МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ
Кафедра металургійного обладнання

Кваліфікаційна робота / проект
Перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

На тему: Удосконалення обладнання та системи ремонту привода обтискного прокатного стану

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1331
Ходунов Андрій Олександрович _____
(ФІО) (підпис)
спеціальність: 133 Галузеве машинобудування
(код і назва спеціальності)
освітня програма Галузеве машинобудування
(код і назва освітньої програми)
Керівник:
к.т.н доц. каф. МО Таратута К.В. _____
(посада, ФІО) (підпис)
Н.контроль :
к.т.н доц. каф. МО Васильченко Т.О _____
(посада, ФІО) (підпис)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Інженерний навчально – науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра Металургійного обладнання
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(код та назва)

Освітня програма Галузеве машинобудування
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
“ ” 20 25 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Ходунов Андрій Олександрович
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту): Удосконалення обладнання та системи ремонту привода обтискного прокатного стану
науковий керівник Таратута Костянтин Васильович доц. каф. МО к.т.н.
(П.І.Б., посада та наук, ступінь)
затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” 12. 24р. № 2031-с
2. Строк подання студентом роботи
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація ПАТ «Запоріжсталь», літературні джерела, інтернет-ресурси.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Загальна частина. Спеціальна частина. Експлутаційна частина. Охорона праці в галузі та техногенна безпека. Висновки. Список використаних джерел
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов’язкових креслень): Креслення загального виду – А1; Складальне креслення – 2А1; Креслення експлуатаційної частини – А1; Деталювання – А3; Специфікації – 3А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
1 Загальна частина	Таратута К. В. доц. каф. МО к.т.н.	
2 Спеціальна частина	Таратута К. В. доц. каф. МО к.т.н.	
3 Експлуатаційна частина	Таратута К. В. доц. каф. МО к.т.н.	
4 Охорона праці та техногенної безпеки	Таратута К. В. доц. каф. МО к.т.н.	

7. Дата видачі завдання 27.12.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат, вступ, розділ 1	27.12.24 - 30.01.25	
2.	Розділи 2-3	03.02.25 - 25.04.25	
3.	Охорона праці (розділ 4), висновки, оформлення ПЗ і креслень, підготовка доповіді і презентації.	28.04.25 - 01.06.25	

Студент _____ Ходунов А. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Таратута К. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ходунов Андрій Олександрович. Удосконалення обладнання та системи ремонту привода обтискного прокатного стану

Випускна кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавр за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник К.В. Таратута. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра металургійного обладнання, 2025р.

Мета Кваліфікаційної роботи — аналіз конструкції привода стану «Слябінг-1150», вивчення методів контролю його технічного стану та розробка пропозицій щодо вдосконалення обслуговування і ремонту згідно з сучасними вимогами.

У роботі досліджено конструкцію привода кліті стану «Слябінг-1150» ПАТ «Запоріжсталь», що використовується для обтискної прокатки сталевих злитків. Проведено технічний аналіз обладнання та режимів роботи привода, визначено основні навантаження в процесі прокатки, а також виконано перевірку його елементів на міцність.

На основі технологічних і силових розрахунків встановлено оптимальні параметри обтиснення, розраховано потужність, крутний момент, зусилля прокатки та інші навантаження. Запропоновано інженерно обґрунтовані рішення щодо підвищення ресурсу та ремонтопридатності конструкції.

Ключові слова: СЛЯБІНГ-1150, ПРИВІД, ОБТИСКАННЯ, ПРОКАТКА, РЕМОНТ, КРУТНИЙ МОМЕНТ, ПОТУЖНІСТЬ, ВАЛКИ, НАДІЙНІСТЬ.

ABSTRACT

Andriy Oleksandrovych Khodunov. Improvement of equipment and repair system of the drive of the crimping rolling mill

Final qualification work for obtaining the degree of higher education bachelor in specialty 133 - Industrial mechanical engineering, scientific supervisor K.V. Taratuta. Zaporizhzhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebny, Department of Metallurgical Equipment, 2025.

The purpose of the qualification work is to analyze the design of the drive of the Slabing-1150 mill, study methods for monitoring its technical condition and develop proposals for improving maintenance and repair in accordance with modern requirements.

The work investigates the design of the drive of the Slabing-1150 mill stand of PJSC Zaporizhstal, which is used for crimping rolling of steel ingots. A technical analysis of the equipment and operating modes of the drive was carried out, the main loads during the rolling process were determined, and its elements were tested for strength.

Based on technological and force calculations, the optimal compression parameters were established, power, torque, rolling forces and other loads were calculated. An engineering-based solution was proposed to increase the service life and maintainability of the structure.

Keywords: SLABING-1150, DRIVE, PRESSURE, ROLLING, REPAIR, TORQUE, POWER, ROLLS, RELIABILITY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....7
1. Загальна частина.....8
1.1.Опис конструкції прокатного стану Слябінг-1150.....8
1.2.Технологія прокатки на стані Слябінг-1150.....15
1.3. Недоліки роботи обладнання.....19
2. Спеціальна частина.....23
2.1.Опис обладнання привода обтискного прокатного стана Слябінг1150.....23
2.2.Розрахунок технології пластичної деформації слябів.....27
2.3.Розрахунок потужності привода.....36
2.4.Перевірка деталей привода стану слябінгу-1150.....45
3. Експлуатаційна частина.....48
3.1.Опис системи технології обслуговування і ремонту Слябінг-1150.....48
3.2.Складання річного графіка технічного обслуговування та капітального ремонту слябінга-1150.....52
3.3.Пропозиції щодо удосконалення обладнання та системи ремонту привода обтискного прокатного стану.....61
4. Охорона праці та техногенна безпека.....77
4.1.Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів.....77
4.2.Засоби індивідуального захисту та вимоги до організації робочого місця при ремонті привода Слябінг-1150.....80
4.3.Пожежна та техногенна безпека.....83
ВИСНОВКИ.....87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....89
ДОДАТКИ.....92

ВСТУП

Прокатне виробництво є одним із ключових етапів металургійного циклу, забезпечуючи формування заготовок для подальшої обробки. Обтискні прокатні стани, зокрема стан типу Слябінг-1150, відіграють важливу роль у переробці злитків у плоскі напівфабрикати — сляби, які надалі використовуються для виробництва гарячекатаного листа, штаби або рулонної продукції. Ефективна та безперебійна робота обтискного стану суттєво впливає на загальні показники виробництва та якість кінцевої продукції.

