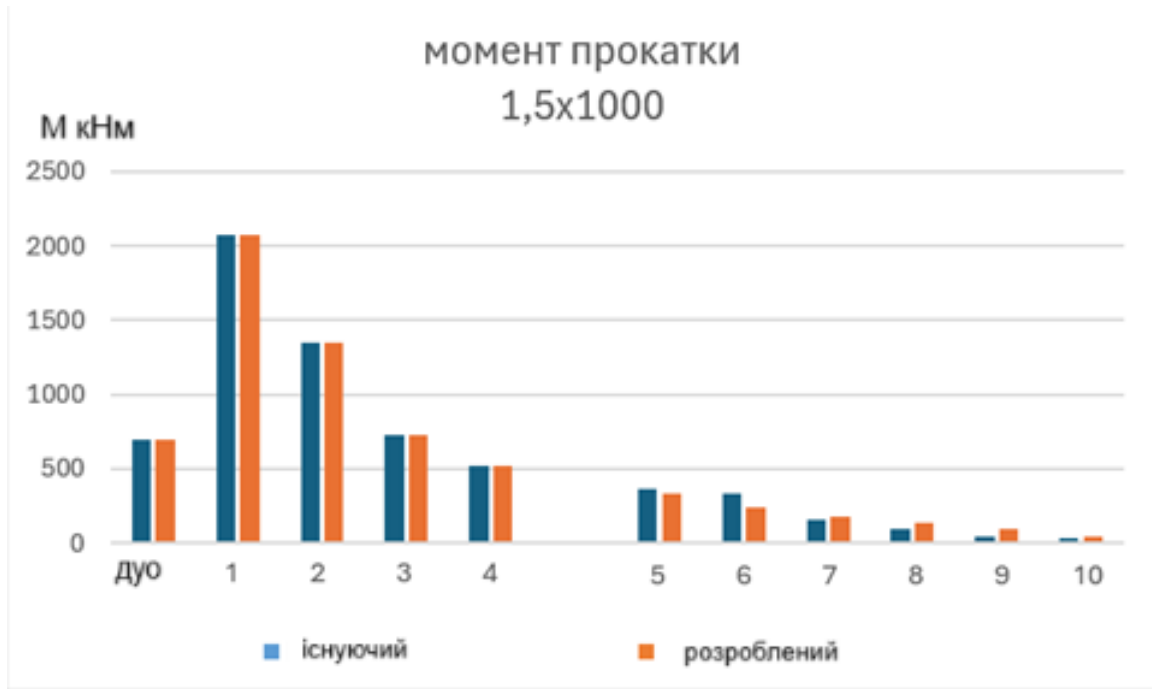


Рисунок 3.3 – Розподіл моментів прокатки по клітях для штаби 1,5x1000 мм

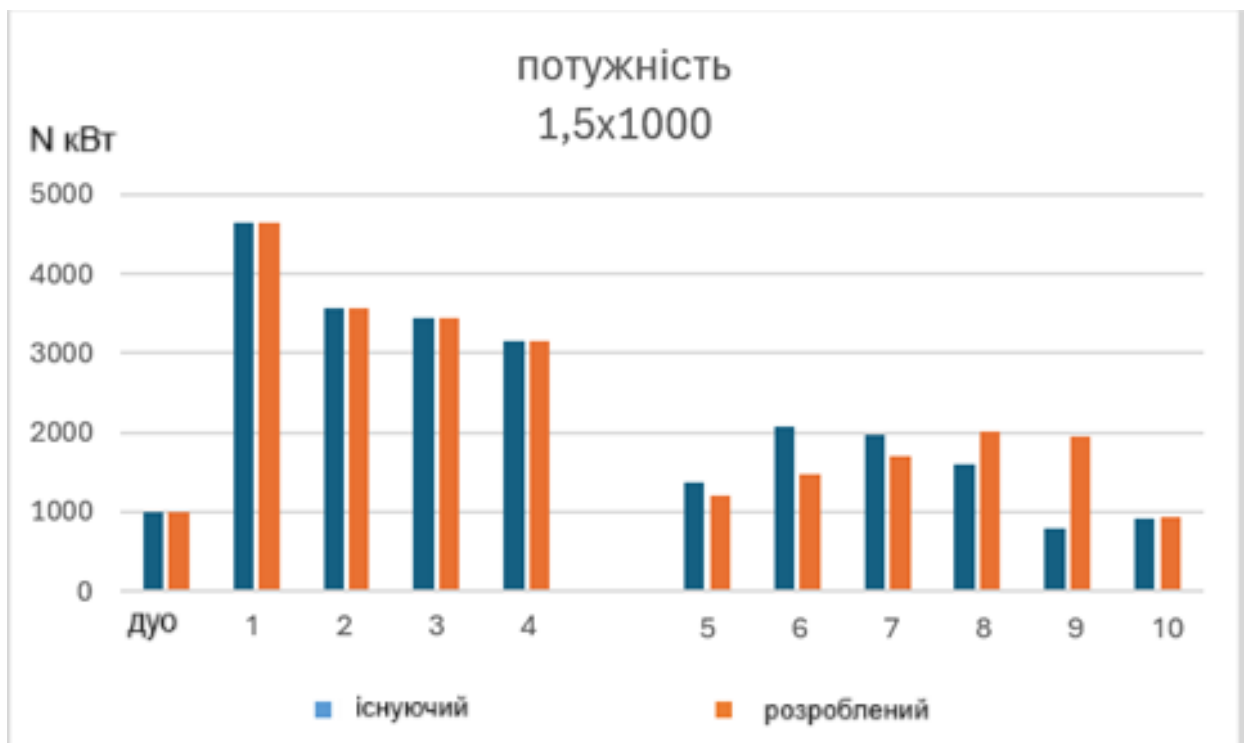


Рисунок 3.4 – Розподіл потужностей по клітях для штаби 1,5x1000 мм

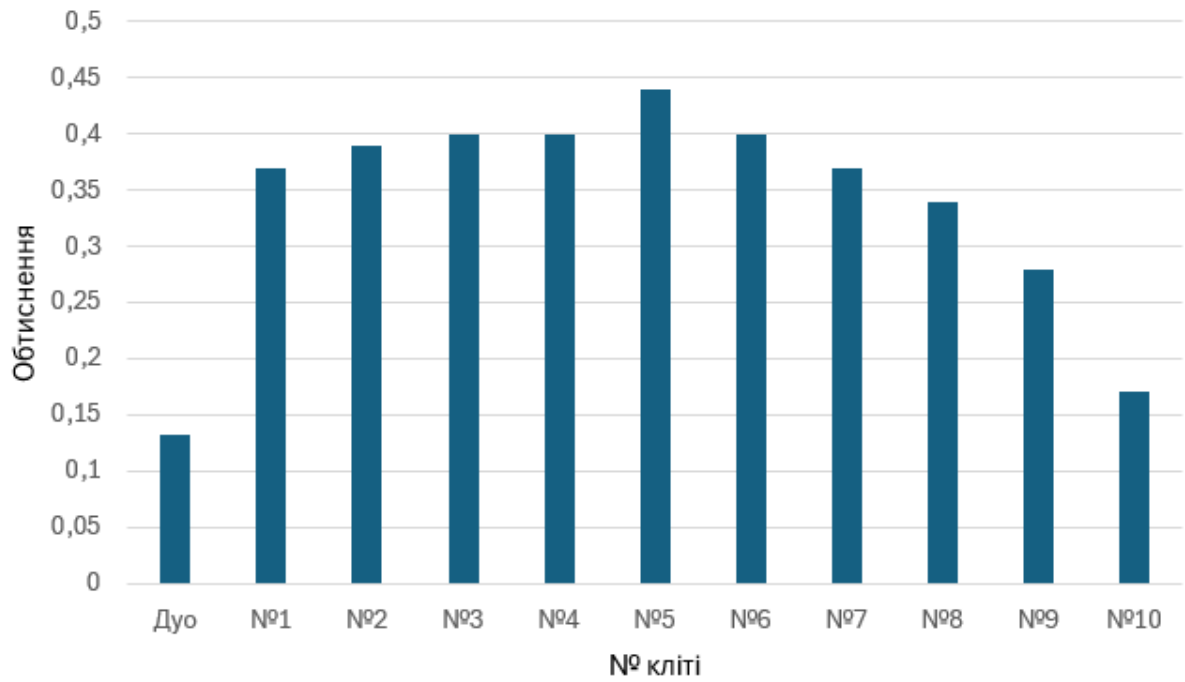


Рисунок 3.5 – Розподіл обтиснення по клітям 1,5x1200 мм

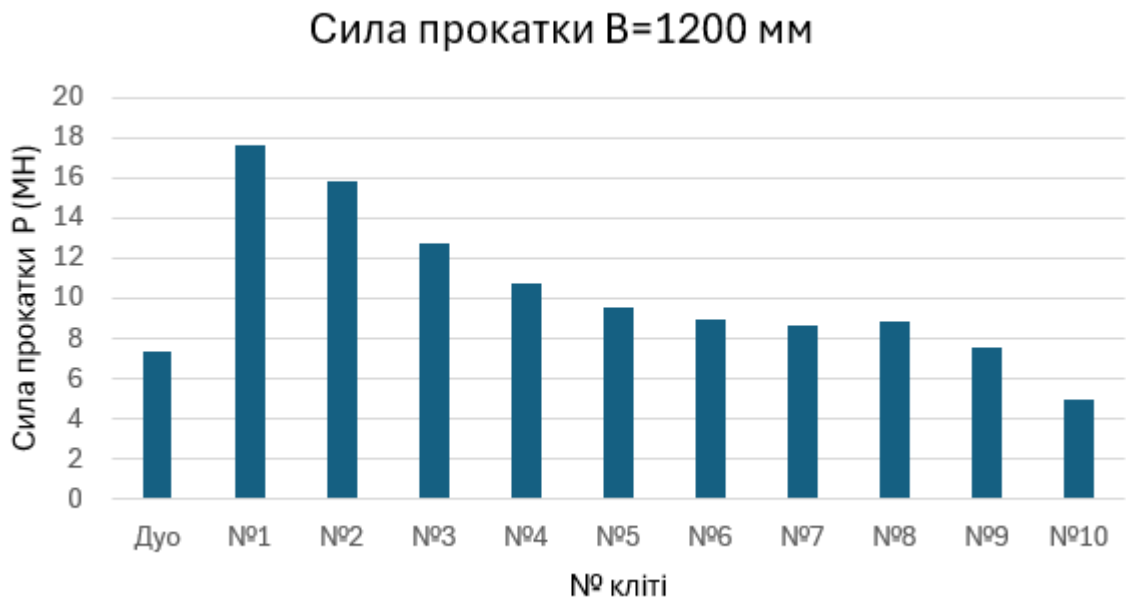


Рисунок 3.6 – Розподіл сили прокатки по клітям, 1,5x1200 мм



Рисунок 3.7 – Розподіл моментів прокатки по клітям, 1,5x1200 мм

Аналіз енергосилових параметрів при прокатці штаби шириною 1200 мм зі сталі Ст5сп підтвердив надійність розробленого режиму обтиснень. Незважаючи на загальне зростання максимального зусилля в кліті №1 до 17,6 МН та максимальної потужності до 5563,6 кВт, параметри залишаються в межах безпечної експлуатації обладнання стану 2000. Оптимізований режим дозволяє стабільно вести прокатку широкого сортаменту з дотриманням жорсткого температурного вікна кінця прокатки (850-900 °С).

Аналогічні розрахунки були виконані для штаби 2,0x1200 мм. Результати розрахунків зведені в табл. 3.4, а графіки завантаження клітей приведені на рис. 3.9-3.12

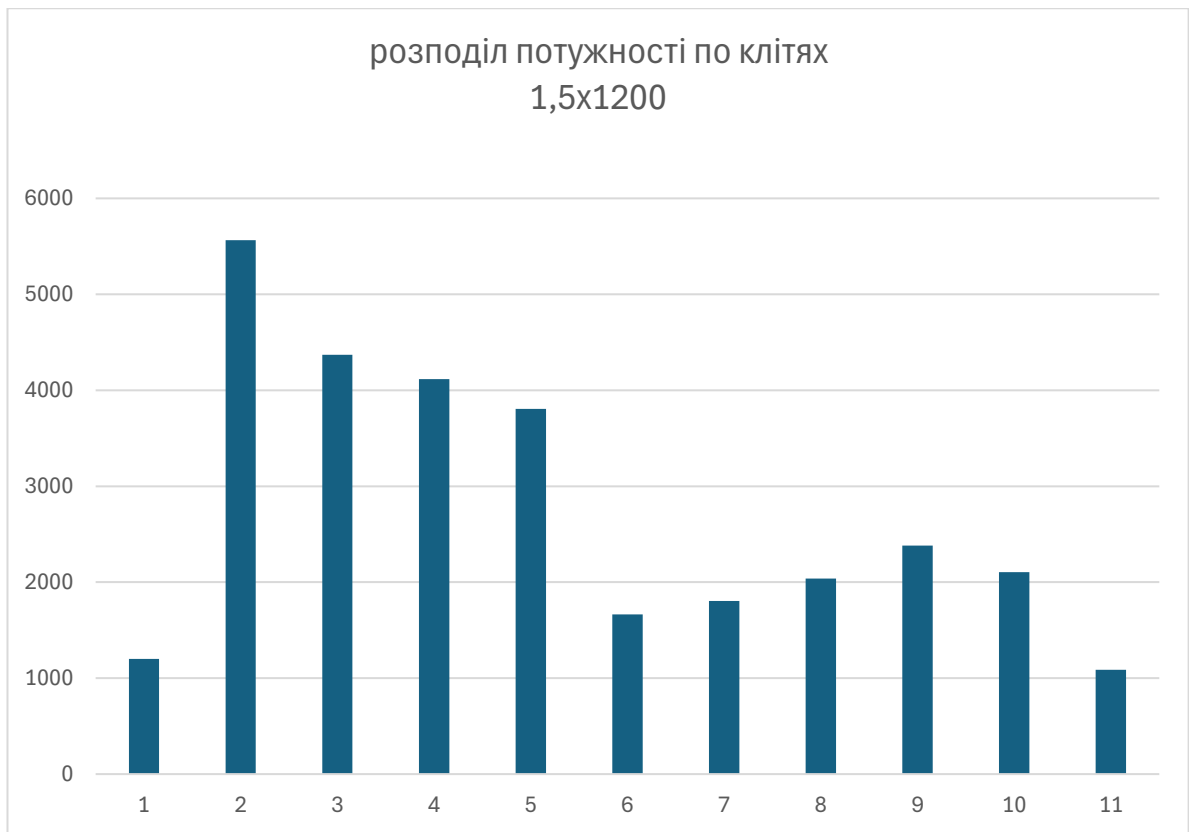


Рисунок 3.8 – Розподіл потужностей по клітям, 1,5x1200 мм

Таблиця 3.4 - Режими прокатки штаби 2,0 x1200мм (розроблений)

№кліті	H0	H1	ΔH	ε	L	L/Hср	T	V	ρ ср	P (МН)	M	N
дуо	150	130	20	0,133	95	0,677	1120	0,65	65,3	6,194	693,4	1002
№1	130	81	48	0,37	150,2	1,43	1115	1,05	99,3	18,09	2580	5765
№2	81	57	22	0,27	96,7	1,36	1110	1,12	99,1	12,018	1141	3006
№3	57	36	20	0,33	79,3	1,59	1105	1,42	116,4	11,949	874,6	3943
№4	36	22	12	0,34	61,5	1,59	1100	1,9	139,6	11,878	646,7	3901
№5	22	13	8	0,41	17,5	3,04	1080	1,23	151,5	9,679	481	1879
Продовження табл. 3.4												
№6	13	7,8	5,2	0,4	40,4	3,89	1050	2	205,7	9,61	355	2257
№7	7,8	5	2,8	0,36	29,7	4,64	1010	3,19	259	9,24	247	2502
№8	5	3,3	1,7	0,34	23,1	5,58	970	4,84	343,5	9,538	196,4	3018
№9	3,3	2,3	1	0,3	14,9	6,9	930	6,95	435,2	9,384	146,5	3234
№10	2,3	2	0,3	0,13	9,72	4,52	880	8	380,7	4,441	38,8	986,7