Одним із критичних елементів конструкції є головний привід, що передає обертальний момент на робочі валки кліті. Під час роботи привідні вузли зазнають значних динамічних і теплових навантажень. Зношування деталей привода, втрата жорсткості з'єднань, несправності муфт або сполучень можуть призвести до аварій, зниження точності прокатки та збільшення простоїв. Тому надійність привода та ефективність його технічного обслуговування є одним із ключових факторів стабільної роботи обтискного стану.

У межах роботи було розглянуто технічний стан привода обтискного стану Слябінг-1150 ПАТ «Запоріжсталь», виконано розрахунок навантажень, що виникають під час деформації слябів, обчислено крутні моменти та сили прокатки, а також здійснено перевірку елементів привода на міцність.

Особливу увагу приділено розробці організаційно-технологічних заходів удосконалення ремонту привода, аналізу конструктивних особливостей, а також пропозиціям щодо підвищення надійності та ресурсу роботи приводних вузлів. У подальших розділах представлено економічне обгрунтування впровадження запропонованих рішень і розглянуто питання охорони праці та техногенної безпеки в умовах експлуатації обладнання.

1. Загальна частина

1.1 Опис конструкції прокатного стану Слябінг-1150

Прокатний стан Слябінг-1150 є складним високонавантаженим агрегатом, призначеним для обтиснення злитків великої маси (до 23,2 т) з отриманням слябів, які у подальшому використовуються в лініях гарячої прокатки листа.

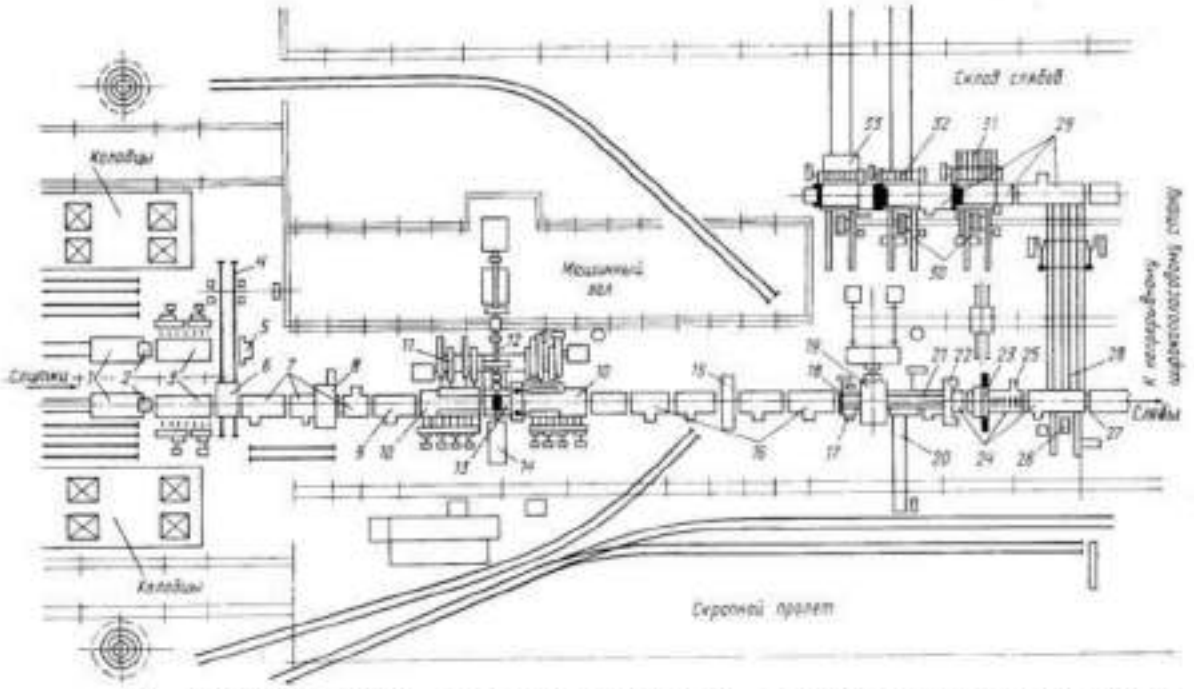
Центральним елементом технологічної лінії є головний привід прокатного стану, що забезпечує механічну енергію для обертання робочих валків, передачу значного крутного моменту та стабільну роботу всієї прокатної кліті в умовах циклічного навантаження.

Конструкція привода Слябінга-1150 розрахована на тривалу безперервну експлуатацію в умовах підвищених температур, вібрацій і граничних навантажень, що вимагає високої точності виконання, систематичного обслуговування та надійного моніторингу технічного стану [21], [22].

У конструкції стану передбачено лінійне розміщення агрегатів, що забезпечує безперервність прокатного процесу та зручність обслуговування основного і допоміжного обладнання в робочій зоні.

На рисунку 1.1 наведена схема загального вигляду плану розміщення основного обладнання слябінга-1150. Вона відображає компонування головної кліті, приймальних і видаткових рольгангів, нагрівальних колодязів, допоміжного обладнання (гідростанцій, систем змащення, електроприводів), а також майданчиків технічного обслуговування. Така структура сприяє організації чіткої виробничої логістики, зменшенню простоїв та підвищенню рівня автоматизації процесу обтиснення.

На відміну від блюмінгів 1300 і 1150 нагрівальні колодязі слябінга розташовані в два ряди (ліворуч і праворуч від осі табору), що зменшує шлях злитковозів при подачі злитків від далеких колодязів.