Рисунок 3.9 – Розподіл обтиснення по клітям 2,0 x1200 мм



Рисунок 3.10– Розподіл сили прокатки по клітям 2,0 x1200 мм

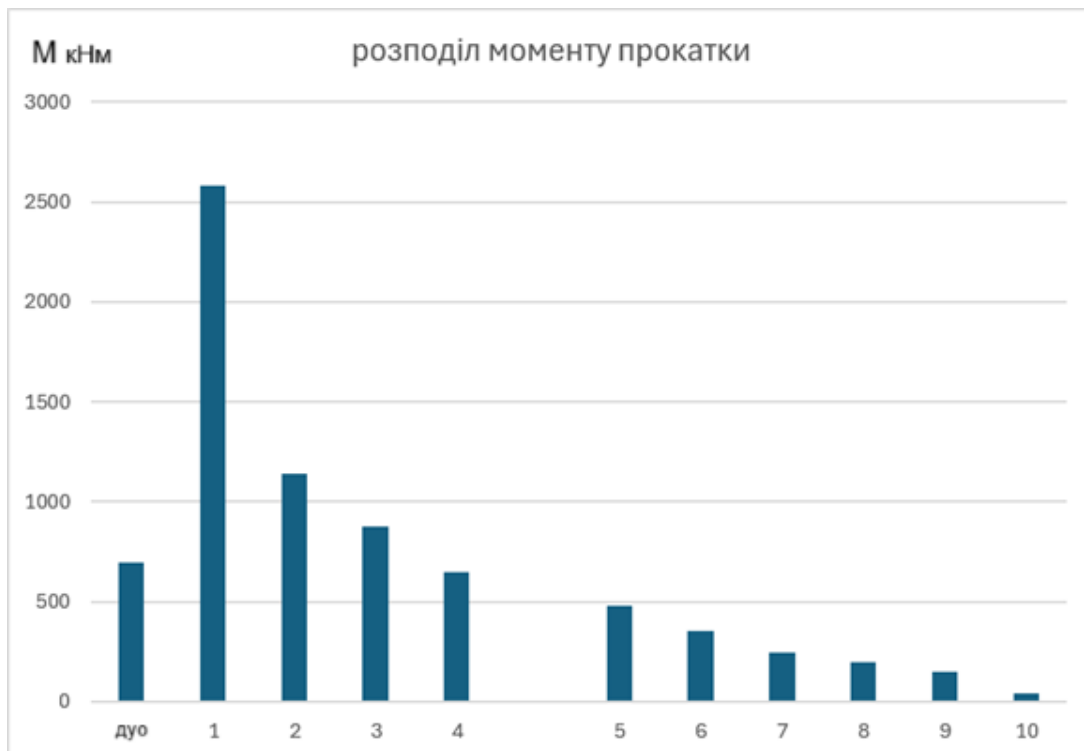


Рисунок 3.11– Розподіл моментів прокатки по клітям 2,0 x1200 мм



Рисунок 3.12 – Розподіл потужностей прокатки по клітям (2,0 x1200 мм)

### 3.2 Розрахунок продуктивності

Розрахунок продуктивності ведемо для сортаменту 2,0x1200 мм

Годинну продуктивність знаходимо по формулі [1]:

$$A = \frac{3600 \cdot m}{T_{\text{ц}}} \quad (3.1)$$

де,  $T_{\text{ц}}$  - час прокатки + час затримки,  $m$  – маса заготовки.

Знаходимо довжину штаби за формулою:

$$L = \frac{m}{(\rho \cdot h_{10} \cdot b)} \quad (3.2)$$

де,  $\rho = 7,85 \text{ т/м}^3$  – густина сталі;  $h$  – товщина штаби в останній кліті;  
 $b$  – ширина штаби.

З формули (3.2) знаходимо масу слябу:

$$m = \rho \cdot h_0 \cdot b \cdot L \quad (3.3)$$

$$m = 7,85 \cdot 0,15 \cdot 1,2 \cdot 4,7 = 6,6 \text{ т}$$

Тоді довжина штаби  $L_{10} = 6,6 / (7,85 \cdot 0,002 \cdot 1,2) = 350 \text{ м}$

Визначаємо час прокатки, який однаковий для усіх клітей чистової групи:

$$T_M = \frac{L}{V_{10}} \quad (3.4)$$

де,  $L$  – довжина штаби,  $V$  – швидкість виходу з кліті. №10

$$T_M = \frac{350}{8} = 43,8 \text{ с}$$

Визначаємо час циклу  $T_{\text{циклу}} = T_m + \sum T_n + 5 \text{ с (пауза)}$ , де  $T_n = 5,840/V_n$  (5840 мм – відстань між клітями), швидкості по клітях чистової групи беремо з табл. 3.3

$$T_5 = \frac{5,840}{1,2} = 4,9 \text{ с}$$

$$T_6 = \frac{5,840}{2} = 2,92 \text{ с}$$

$$T_7 = \frac{5,840}{3,16} = 1,8 \text{ с}$$

$$T_8 = \frac{5,840}{4,8} = 1,2 \text{ с}$$

$$T_9 = \frac{5,840}{6,7} = 0,87 \text{ с}$$

Знаходимо час циклу:

$$T_{\text{ц}} = 43,8 + 4,9 + 2,92 + 1,8 + 1,2 + 0,87 + 5 = 61,21 \text{ с}$$

Будуємо графік Адамецького для чистової групи клітей

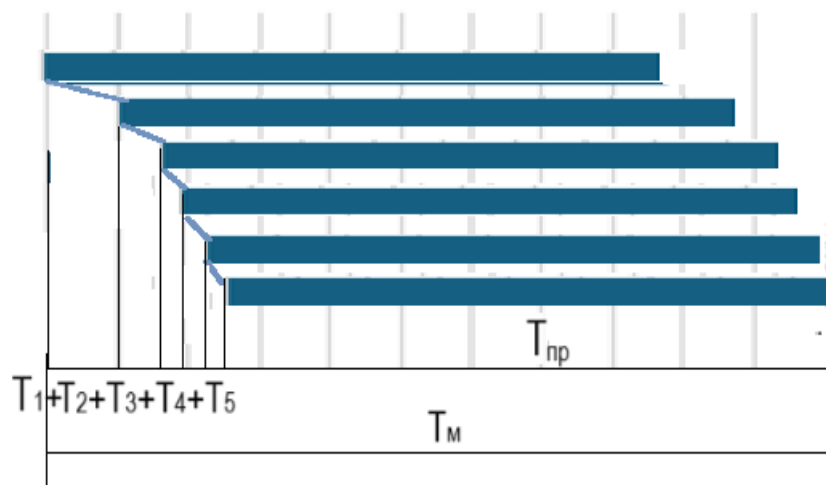


Рисунок 3.13 - Графік Адамецького для чистової групи клітей

Визначаємо продуктивність за годину:

$$A = \frac{3600 \cdot 6,6}{61,21} = 388,1 \text{ т/год}$$

Річна теоретична продуктивність при двозмінному режимі роботи по даному сортаменту:

$$A = 5600 \cdot 388,1 = 2203040 \frac{\text{т}}{\text{рік}} = 2,2 \text{ млн. т/рік}$$

Визначимо час прокатки однієї штаби, необхідний для визначення інтервалів задачі заготовки на стан. Для цього додатково до розрахованого часу прокатки у чистовій групі знайдемо час прокатки у чорновій групі.

Знаходимо довжини розкатів у клітках чорнової групи.

$$L_i = \frac{m}{(\rho \cdot h_i \cdot b)}$$

Дані зводимо у табл.

Знаходимо час прокатки у кожній чорновій клітці

$$T_{mi} = L_i / V_i$$

Дані зводимо у табл. 3,5

Знаходимо час на передачу розкату з клітці у клітці

$$T_{ij} = L_{ij} / V_i$$

де  $L_{ij}$  - відстань між клітками (див. табл. 2.1)

Таблиця 3.5 – Показники часу прокату учорнових клітях

№ кліті	OK	1	2	3	4
$L_i$ , м	5,38	10,37	14,75	23,35	38,21
$V_i$ , м/с	0,65	1,05	1,12	1,42	1,9
$T_i$ , с	8,3	9,9	13,1	13,4	20,1

$$T_{01} = L_{01} / V_0 = 6,25 / 0,65 = 9,6 \text{ с}$$

$$T_{12} = L_{12} / V_1 = 21 / 1,05 = 20 \text{ с}$$

$$T_{23} = L_{23} / V_2 = 19,1 / 1,12 = 17 \text{ с}$$

$$T_{34} = L_{34} / V_3 = 25,49 / 1,42 = 18 \text{ с}$$

$$T_{45} = L_{пр} / V_{пр} = 50 / 2 = 25 \text{ с}$$

Повний час прокатки штаби

$$T = \sum T_i + \sum T_{ij} + T_{ц} = 192 \text{ с} = 3,2 \text{ хв}$$

Будуємо графік Адамецького для часу прокатки однієї штаби.

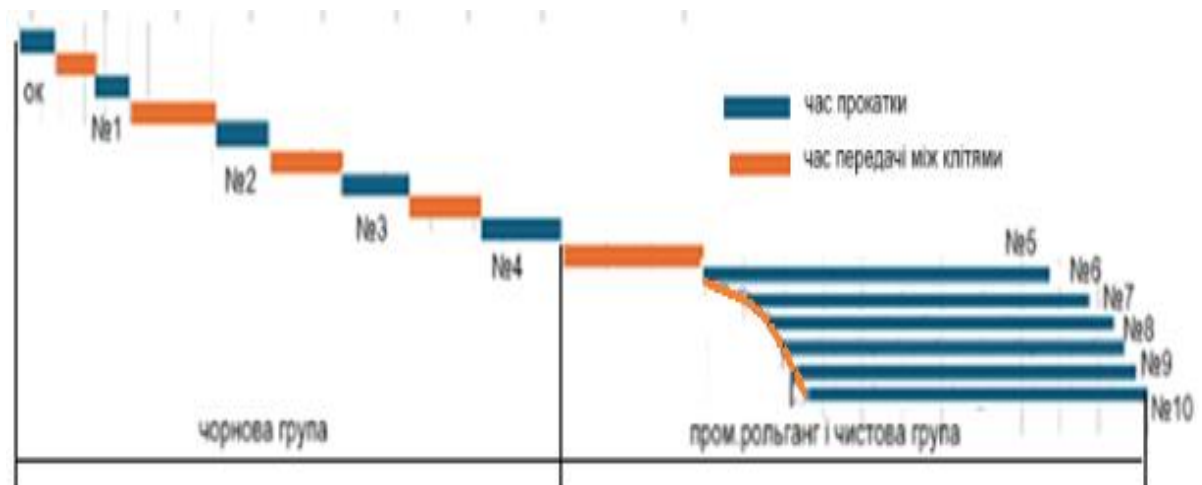


Рисунок 3.14 - Графік Адамецького для повної прокатки однієї штаби

### 3.3 Розрахунок валків на міцність і деформацію

Визначимо напруження у валках та деформацію валків кварто клітей чистової групи при прокатці заданого сортаменту.

Розрахункова схема валків кварто показана на рис. 3.15

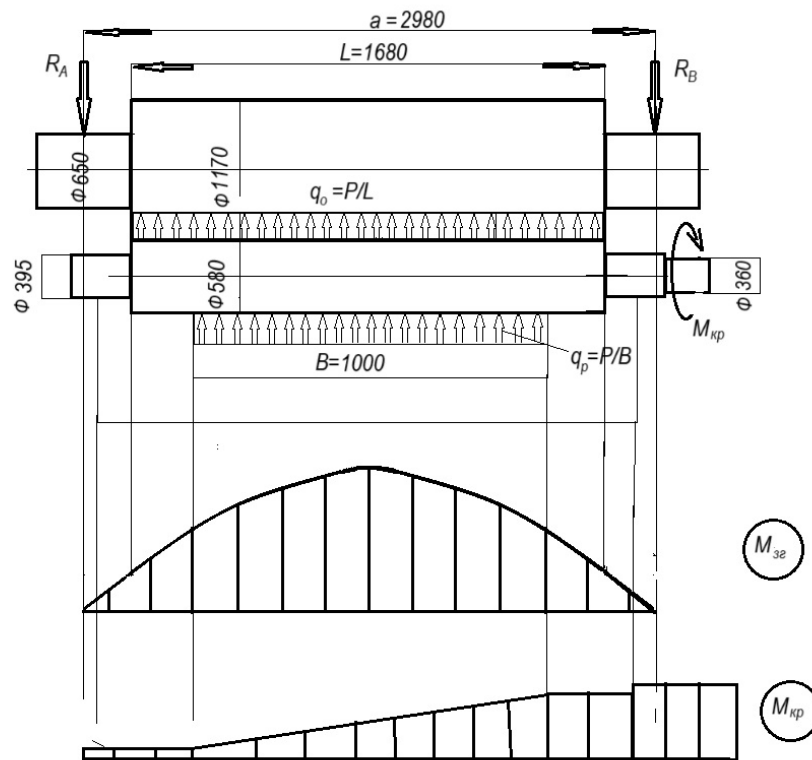


Рисунок 3.15 – Розрахункова схема та епюри згинального та крутного моментів

В клітях кварто основне навантаження згину сприймають опорні валки. Тому на згин розрахуємо опорний валок.

Перший небезпечний переріз з максимальним згинальним моментом  $M_1$  знаходиться посередині бочки валка [9].

$$M_1 = (P/4) \cdot (a - L/2) = (9500000/4) \cdot (2980 - 1680/2) = 5082500000 \text{ Н мм}$$

Напруження згину в першому перерізі

$$\sigma_1 = M_1 / (0,1 D^3) = 5082500000 / 0,1 \cdot 1170^3 = 31,73 \text{ МПа}$$

Другий небезпечний переріз зі згинальним моментом  $M_2$  знаходиться в місці переходу шийки в бочку [9]:

$$M_2 = (P/2) \cdot (a-L)/2 = (9500000/2) \cdot (2980 - 1680)/2 = 2\,992\,500\,000 \text{ Н мм}$$

Напруження згину в першому перерізі

$$\sigma_2 = M_2 / (0,1 d^3) = 2\,992\,500\,000 / 0,1 \cdot 650^3 = 108,9 \text{ МПа}$$

Напруження не перевищують допустимих  $[\sigma] = 140 \text{ МПа}$ . Робочий валок розраховуємо на міцність хвостовика від крутного моменту  $M_{кр} = 437 \text{ кН м}$

Для хвостовика з лискою [9], розміром  $t = 0,7 d = 0,7 \cdot 380 = 265 \text{ мм}$

$$\tau_{кр} = \frac{M}{\beta \cdot t^3},$$

де  $\beta = 0,291$ , тоді

$$\tau_{кр} = 437000000 / 0,291 / 265^3 = 78,7 \text{ МПа}$$

Контактне напруження між робочим та опорним валками [9]:

$$\begin{aligned} \sigma_k &= 0,418 (P/L * (E_{оп} * E_p / (E_{оп} + E_p)) * (R_{оп} + R_p) / R_{оп} * R_p)^{0,5} \\ \sigma_k &= 0,418 (9500000/1680 * 210000 * 160000 / (210000 + 160000)) * \\ &\quad * (585 + 290) / 290 * 585)^{0,5} = 679 \text{ МПа} \end{aligned}$$

де  $E_{оп} = 210000 \text{ Н/мм}^2$ ,  $E_p = 160000 \text{ Н/мм}^2$  – модулі пружності сталевого опорного та чавунного робочого валків.

Деформація валків кварто складається з суми прогину валків, пружного сплюснення контакту робочого та опорного валків та пружного сплюснення робочого валка та контакті з металом.

Прогин опорного валка складається із прогину від згинального моменту посередині бочки  $y_1$  та від сили, що перерізає  $y_2$ , [9]

$$y_1 = \frac{P}{384 \cdot E \cdot I_1} \cdot \left[ 8 \cdot a^3 - 4 \cdot a \cdot L^2 + L^3 + 64 \cdot c^2 \cdot \left( \frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right]$$

$$y_2 = \frac{P}{\pi \cdot G \cdot D^2} \cdot \left[ a - \frac{L}{2} + 2 \cdot c \cdot \left( \frac{D^2}{d^2} - 1 \right) \right]$$

Тоді

$$y_1 = \frac{P}{384 \cdot E \cdot I_1} \cdot \left[ 8 \cdot 2980^3 - 4 \cdot 2980 \cdot 1680^2 + 1680^3 + 64 \cdot 650^2 \cdot \left( \frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right] = 0,23 \text{ мм}$$

де  $I_1 = \pi D^4/64 = 91\,984\,223\,321,7 \text{ мм}^4$  – момент інерції перерізу бочки валка

де  $I_2 = \pi d^4/64 = 8\,762\,405\,056,5 \text{ мм}^4$  – момент інерції перерізу шийки валка

$$y_2 = 9,5 \cdot 10^6 \cdot (2980 - 1680/2 + 2 \cdot 650 \cdot (1170^2 / 650^2 - 1)) / \pi / 85000 / 1170^2 = 0,13 \text{ мм}$$

сумарний прогин  $y = y_1 + y_2 = 0,36 \text{ мм}$

Визначимо частину прогину, що припадає на ширину штаби і визначає поперечну різновтовщинність [9]:

$$\Delta y_1 = P \cdot (12 a^3 - 7 b^3) / 18,8 / E / D^4 = 9500000 \cdot (12 \cdot 2980 \cdot 1200^2 - 7 \cdot 1200^3) / 18,8 / 210000 / 1170^4 = 0,051 \text{ мм}$$

$$\Delta y_2 = P \cdot b / 2 / \pi / G / D^2 = 9500000 \cdot 1200 / \pi / 85000 / 1170^2 = 0,031 \text{ мм}$$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 = 0,082 \text{ мм}$$

Пружне сплющення  $\delta$  на контактi робочого i опорного валкiв знайдемо по формулi Б. Ковальського [9]:

$$\delta = 2P \left( \frac{(1-\mu_{оп}^2)}{E_{оп}} \cdot (\ln(2R_{оп}/\beta) + 0.407) + \frac{(1-\mu_p^2)}{E_p} \cdot (\ln(2R_p/\beta) + 0.407) \right) / \pi / L$$