1 – злитковози; 2 – упор злитковозу; 3 – приймальні рольганги; 4 – рейковий шлях; 5 – стаціонарний упор; 6 – рольганг-візок; 7 – підводять рольганги; 8 – ваги з поворотним пристроєм; 9 – розкочування рольганг; 10 – робочі рольганги перед та за станом; 11 – маніпулятор з кантувачем; 12 – універсальні шпинделі; 13 – універсальна робоча кліть з горизонтальними та вертикальними валками (Слябінг-1150); 14 – пристрій для зміни валків; 15 – машина вогневої зачистки; 16 – транспортні рольганги; 17 – рольганги перед ножицями; 18 – зіштовхувач обрізків; 19 – ножиці 2000 Т; 20 – транспортер для збирання обрізків; 21 – рольганг, що відсувається за ножицями; 22 – пересувний упор для різання слябів на мірні довжини; 23 – таврування; 24 – транспортні рольганги; 25 – ваги, вбудовані в рольганг; 26 – зіштовхувач слябів; 27 – упор, що опускається; 28 – транспортер слябів; 29 – збиральні рольганги; 30 – зіштовхувачі слябів; 31 – стелажі; 32 – підйомний штабелюючий стіл для слябів; 33 – візок для слябів.

Рисунок 1.1 - План розташування обладнання слябінгу 1150

Прокатний стан Слябінг-1150 складається з основних функціональних вузлів: робочої кліті з горизонтальними та вертикальними валками, механізмів подачі та переміщення заготовок, напрямних елементів, систем гідравліки,

мастила, охолодження та автоматизації. Ключовим вузлом є двовалкова обтискна кліть, оснащена гідроприводом вертикальних валків для обмеження поперечного розширення сляба.

Основне технологічне обладнання включає механізм подачі злитків, нагрівальну піч, підйомно-поворотні столи, робочу кліть, рольганги з регульованим положенням, приймальні й транспортні пристрої.

Стан Слябінг-1150 обладнаний двома клітями — горизонтальною та вертикальною. Горизонтальна кліть є реверсивною, з робочими валками діаметром 1150 мм і довжиною бочки 2000 мм, оснащеними індивідуальними електроприводами типу МПС 9000-66 потужністю 7200 кВт. Вертикальні валки діаметром 700 мм і довжиною 1150 мм отримують обертання від чотирьох електродвигунів ПВ2 800.175-8УЗ потужністю по 1250 кВт через редуктори з передаточним числом 3,744 [21]. Відстань між осями горизонтальних і вертикальних валків становить 2250 мм. Зовнішній вигляд слябінгу-1150 зображено на рис. 1.2.

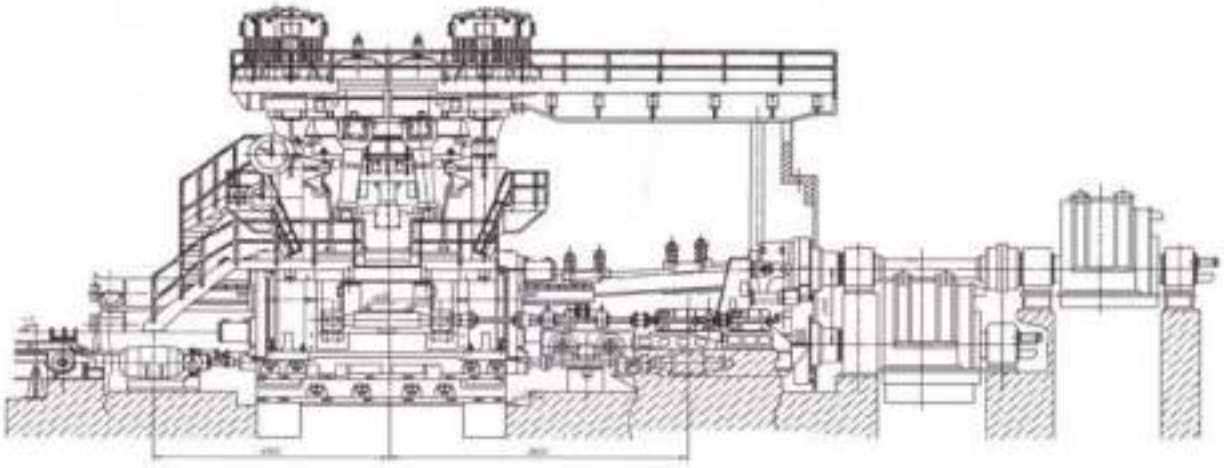
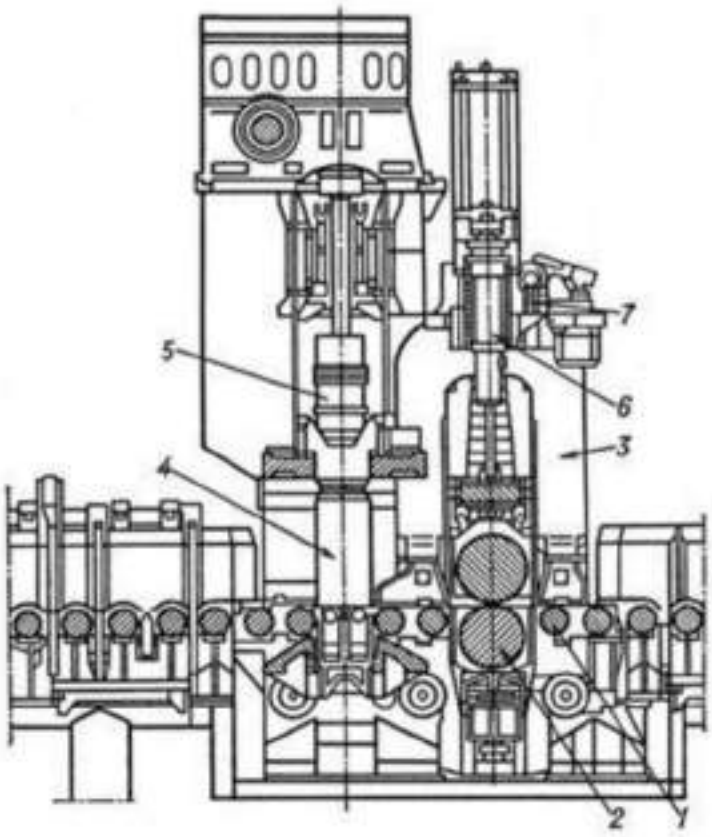


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд слябінгу-1150

Робоча кліть сприймає основні навантаження при обтисненні злитків. Вона відзначається підвищеною жорсткістю. Валки встановлені у чавунні станини з каналами для водяного охолодження. Конструкція передбачає змінні калібри для обтиснення в різні розмірні ряди, регулювання зазору

здійснюється гідроциліндрами з автоматичним керуванням. Схему робочої кліті слябінга подано на рис. 1.3.