де  $\mu_{оп}$ ,  $\mu_p$  – коефіцієнти Пуассона робочого i опорного валкiв;  
 $E_p$ ,  $E_{оп}$  - модулі пружності робочого i опорного валкiв

$$\beta = 1.128 (\eta * P * R_{оп} * R_p / L / (R_{оп} + R_p))^{0.5} = 3,31$$

$$\eta = \left( \frac{(1-\mu_{оп}^2)}{E_{оп}} + \frac{(1-\mu_p^2)}{E_p} \right) = 1,02 * 10^{-5}$$

$$\delta = 2 * 9500000 \left( \frac{(1-0,3^2)}{210000} \cdot (\ln(1170/3,31) + 0.407) + \frac{(1-0,25^2)}{160000} \cdot (\ln(580/3,31) + 0.407) \right) / \pi / 1680 = 0.09 \text{ мм}$$

Пружне сплющення робочого валка на контактi з прокатом

$$\delta_p = 2P \left( \frac{(1-\mu_p^2)}{E_p} \cdot (\ln(2R_p/\beta) + 0.407) \right) / \pi / v = 0,158 \text{ мм}$$

$$\beta = 1,128 (P * (1-\mu_p^2) R_p / E_p / v)^{0.5} = 4.13$$

Сумарна деформація валкового вузла (прогин посередині бочки)

$$\Delta_{\Sigma} = 0,36 + 0,214 + 0,123 = 0,697 \text{ мм}$$

Сумарна деформація, що впливає на поперечну різнотовщинність

$$\Delta \delta_{\Sigma} = 0,082 + 0,214 + 0,123 = 0,419 \text{ мм}$$

Цю величину можна рекомендувати для профiлювання робочого валка.

Прогини валкiв на ширині штаби (поперечна різнотовщинність) по клітях чистової групи для розрахованих режимів обтиснень зведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Значення прогину валків по ширині штаби

№кліті	5	6	7	8	9	10	штаба
$\Delta y$	0,08	0,076	0,074	0,076	0,065	0,043	1,5x1200
$\Delta y$	0,083	0,082	0,079	0,082	0,081	0,038	2,0x1200

### 3.4 Розрахунок гідроциліндру протизгину робочих валків

У чистових робочих клітях використовують плунжерні механізми протизгину робочих валків (рис. 3.16 ). Вони розміщені у подушках нижнього робочого валка, плунжери упираються у подушки верхнього робочого валка.

Тиск робочої рідини у гідросистемі становить  $p = 20$  МПа, діаметр плунжеру  $d = 120$  мм.

Визначимо силу, яку створює один гідроциліндр [9]:

$$P = p \cdot \pi \cdot d^2 / 4 = 20 \cdot 3.14 \cdot 120^2 / 4 = 226124 \text{ Н} = 226,1 \text{ кН}$$

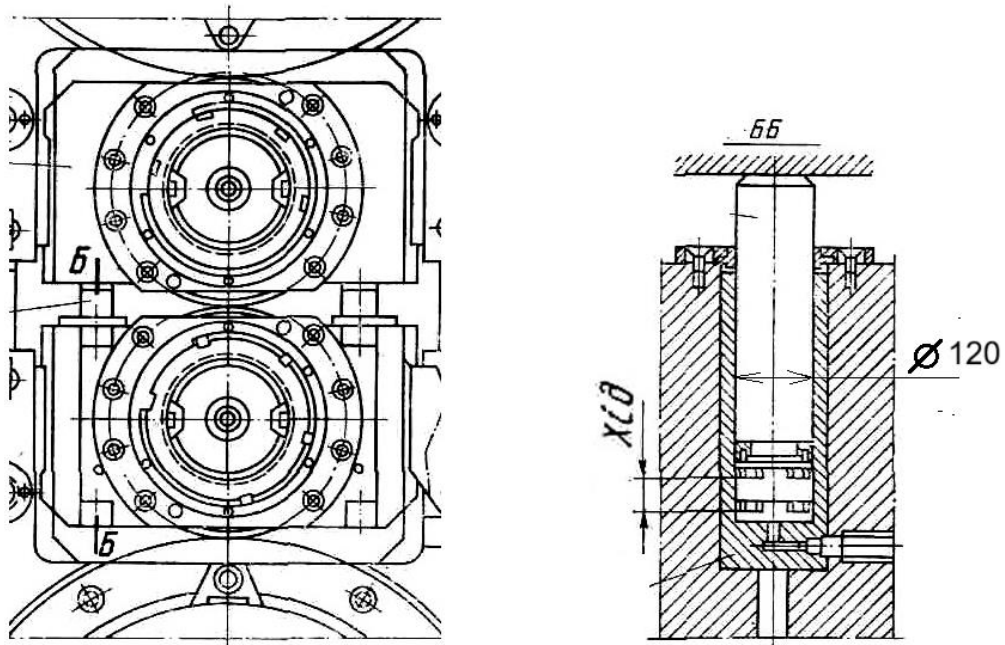


Рисунок 3.16 – Гідроциліндри протизгину робочого валка [4]

У кожній подушці розміщено по два гідроциліндри, тобто сила створюється чотирма гідроциліндрами. Тоді сила протизгину становить  $4P = 904,8 \text{ кН}$

За рекомендаціями роботи [5] сила протизгину становить 10% від сили прокатки. З урахуванням режимів обтиснень сила прокатки у кліті №10 становить 5000кН, тобто потребуєма сила протизгину становить 500 кН. Таким чином, гідроциліндри у кліті №10 забезпечують необхідну силу протизгину.

Що стосується інших клітей, то сила прокатки у них лежить у межах 7600 – 8900 кН при прокатці штаб 1,5x1200 мм і 9300 – 9600 кН при прокатці штаб 2,0x1200 мм. В першому випадку сили протизгину вистачає, а в другому система не створює необхідної сили. Тобто ефективно протизгин працює в останній і в деякій мірі у передостанній клітях чистової групи. Збільшення тиску у гідросистемі до 22 МПа може вирішити цю проблему, але вимагає проведення робіт з підвищення її надійності.

### 3.5 Аналіз отриманих результатів, пропозиції з вдосконалення технологій

#### 3.5.1. Аналіз схеми деформації та швидкісного режиму

Процес гарячої деформації реалізується у два етапи: попереднє обтиснення у реверсивній кліті Дуо (чорнова група) з товщини 150 мм до 130 мм та подальша безперервна прокатка в 10-клітьовому стані. Загальний коефіцієнт витяжки по стану становить  $\mu_{\Sigma} = 100$ .

Розподіл товщин ( $H_1$ ) та одиничних відносних обтиснень ( $\epsilon$ ) за пропусками відображає технологічні особливості деформації широкої штаби:

- У кліті Дуо здійснюється перший прохід з помірним обтисненням  $\Delta H = 20$  мм ( $\varepsilon = 0,133$ ), що зумовлено необхідністю надійного первинного захоплення товстого слябу заготовки шириною 1200 мм при швидкості прокатки  $V = 0,65$  м/с.

- У чорновій групі (кліті №1–№4) реалізується інтенсивна деформація. Відносні обтиснення тримаються на високому рівні  $\varepsilon = 0,37 \dots 0,40$  із падінням товщини підкату від 130 мм до 18 мм. Це дозволяє ефективно пропрацювати литу структуру сталі Ст5сп за високих температур (1115...1100 °С), коли опір деформації металу є мінімальним.

- У чистовій безперервній групі (кліті №5–№10) спостерігається плавне зниження одиничних обтиснень від  $\varepsilon = 0,44$  (кліть №5) до  $\varepsilon = 0,17$  у чистовому проході (кліть №10). Такий розподіл є класичним для тонколистових станів і обумовлений жорсткими вимогами до площинності штаби, точності геометричних розмірів та обмеженнями за міцністю валків. Швидкість прокатки при цьому зростає від 1,2 м/с у кліті №5 до чистової швидкості  $V = 8,0$  м/с на виході з кліті №10.

### 3.5.2. Аналіз температурно-швидкісних та енергосилових параметрів

Температурний режим прокатки спроектовано з урахуванням кінетики рекристалізації сталі Ст5сп. Процес починається за температури 1120 °С у кліті Дуо. Протягом перших п'яти клітей безперервної групи температура утримується на високому рівні (1115...1100 °С) завдяки балансу між тепловиділенням від деформації тертя та радіаційним охолодженням штаби. Починаючи з кліті №6, у зв'язку зі зменшенням товщини штаби та інтенсифікацією теплової віддачі в навколишнє середовище, температура металу знижується до  $T = 900$  °С у чистовій кліті. Це забезпечує завершення деформації в

аустенітній області, гарантуючи отримання дрібнозернистої перліто-феритної структури готового листа.

Зниження температури металу та одночасне зростання швидкості прокатки призводять до інтенсивного збільшення показника базового опору деформації сталі 2Кс (справжньої границі текучості) від 54 МПа у першому проході до 242,5 МПа у кліті №10.

Через збільшення ширини штаби до 1200 мм зростає підпір тертя по ширині валка, що відображається на показниках коефіцієнта напруженого стану  $n_\sigma$  — він досягає пікових значень 1,6 у клітках №8–№9 та становить 1,54 у кліті №10.

Поєднання цих факторів зумовлює відповідну зміну середнього питомого тиску металу на валки ( $p_{\text{сер}}$ ). Значення  $p_{\text{сер}}$  монотонно зростає вздовж усього стану від 65,3 МПа (Дуо) до максимуму 429,5 МПа у чистовій кліті №10, де фіксується найбільший опір металу деформації.

Збільшення ширини штаби до 1200 мм викликало загальне прогнозоване зростання енергосилових параметрів порівняно з прокаткою вузького асортименту, проте графік розподілу повного зусилля прокатки  $P$  та крутного моменту  $M$  за пропусками свідчить про раціональну оптимізацію режимів деформації.

Найбільші зусилля прокатки фіксуються в кліті №1 ( $P = 17,6$  МН), де поєднується значне абсолютне обтиснення ( $\Delta H = 48$  мм) з великою площею контакту металу з валками ( $L = 150,2$  мм) та максимальною шириною. У безперервній групі зусилля стабілізуються та плавно знижуються з 15,8 МН (кліть №2) до 5,0 МН (кліть №10). Усі отримані значення зусиль не перевищують гранично допустимих значень за міцністю станин та деталей натискних механізмів для стану типу 1680 ( $P_{\text{доп}} \approx 20\text{-}25$  МН).

Аналіз крутного моменту прокатки показує аналогічну динаміку: пікове значення досягається в кліті №1 ( $M = 2490,4$  кН · м), після чого в

чистовій групі момент падає від 437,0 кН · м до мінімального значення 42,9 кН · м у кліті №10.

Розрахункова потужність прокатки  $N$  розподіляється по клітях безперервної групи з урахуванням зростання кутової швидкості валків. Найбільш навантаженими через збільшену ширину штаби є кліті №1 ( $N = 5563,6$  кВт) та №2 ( $N = 4370,6$  кВт). У чистовій групі потужність стабільно утримується в межах 1664,6...2380,5 кВт (із падінням у чистовій кліті до 1088,6 кВт). Такий розподіл забезпечує стабільний коефіцієнт завантаження головних двигунів клітей без небезпеки їхнього теплового чи струмового перевантаження навіть при роботі з максимальним за шириною сортаментом.

Стосовно прокатки штаб більшої ширини, то сила прокатки зростає пропорційно ширині штаби. При заданих режимах обтискань для штаби шириною 1500 мм максимальна сила у кліті №1 буде 22 МН при допустимому навантаженні на кліть 25 МН, а у чистовій групі не перевищує 12 МН при допустимих 20 МН, тобто теоретично можлива прокатка таких штаб. Але з урахуванням того, що потужність приводів у чорнових клітях при  $B = 1200$  мм наближається до граничної, при прокатці більшої ширини приводи або будуть перевантаженими, або доведеться знижувати швидкість прокатки, що відіб'ється на продуктивності. Ще одним суттєвим обмеженням стане неможливість використовувати протизгин у чистових клітях, оскільки сили гідроциліндрів протизгину буде не вистачати. З урахуванням більшого прогину валків на більшій ширині це призведе до збільшення поперечної різнотовщинності та втрати площинності штаби. Тому діапазон ширини у 1200 мм є найбільш раціональним при прокатці штаб товщиною менше 2,0 мм.

### 3.6 Пропозиції з удосконалення технологій БТЛС-1680

Враховуючи, що для БТЛС-1680 ширина 1200 мм є підвищеним навантаженням (завантаження першої кліті за зусиллям становить 82,2%), запропоновано такі технологічні рішення:

3.6.1. Оптимізація температурно-швидкісного режиму (прокатка з прискоренням)

Для стабілізації температурного поля по довжині штаби та зниження навантаження на перші кліті, запропоновано впровадити режим прокатки з прискоренням у чистовій групі. Використовуючи резерв потужності останніх клітей, збільшення швидкості наприкінці прокатки дозволить компенсувати охолодження заднього кінця штаби, знизити зусилля деформації за рахунок термічного розм'якшення та зменшити поздовжню різнотовщинність.

3.6.2. Компенсація пружної деформації клітей та регулювання профілю

Оскільки зусилля прокатки в перших клітях є високими, на БТЛС-1680 суттєво зростає пружний прогин валків та деформація самої кліті (що для менш жорсткого стану 1680 є критичним). Це може викликати підвищену поперечну різнотовщинність штаби шириною 1200 мм. Запропоновано:

- Впровадити або модернізувати систему гідравлічного противигину робочих валків у чистових клітях для компенсації їхнього прогину.

- Застосувати диференційоване за профілюванням шліфування робочих валків із метою формування оптимального міжвалкового зазору під навантаженням.

### 3.6.3. Удосконалення системи міжклітьового охолодження

При прокатці відносно широких штабів на стані 1680 зростає ризик «крайового ефекту» — прискореного охолодження кромки штаби порівняно з її серединою. Це призводить до нерівномірності опору деформації по ширині та появи дефектів площинності («хвилястість» кромки).

Рекомендується секційні колектори міжклітьового охолодження з автоматичним встановити екрануванням або відключенням форсунок по ширині штаби, що дозволить вирівняти температуру по ширині 1200 мм.

Проведений комплексний інженерний аналіз енергосилових та технологічних параметрів прокатки штаби шириною 1200 мм в умовах БТЛС-1680 дозволяє зробити такі узагальнення:

- Технологічна спроможність обладнання: Розраховані режими деформації є напруженими, але допустимими для вузлів БТЛС-1680. Максимальне зусилля у кліті №1 становить 18 МН, що відповідає 82,2% від граничної міцності станин. Це підтверджує можливість стабільної прокатки даного сортаменту без ризику аварійних поломок обладнання.

- Енергетична збалансованість: Потужність головних приводів використовується раціонально. Найбільш навантаженими є двигуни клітей №1 та №3 (завантаження до 82,4%). Виявлений резерв потужності у фінішних клітях (завантаження кліті №10 становить 28,2%) створює умови для реалізації режимів прокатки з прискоренням.

- Ефективність рекомендацій: Впровадження запропонованих заходів (системи противигину валків, оптимізованого міжклітьового охолодження та швидкісного прискорення) дозволяє нівелювати нижчу жорсткість стану 1680 порівняно з більшими станами. Це гарантує отримання широкого прокату (1200 мм) із високою точністю геометричних розмірів та площинності згідно з вимогами діючих стандартів.

## 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

### 4.1 Продуктивність стану, витратні коефіцієнти та структура собівартості

Економічна ефективність безперервного тонколистового стану (БТЛС) 1680 ПАТ «Запоріжсталь» у сучасних умовах визначається здатністю обладнання забезпечувати максимальний вихід придатного горячекатаного прокату при мінімальних питомих витратах дефіцитних ресурсів та зниженні собівартості переділу [10].

Продуктивність БТЛС-1680 є інтегральним технологічним показником і поділяється на кілька базових видів:

- технічна (годинна) продуктивність – визначає темп прокатки за годину чистої роботи (без урахування пауз). Для розрахованого сортаменту (штаба шириною 1200 мм) вона становить 320–360 тон/год (залежно від кінцевої товщини листа);
- фактична продуктивність – враховує планово-попереджувальні ремонти (ППР), поточні перевалки робочих і опорних валків, а також позапланові технічні та технологічні простої;
- напрямки підвищення продуктивності – збільшення вихідної маси сляба (обмежене параметрами нагрівальних печей і кранового господарства цеху) та скорочення міжштабових пауз у чистовій групі.

Найважливішими питомими технологічними параметрами, які безпосередньо формують ціну готової продукції, є витратні коефіцієнти металу та енергоресурсів [10]:

- Витратний коефіцієнт металу ( $k_m$ ) – відношення маси витраченого сляба до маси придатного рулону. Для умов БТЛС-1680 базове нормативне значення становить \_\_\_\_\_. Основні технологічні втрати складаються з угару (чаду) металу в методичних нагрівальних печах (1,1–1,4%), обрізки переднього та заднього кінців

штаби («язиків» та «хвостів»), втрат на окалиноутворення безпосередньо під час деформації та технологічної обрізки кромки.