1 - станинні ролики; 2 - горизонтальні валки; 3 - станина; 4 - вертикальні валки; 5 - шпинделі; 6 - врівноважуючий пристрій; 7 - натискний механізм.

Рисунок 1.3 – Робоча кліть універсального слябінга

У робочих клітях передбачені пристрої врівноваження верхнього валка та його подушок. Вони забезпечують щільне притискання подушок до торців натискних гвинтів, запобігаючи утворенню зазорів у парі гвинт–підп'ятник і гвинт–гайка.

Врівноваження верхнього валка може бути пружинним, вантажним та гідравлічним.

Пружинне застосовується на станах із малим ходом верхнього валка (50–100 мм), зокрема на сортових станах і клітях кварто. Воно не набуло широкого поширення.

Вантажне врівноваження (рис. 1.5) використовується при великому ході валка (до 2000 мм — на блюмінгах та слябінгах). Його конструкція проста й надійна. Зусилля від контрвантажів передається через чотири вертикальні штанги. Зусилля врівноваження перевищує вагу валка, подушок і натискних гвинтів на 20–40 %.

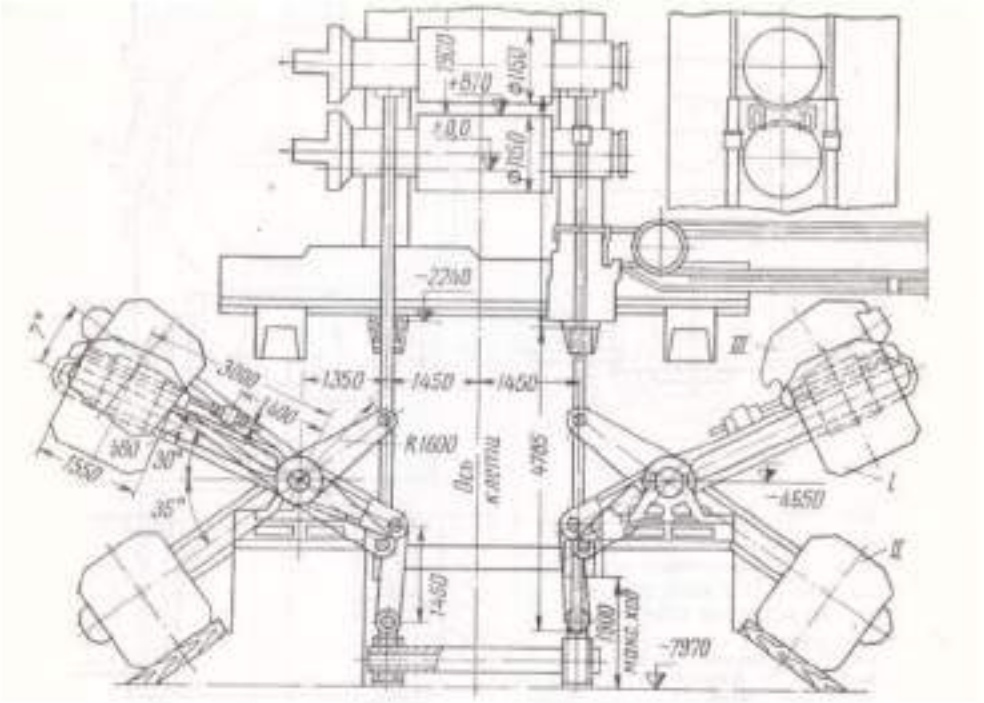


Рисунок 1.5 - Вантажне врівноважування верхнього валка слябінгу 1150

Гідравлічне врівноваження (рис. 1.6) застосовується як при великому ході валка (обтискні стани), так і при малому розчині (кварто). Воно компактніше, конструктивно простіше та зручніше в експлуатації, ніж вантажне. Останніми роками стало найбільш поширеним завдяки надійності та простоті обслуговування.

Принцип роботи гідравлічного врівноваження полягає в тому, що гідроциліндр 1 встановлюється у верхній частині кліті та закріплюється в траверсі, яка зв'язує стійки станини. До плунжера гідроциліндра 2 шарнірно кріпиться коромисло (траверса) 3, до кінців якого підвішено тяги 4. Ці тяги з'єднані з поперечними балками 5, які проходять через вікна станини та

підтримують подушки верхнього валка. У подушках виконані спеціальні Г-подібні пази для шарнірного з'єднання тяги й балки. Така схема забезпечує компенсацію маси верхнього валка і сприяє точнішому керуванню положенням у процесі обтиснення.

Хоча на рисунку подано приклад для стану кварто 2500, принцип і конструктивні рішення аналогічні тим, що використовуються на Слябінгу-1150. Цей приклад вибрано через кращу деталізацію й доступність креслення.

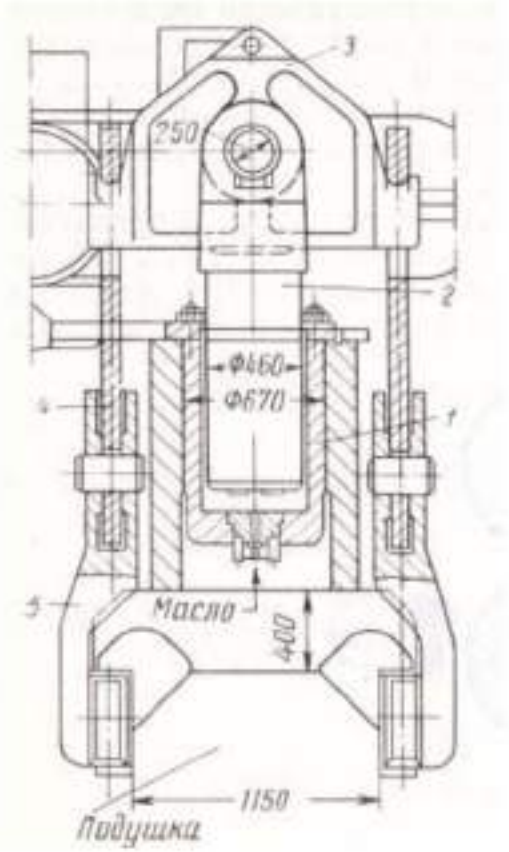
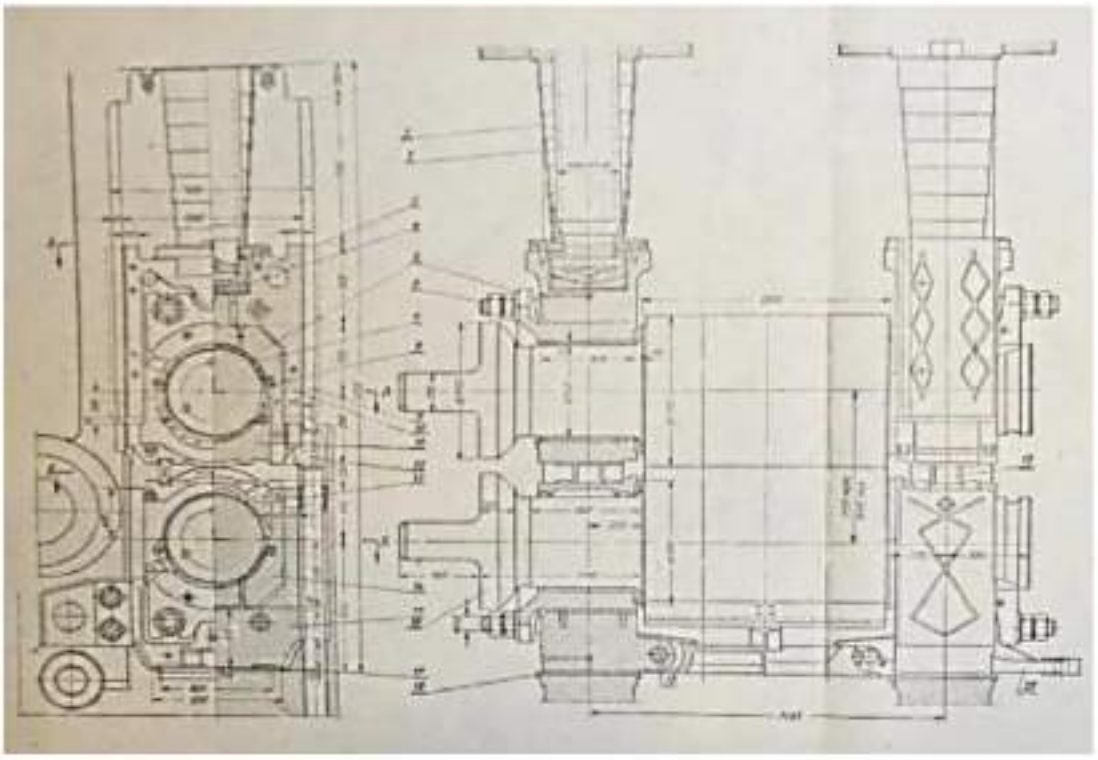


Рисунок 1.6 - Гідравлічне врівноваження верхнього опорного валка стана кварто 2500 за допомогою верхнього циліндра

Система вимірювання температури та товщини металу інтегрована з приводами і працює в реальному часі, забезпечуючи точну відповідність параметрам прокатки.

Валкова система має примусову циркуляцію води для охолодження валкових поверхонь. Підшипники ковзання та вузли тертя мають

централізовану систему змащення. Додатково застосовується подача стисненого повітря для видалення окалини із зони контакту. Будову вузла валків слябінга-1150 наведено на рис. 1.7.



1 - телескопічний кожух (150 кг, 300 кг); 2 - натискний гвинт (сталь 50ХН, 4500 кг, 9000 кг); 3 - стакан (ст5, 160 кг, 320 кг); 4 - подп'ятник (БрОЦС 6-6-3, 30 кг, 60 кг); 5 - подушка верхнього валка (сталь 35Л, 3300 кг, 6600 кг); 6 - болт М115 х 1000 (сталь 40, 100 кг, 800 кг); 7 - вкладиш підшипника (текстоліт, 30 кг, 120 кг); 8 - упор вкладиша (текстоліт, 5 кг, 40 кг); 9 - направляюча планка (сталь 40, 320 кг, 1280 кг); 10 - корпус верхньої подушки (сталь 35Л, 3200 кг, 6400 кг); 11 - кришка верхньої подушки (350 кг, 700 кг); 12 - штанга механізму вантажного урівноваження (сталь 40Х, 950 кг, 3800 кг); 13 - кришка нижньої подушки (150 кг, 300 кг); 14 - подушка нижнього валка (сталь 35Л, 3300 кг, 6600 кг); 15 - корпус нижньої подушки (сталь 35Л, 2700 кг, 5400 кг); 16 - валки (сталь 60ХН, 3200 кг, 6400 кг); 17 - планка (БрОЦС 6-6-3, 30 кг, 120 кг); 18 - підкладка (сталь 50, 150 кг, 300 кг); 19 - валик (сталь 40, 82 кг, 164 кг).

Рисунок 1.7 - Вузол валків слябінга – 1150

Фундамент стану — монолітний, армований, з урахуванням передачі динамічних і теплових навантажень. Його жорстка конструкція забезпечує точне центрування валків і стійку роботу всієї установки.