- Витрати енергоресурсів:

- природний газ – використовується для нагріву слябів у методичних печах до температури прокатки. Оптимізація теплових режимів печей та впровадження «гарячого посаду» (завантаження гарячих слябів безпосередньо з киснево-конвертерного цеху через МБЛЗ) виступають ключовими факторами економії;

- електроенергія – основними споживачами є головні двигуни чистової групи клітей, що працюють у напруженому режимі при ширині штаби 1200 мм, а також високонапірні насоси системи гідродинамічного збиву окалини;

- технічна вода – значні об'єми використовуються для охолодження прокатних валків та металу, при цьому в цеху застосовується замкнений цикл для оптимізації водоспоживання.

Економічний аналіз експлуатації стану показує, що основна частка витрат (крім сировини та енергоносіїв) припадає на змінне обладнання (витрати на перешліфування та заміну валків через термічну втому та механічний знос) та позапланові простої. Кожна година простою БТЛС-1680 призводить до втрати обсягів виробництва та перевитрати палива в методичних печах, які працюють у режимі очікування.

Для проведення розрахунків економічної ефективності модернізації БТЛС-1680 використано актуальні середньоринкові ціни на сировину, матеріали та промислові енергоносії в Україні станом на 2026 рік:

- вартість безперервнолитого сляба (ККЦ) – \_\_\_\_\_ грн/т;
- ринкова ціна готового гарячекатаного рулону (ширина 1200 мм) – \_\_\_\_\_ грн/т;
- вартість зворотного брухту (технологічна обрізка) – \_\_\_\_\_ грн/т;

- ціна природного газу для промислових підприємств з розподілом – \_\_\_\_\_ грн за 1000 м<sup>3</sup>;
- вартість електроенергії для промислових споживачів 2-го класу напруги – \_\_\_\_\_ грн за кВт·год;
- річний обсяг виробництва проектного сортаменту (штаба 2х 1200 мм) – \_\_\_\_\_ т/рік.

Базова калькуляція та планова структура собівартості однієї тонни гарячекатаного прокату в умовах ПАТ «Запоріжсталь» наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Структура собівартості прокату на БТЛС-1680

Стаття витрат	Частка у собівартості, %	Базовий варіант, грн	Коментар до статті витрат
Сировина та матеріали			
Енергоресурси			
Змінне обладнання			
Оплата праці			
Утримання обладнання			
Загальнозаводські витрати			
Всього			

## 4.2 Розрахунок ефекту від зниження витратного коефіцієнта металу

Впровадження в дипломній роботі гідравлічного противигину робочих валків та модернізація секційного міжклітьового охолодження дозволяють стабілізувати геометрію штаби шириною 1200 мм. Це веде до зменшення поздовжньої та поперечної різнотовщинності, мінімізуючи обрізку передніх і задніх кінців штаби («язиків»). Впровадження систем вібродіагностики підшипникових вузлів та оптимізація графіків перевалок додатково знижують ймовірність випускного браку, який за повною вартістю переробки інакше йде на переплавку як брухт.

- Базовий витратний коефіцієнт  $k_{M1}$ : \_\_\_\_\_
- Проектний витратний коефіцієнт після модернізації  $k_{M2}$ : \_\_\_\_\_

Зниження витрат металу на 1 тонну придатного прокату визначається за формулою:

$$\Delta k_M = \underline{\hspace{10em}}$$

При зменшенні витратного коефіцієнта зекономлений метал не втрачається, а переходить із категорії технологічних збитків у категорію придатного прокату. Фінансова оцінка втрат визначається як різниця між вартістю сляба та вартістю зворотного брухту:

Ціна втрат = \_\_\_\_\_

Розрахунок річної економії на металі Економія<sub>мет</sub>:

Економія<sub>мет</sub> = \_\_\_\_\_

#### 4.3 Розрахунок ефекту від оптимізації температурно-швидкісного режиму

Завдяки використанню технологічного резерву потужності останніх клітей (завантаження кліті №10 становить лише \_\_\_\_\_%), у роботі реалізовано режим прокатки з прискоренням у чистовій групі. Це скорочує машинний час деформації кожної штаби в середньому на \_\_%.

Скорочення часу прокатки дозволяє підвищити темп видачі слябів із методичних нагрівальних печей, що знижує питомі витрати палива на очікування та зменшує утворення пічної окалини (чаду) на \_\_%. Таке рішення також дозволяє дещо знизити температуру видачі слябів із печей (оскільки швидкісна деформація компенсує втрати тепла), що додатково економить газ.

1. Економія природного газу в печі:

- базова питома витрата газу: \_\_\_\_\_ м<sup>3</sup>/т;

- зниження витрати газу за рахунок темпу прокатки:

на \_\_\_\_\_% ( $\Delta V_{\text{газ}} = \text{_____ м}^3/\text{т}$ ).

Річна фінансова економія на газі ( $E_{\text{газ}}$ ):

$E_{\text{газ}} = \text{_____}$

2. Додаткова економія від зменшення вигару металу на \_\_\_\_\_% (\_\_\_\_\_ т/т):

$E_{\text{виг}} = \text{_____}$

#### 4.4 Калькуляція собівартості та сумарний економічний ефект

Впровадження енергозберігаючих та автоматизованих технологій змінює структуру витрат на виробництво 1 тони гарячекатаного рулону шириною 1200 мм на БТЛС-1680. Порівняльні дані базового та проєктного варіантів наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняльна калькуляція собівартості 1 т прокату на БТЛС-1680

Стаття витрат	Базовий варіант, грн	Проектний варіант, грн	Зміна витрат, грн
Сировина та матеріали (сляби)			
Енергоресурси (газ, електроенергія)			
Змінне обладнання (валки, мастила)			
Оплата праці з відрахуваннями			
Утримання обладнання та амортизація			
Загальнозаводські витрати			
Повна собівартість 1 тонни			

Загальне зниження собівартості на 1 тонні продукції становить 88 грн.

#### 4.5 Розрахунок інтегральних показників ефективності проекту

Для реалізації проекту (модернізація колекторів міжклітьового охолодження, встановлення системи гідропротивигину валків, систем вібродіагностики та оновлення програмного забезпечення автоматизованої системи керування АСУ ТП) необхідні капітальні інвестиції.

- Капітальні витрати (проектна вартість модернізації):

$$K = \text{_____} \text{ грн.}$$

- Сумарний річний економічний ефект (чистий прибуток до оподаткування):

$$\text{Ефект}_{\text{рік}} = \text{_____}$$

Розрахунок терміну окупності капітальних вкладень ( $T_{\text{ок}}$ ):

$$T_{\text{ок}} = K / \text{Ефект}_{\text{рік}} = \text{_____} \text{ року}$$

Проведений детальний фінансово-економічний розрахунок довів високу ефективність запропонованого комплексу заходів для умов БТЛС-1680 ПАТ «Запоріжсталь». Оптимізація технології дозволяє знизити собівартість виробництва однієї тонни широкого гарячекатаного прокату (1200 мм) на 88 грн.

Основним драйвером отримання прибутку є зниження витратного коефіцієнта металу на \_\_\_\_\_, що забезпечує річну економії сталі на суму \_\_\_\_\_ млн грн, а також раціоналізація паливного режиму нагрівальних печей із чистим ефектом \_\_\_\_\_ млн грн/рік.

При загальному обсязі капітальних інвестицій у модернізацію систем автоматизації, діагностики та охолодження в розмірі \_\_\_\_\_ млн грн, термін окупності проекту становить \_\_\_\_\_ року (близько \_\_ місяців), що повністю відповідає жорстким критеріям ефективності інвестиційних проектів у металургійній галузі України.

## 5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів у цеху гарячої прокатки

Виробниче середовище листопрокатного цеху, де експлуатується стан БТЛС-1680, характеризується наявністю факторів, що класифікуються як небезпечні та шкідливі (згідно з ДСТУ EN ISO 12100). Їх аналіз є основою для розробки заходів безпеки.

#### 1. Небезпечні фізичні фактори (ризик травматизму) [6,11].

- Рухомі частини обладнання та заготовок: висока швидкість руху штаби (до 10–12 м/с) та обертові деталі (ролики рольгангів, вали редукторів, шпинделі). Основна небезпека — механічне травмування або затягування в механізми.

- Висока температура поверхонь: сляби та прокат мають температуру до 1250°C. Контакт із розпеченим металом або елементами печей призводить до важких термічних опіків.

- Вантажопідйомна техніка: Постійне переміщення багатотонних рулонів та валків мостовими кранами створює ризик падіння вантажу.