Уся система працює в складі автоматизованого комплексу керування цехом. Усі параметри прокатного процесу відстежуються, реєструються і коригуються в реальному часі.

1.2 Технологія прокатки на стані Слябінг-1150

Процес прокатки на стані Слябінг-1150 є важливим етапом у виробництві плоского металопрокату. Він передбачає деформацію нагрітого злитка з метою отримання сляба — проміжної заготовки прямокутного перерізу, яка в подальшому використовується для гарячої прокатки листа або виготовлення інших видів продукції. Прокатка виконується у двовалковій горизонтальній кліті, оснащеній вертикальними валками, що обмежують розширення металу в поперечному напрямку. З технологічної точки зору, це дозволяє покращити геометрію сляба, забезпечити контроль за шириною і зменшити ймовірність виникнення дефектів бочкоподібності [21].

Початковий етап процесу включає подачу злитка з нагрівального колодязя до кліті за допомогою приймальних рольгангів. Попередньо злиток нагрівають до температури 1150–1250 °C. Його розміщують на підйомно-поворотному столику, де встановлюється правильне положення відносно валків. Центрування є критично важливим — відхилення понад 20 мм можуть спричинити нерівномірне обтиснення або пошкодження кромок [21], [23].

Процес обтиснення здійснюється у кілька проходів — зазвичай від 11 до 15, залежно від початкових розмірів злитка, марки сталі та обраної схеми деформації. Наприклад, для злитків розміром 780×1400 мм і сталі Ст3сп застосовується технологічний режим № 8 згідно з ТИ 226-П [21], [23]. В кожному проході товщина злитка поступово зменшується — від 600–780 мм

до кінцевих 180–240 мм. Прокатка є реверсивною: після кожного обтиснення сляб повертається назад через кліть і знову подається на наступний прохід.

Умовно всі проходи ділять на чорнові та чистові. Чорнові проходи спрямовані на інтенсивне зменшення товщини злитка. Тут обтиснення може сягати 100–150 мм за один прохід. На цьому етапі важливо зберегти температуру металу, уникнувши охолодження нижче критичних значень. Зазвичай температура металу після останнього чорнового проходу має залишатися вище 1080 °C [22]. На чистовій стадії застосовуються малі обтиснення (15–25 мм), які забезпечують точність геометрії виробу та поліпшення структури металу [23], [24].

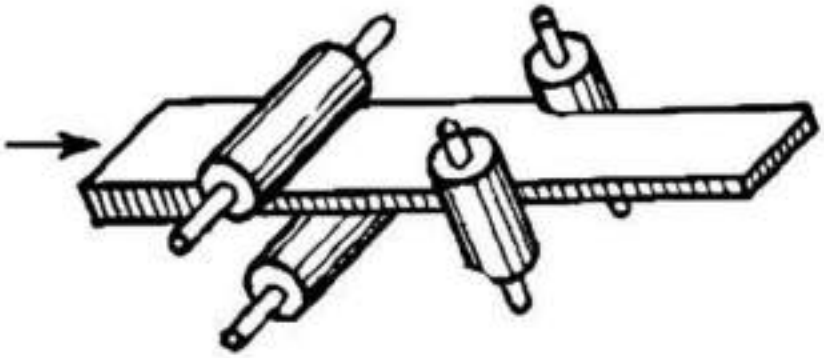


Рисунок 1.8 – Схема процесу прокатки

Однією з ключових особливостей Слябінга-1150 є система вертикальних валків. Вони не беруть безпосередньої участі у зменшенні товщини, але відіграють важливу роль у формуванні ширини сляба. При необхідності вертикальні валки активуються у певних проходах, коли існує ризик надмірного розширення заготовки. Це особливо актуально при прокатці низьковуглецевих або розкислених сталей, які мають підвищену пластичність і схильність до «розпливання» [21].

Технологічний режим визначається перед кожною партією прокатки. Оператор враховує тип сталі, масу злитка, температуру нагріву та необхідні характеристики готового сляба. У сучасній практиці використовуються типові регламентовані схеми обтиснення з баз даних. Крім того, система керування

автоматично коригує положення валків, враховуючи пружну деформацію та температуру [24].

Зусилля прокатки є одним із основних технологічних параметрів. На початкових проходах значення зусиль можуть перевищувати 30–35 МН, а моменти прокатування — 1 МН·м і більше. У зв'язку з цим система привода кліті повинна мати достатній запас потужності, а вузли охолодження — працювати з високою ефективністю. Для Слябінга-1150 це реалізовано шляхом використання потужних двигунів МПС-9000 на горизонтальних валках та багатоканальної системи водяного охолодження валків і підшипників [22].

Під час кожного проходу система АГЗ (автоматичного регулювання зазору) отримує дані з датчиків про товщину сляба, температуру та запланованє обтиснення. На основі цього розраховується нове положення робочих валків. Похибка системи становить не більше ±0,1 мм, що дозволяє забезпечити повторюваність параметрів виробу [21].

Температурний режим контролюється за допомогою пірометрів, встановлених над клітю, та вбудованих термодатчиків у рольгангах. У разі порушення температурних меж система автоматично знижує швидкість подачі або зупиняє прокатку. Це необхідно для збереження структури металу та запобігання утворенню тріщин [22].

Після кожного проходу сляб може піддаватися проміжній обробці — вогневій зачистці поверхні, обробці торців, зважуванню та тавруванню. Зона обробки обладнана візуальними системами контролю якості. У разі виявлення дефектів сляб може бути направлений на повторну прокатку або в брак [23].

Система керування прокатним станом інтегрована в загальну інформаційну систему обтискного цеху. Всі параметри процесу — температура, зусилля, геометрія слябів, оберти валків, моменти тощо — реєструються і зберігаються у вигляді електронного журналу прокатки. Ці дані використовуються для побудови карт режиму, планування обслуговування і діагностики технічного стану приводу [22], [24].

Особливе значення в сучасній технології має цифровізація. У рамках модернізації 2023 року на Слябінгу-1150 було впроваджено систему Siemens WinCC з інтеграцією в SCADA-контур цеху. Це дало змогу впровадити автоматизований контроль температури охолоджувальної води, динамічне регулювання частоти обертання валків залежно від маси сляба та температури металу, а також алгоритми прогнозу зносу валків і необхідності їх заміни [21], [22].