#### 2. Шкідливі фізичні фактори (ризик професійних захворювань) [11,12].

- Інтенсивне теплове випромінювання: потужний потік інфрачервоної енергії від методичних печей та гарячого розкату. Це спричиняє порушення терморегуляції та професійні захворювання (наприклад, тепловий удар або катаракту).

- Високий рівень еквівалентного шуму: Походить від роботи потужних двигунів чистової групи, систем гідрозбиву окалини та вентиляційних установок.

- Загальна вібрація: виникає під час проходження товстих слябів через кліті та передається на робочі майданчики.

### 3. Хімічні та психофізіологічні фактори

- Загазованість та запыленість: викиди продуктів згоряння газу (CO, NO) та наявність аерозолів залізної окалини в зоні прокатки.

- Психоемоційне напруження: робота операторів постів керування вимагає високої концентрації уваги протягом усієї зміни, що пов'язано з високою швидкістю процесу та відповідальністю за обладнання.

Таблиця 5.1 - Заходи щодо мінімізації впливу шкідливих факторів [11]

Фактори	Технічні та організаційні заходи захисту
Теплове випромінювання	Екранування печей, використання повітряних завіс, облаштування кімнат відпочинку з кондиціонуванням.
Механічна небезпека	Встановлення сітчастих огорожень, систем блокування доступу в зону роботи моталок, звукова та світлова сигналізація.
Шум та пил	Використання звукоізованих кабін спостереження, обов'язкове носіння протишумних навушників та респіраторів.
Гарячий метал	Використання спецвзуття на термостійкій підошві та спецодягу з вогнетривким просоченням.

Забезпечення безпечних умов праці на стані 1680 досягається шляхом максимальної автоматизації процесів, що дозволяє вивести основний персонал із небезпечних зон у захищені пости керування. вступний та первинний інструктажі з техніки безпеки.

## 5.2 Заходи щодо безпечної експлуатації обладнання стану 1680

Безпечна експлуатація широкоштабового стану забезпечується комплексом технічних засобів, організаційних заходів та автоматизованих систем контролю.

### 5.2.1 Технічні засоби безпеки [11,12]

- Захисні огороження та блокування: усі рухомі частини (муфти, шпинделі, приводи рольгангів) закриті суцільними або сітчастими огороженнями. На дільницях моталок та шлеперів встановлені фотоелементи та кінцеві вимикачі, які автоматично зупиняють обладнання при вході людини в небезпечну зону.

- Сигналізація та зв'язок: перед пуском стану або окремих його вузлів обов'язково подається звуковий сигнал тривалістю не менше 10 секунд. По всій довжині стану встановлено двосторонній гучномовний зв'язок.

- Засоби аварійної зупинки: на всіх постах керування та безпосередньо біля агрегатів розташовані кнопки «Стоп» аварійного розрядження (червоного кольору), що дозволяють миттєво знеструмити приводи у разі виникнення позаштатної ситуації.

### 5.2.2. Заходи при проведенні ремонтних робіт та перевалок [6,11]

Оскільки перевалки валків на стані 1680 відбуваються часто, дотримання регламенту є критичним:

- Система нарядів-допусків: роботи підвищеної небезпеки виконуються лише за письмовим дозволом із проведенням цільового інструктажу.

- Биркова система: перед початком огляду або ремонту агрегату оператор вилучає ключ-бирку, що механічно та електрично унеможлиблює випадковий запуск обладнання іншою особою.
- Використання спеціальних пристроїв: Для зміни валків використовуються спеціальні рейкові візки та траверси, що виключає перебування персоналу під вантажем.

### 5.2.3. Електробезпека

- Усі корпуси електродвигунів, постів керування та металоконструкції стану мають надійне заземлення та занулення.
- Використання діелектричних килимків та засобів захисту при роботі з електрощитовими.
- Регулярна перевірка опору ізоляції кабельних ліній, що працюють в умовах високих температур та вологості.

### 5.2.4 Гігієна праці та пожежна безпека

- Пожежна безпека: Оскільки в цеху використовується велика кількість мастил та гідравлічних рідин під тиском, стан обладнаний автоматичними системами пожежогасіння та первинними засобами (вогнегасники, пісок).
- Питний режим: Через високу температуру в цеху облаштовані сатураторні установки для компенсації втрати солей та вологи організмом працівників.

## ВИСНОВКИ

1. Прокатний стан БТЛС 1680 практично вичерпав можливості значної модернізації обладнання. Покращення ефективності роботи БТЛС 1680 можливе в першу чергу вдосконаленням технології, яка забезпечує розширення сортаменту та поліпшення якості продукції.

2. Розроблені режими обтиснень у чистовій групі клітей забезпечують більш рівномірне навантаження робочих клітей в межах допустимих енергосилових параметрів при прокатці штаб товщиною менше 2 мм, у тому числі і при збільшенні ширини до 1200 мм. Прокатка штаб більшої ширини проблематична з точки зору забезпечення поперечної різнотовщинності і площинності прокату. Виявлений резерв потужності у чистових клітях (завантаження кліті №10 становить \_\_\_\_%) створює умови для реалізації режимів прокатки з прискоренням.

3. Технічні рішення з поліпшення роботи стану стосуються вдосконалення верстатного профілювання валків, диференційованого міжклітьового охолодження у клітях чорнової групи, роботи механізмів протизгину у чистових клітях. Наразі механізми протизгину валків не забезпечують надійної роботи у клітях №8,9. Збільшення сили механізмів протизгину можливе при збільшенні тиску робочої рідини до 22 МПа, що потребує оновлення елементів гідросистеми. Використання запропонованих заходів дозволяє нівелювати нижчу жорсткість стану 1680 порівняно з сучасними станами.

4. Очікуваний річний економічний ефект від розроблених у роботі заходів становить \_\_\_\_\_ грн/рік. Оптимізація технології дозволяє знизити собівартість виробництва однієї тонни тонкого гарячекатаного прокату (для ширини 1200 мм) на \_\_\_\_ грн.

5. Заходи щодо безпечної експлуатації обладнання стану 1680 дозволяють знизити вплив існуючих шкідливих факторів та забезпечити безпечні умови праці.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ніколаєв В. О. Технологія виробництва сортового та листового прокату : підручник. Частина II / В. О. Ніколаєв, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2000. – 220 с.
2. William L. Roberts. Hot Rolling of Steel. CRC Press. Marcel Dekker, 1983. 1024 p
3. Strip Mill Conventinal. Information of Danieli & C. S.p.A. , 2006. 163 p.
4. Механічне обладнання технологічних ліній прокатних станів: навчальний посібник / Ю.К.Доброносів , Е.П.Грибков;ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка». –2026. – 306 с.
5. Vladimir B. Ginzburg, Robert Ballas. Flat Rolling Fundamentals. CRC Press, 2000. 850 p
6. Технологічна інструкція ТІ 232-П-Г-05-2022. Виробництво гарячекатаного прокату на безперервному стані 1680. — Запоріжжя: ПАТ «Запоріжсталь», 2022.
7. ДСТУ 2834-94 (ГОСТ 16523-97). Прокат тонколистовий із вуглецевої сталі якісної та звичайної якості загального призначення. Технічні умови.
8. Теорія обробки металів тиском: методичні вказівки до практичних занять для магістрів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізація «Інжиніринг автоматизованих машин і агрегатів» / уклад. : В. А. Федоринов. -Краматорськ: ДДМА, 2019. - 20 с.
9. <http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ammo/metod/tomt/Практ%20ОМД%20укр.pdf> (дата звернення 27.05.2026)
10. Іванченко Ф.К. Гребеник В.М., Ширяєв В.І. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів. К.: Вища шк., 1995. 455с
11. Єрфорт І. Ю. Оцінювання ефективності проектних рішень : навчальний посібник [для студентів спеціальностей: 122 "Комп'ютерні

науки та інформаційні технології", 131 "Прикладна механіка", 133 "Галузеве машинобудування", 136 "Металургія", 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", 151 "Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології"] / І. Ю. Єрфорт, Ю. В. Дегтярьова, О. Ю. Єрфорт. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – 211 с. [http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ep/metod/Оцінювання%20ефективності%20проектних%20рішень\\_Єрфорт.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ep/metod/Оцінювання%20ефективності%20проектних%20рішень_Єрфорт.pdf) (дата звернення 03.06.2026)

12. Положення про систему управління охороною праці в цеху гарячої прокатки ПАТ «Запоріжсталь».

13. НПАОП 27.0-1.01-08. Правила охорони праці в металургійній промисловості (32433). Режим доступу [https://dnaop.com/html/32433/doc%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_27.0-1.01-08](https://dnaop.com/html/32433/doc%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_27.0-1.01-08) (дата звернення 03.06.2026)