У випадку зміни режиму прокатки або введення нових марок сталі, інженери-технологи створюють нові карти прокатки, що враховують допустимі обтиснення, швидкості, паузи між проходами та допустимі значення температур. Наприклад, для сталі марки 15кп застосовуються більш обережні схеми з проміжним охолодженням і зменшеним обтисненням у чорнових проходах [23].

Важливим етапом після прокатки є контроль якості отриманого сляба. До основних критеріїв належать відсутність тріщин, рівномірність товщини, прямолінійність кромок та однорідність структури. Для цього використовується візуальний контроль, ультразвукова дефектоскопія та вибірковий контроль макроструктури. У разі виявлення відхилень формується протокол, а виріб може бути відправлений на повторну обробку [24].

Загалом, технологія прокатки на стані Слябінг-1150 є високоточною, автоматизованою і адаптивною до умов виробництва. Її ефективність базується на точній роботі всіх систем — від приводу валків до гідравліки, автоматизованого керування та систем діагностики. Застосування сучасних технічних рішень і впровадження цифрових технологій значно підвищує продуктивність, знижує втрати металу та забезпечує стабільну якість слябів.

1.3 Недоліки роботи обладнання

Обладнання обтискного цеху, зокрема стан Слябінг-1150 ПАТ «Запоріжсталь», працює в умовах значного механічного, температурного й вібраційного навантаження. У зв'язку з цим з плином часу виникають як окремі несправності окремих вузлів, так і комплексні технічні проблеми, що впливають на надійність роботи прокатного агрегату загалом. Враховуючи високий рівень зношеності основного обладнання (деякі вузли експлуатуються з 1960-х років), а також обмежену глибину модернізацій, актуальним є систематичний аналіз основних технічних недоліків.

Однією з найбільш поширених проблем є знос напрямних колон клітей. Зношення опорних поверхонь призводить до появи люфтів і перекосів під час прокатки, що своєю чергою спричиняє нерівномірність обтиснення та деформацію кінцевої форми сляба. Такі дефекти здебільшого не виправляються в подальших операціях та погіршують якість продукції. Крім того, зношені напрямні знижують загальну жорсткість конструкції стану, що може призводити до вібрацій, небажаних коливань і навіть резонансних явищ при змінному навантаженні.

Ще однією характерною проблемою є погіршення стану гідросистеми, що забезпечує роботу головних приводів та механізмів регулювання кліті. Через старіння ущільнень, забруднення робочої рідини та мікротріщини у трубопроводах спостерігаються витоки, втрата тиску та збої в роботі гідроциліндрів. Такі порушення унеможливлюють точне регулювання зазору між валками, що безпосередньо впливає на точність обтискання слябів. У деяких випадках спостерігається повне блокування окремих гідромеханізмів через повітря в системі або перегрів масла. Це може призвести до аварійної зупинки стану та необхідності розбирання агрегату для усунення несправностей.

Серйозною проблемою залишаються несправності у шпинделях, які передають крутний момент від електродвигуна до робочих валків. Шпинделі

Слябінгу-1150 зазнають надмірних згинальних і крутильних навантажень, особливо при роботі з великими перетинами злитків. Знос посадкових місць, утворення мікротріщин у тілі шпинделя, порушення геометрії спряжених поверхонь — усе це знижує надійність з'єднання та підвищує ризик обриву вала під час навантаження. Через відсутність системи безперервної діагностики більшість таких дефектів виявляються лише після появи вібрацій або стороннього шуму, що часто вже свідчить про критичний рівень пошкодження.

Типовим недоліком для обладнання обтискного цеху є надмірне зношення підшипникових вузлів. В умовах інтенсивної прокатки, високих температур і недостатнього змащення часто фіксується перегрів, розбиття обойм або повне руйнування підшипників. Це призводить до порушення обертання валків, нерівномірного розподілу навантаження по ширині сляба та втрати симетрії в деформації металу. У деяких випадках вихід з ладу підшипників спричиняє зсув осей прокатки, що значно знижує геометричну якість виробу та створює додаткове навантаження на механізми регулювання.

У звітах технічного аудиту [22] зазначено, що окрему небезпеку становлять дефекти редукторів головного привода. Зношення зубчастих передач, порушення центрування валів, дефіцит або деградація мастила — усе це призводить до збільшення втрат потужності, появи сторонніх шумів і навіть клинiння редукторів під навантаженням. Аварійні зупинки, пов'язані з виходом з ладу редуктора, є тривалими й вимагають залучення важкої ремонтної техніки, зокрема кран-балок і зйомників.

Негативним чинником у роботі обладнання є також часті збої в електросистемах. Старіння ізоляції кабелів, поганий контакт у релейних комірках, несправності у приводах систем автоматизації можуть призводити до несподіваних зупинок прокатки, порушення алгоритмів подачі заготовки або втрати сигналів з датчиків контролю. У деяких випадках внаслідок короткого замикання або пробою силового контакту спрацьовують аварійні реле, що повністю зупиняє процес. Особливо небезпечним є ситуація, коли

електрозбій виникає під час проходження сляба через кліть: у такому разі метал застрягає в зоні обтиснення, що загрожує як обладнанню, так і персоналу.

Сукупністю всіх вищезгаданих факторів часто обумовлюються дефекти форми кінцевої ділянки сляба. В результаті несправностей напрямних, порушень у роботі приводу або нерівномірного обтиснення, що виникають через технічні недоліки системи, крайові зони заготовок можуть набувати нестандартної геометрії. Це добре ілюструється на рисунку 1.:

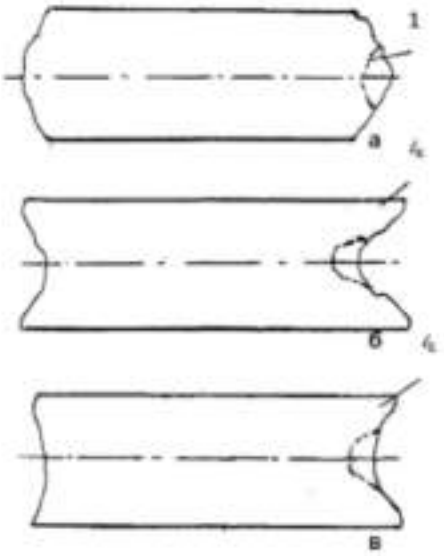


Рисунок 1.9 - Форми кінцевих ділянок сляба після прокатки: у горизонтальних валках (а), у вертикальних валках (б) і при спільній прокатці в горизонтальних і вертикальних валках (в) (1 – границі усадочної раковини)

Деформації, показані на рисунку, вказують на недосконалість геометрії прокатки при несправному або розбалансованому обладнанні. Такі кінцеві форми слябів ускладнюють їхню подальшу обробку та є причиною браку при термічному розкрої або формуванні рулонів у наступних цехах.

До непрямих наслідків несправностей належать підвищені витрати енергії, надмірний шум у робочій зоні, необхідність частої зміни налаштувань привода та втрата ритмічності виробництва. Відповідно до [21], сумарні втрати часу через аварійні зупинки на Слябінгу-1150 становлять близько 12 %

номінального часу прокатки. При цьому у [23] підкреслюється, що частка несправностей, пов'язаних із системою змащення, становить майже 25 % загальної кількості поломок.

Не менш важливим є людський фактор. Недотримання регламентів технічного обслуговування, відсутність чіткого контролю за діями операторів та використання застарілих інструкцій експлуатації призводять до технічних помилок. Нерідко несправності виявляються після втрати функціональності агрегату, а не під час планового огляду, що свідчить про недостатню ефективність системи технічного діагностування.

Системна проблема полягає і в самому підході до обслуговування: замість превентивного методу переважає реактивний — ремонт після поломки. Такий підхід, попри короткотермінову економію ресурсів, у довгостроковій перспективі призводить до зростання витрат на капітальні ремонти, простої лінії та втрати якості продукції.

Надійна та безперебійна робота Слябінгу-1150 можлива лише за умови глибокої модернізації обладнання, впровадження автоматизованих систем діагностики, а також вдосконалення організації технічного обслуговування. Запровадження цифрового моніторингу параметрів роботи вузлів, регулярне оновлення регламентів та створення культури технічної відповідальності серед персоналу є ключовими передумовами підвищення ефективності роботи прокатного стану.

З урахуванням виявлених недоліків у роботі привода обтискного прокатного стану, доцільним є удосконалення окремих конструктивних елементів, підвищення надійності з'єднань і вузлів, впровадження засобів автоматизованого контролю технічного стану, а також модернізація системи технічного обслуговування та ремонту. Це дозволить зменшити частоту аварійних зупинок, підвищити ефективність експлуатації обладнання та подовжити його ресурс.

2. Спеціальна частина

2.1 Опис обладнання привода обтискного прокатного стана Слябінг-1150

Привод обтискного прокатного стана Слябінг-1150 забезпечує обертання горизонтальних робочих валків і є основним елементом силової частини агрегату, який реалізує передачу крутного моменту на валки та створення необхідного зусилля прокатки при обтисненні злитків у гарячому стані. Схема привода безредукторна, з прямою передачею енергії від електродвигуна до валків через проміжний вал (шпиндель). Така конструкція виключає застосування редуктора, що зменшує втрати потужності, підвищує надійність і спрощує технічне обслуговування.

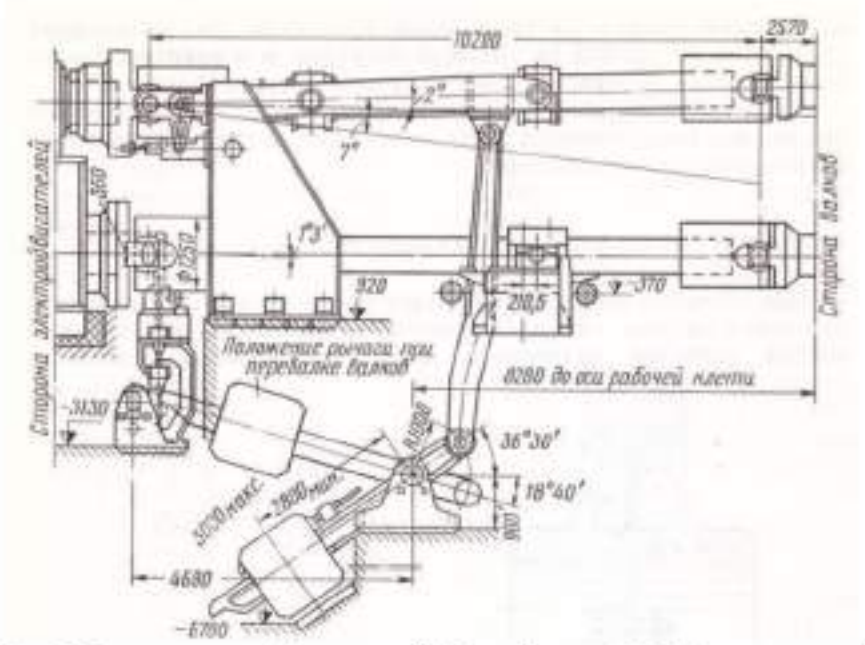


Рисунок 2.1 - Шпиндельний пристрій Слябінга-1150 (конструкція НКЗМ)

Обробка сталевих злитків великого перерізу відбувається в реверсивному режимі. Передача моменту на кожен із двох валків здійснюється індивідуально через відповідний електродвигун постійного струму типу МПС-9000-66. Номінальна потужність одного двигуна становить 7200 кВт, робоча напруга — 600 В, частота обертання — 53 об/хв. При технологічному

обтисненні частота змінюється залежно від номера проходу, від 15 об/хв у перших проходах до 40 об/хв у завершальних. Залежно від обраного режиму визначаються кутова швидкість, лінійна швидкість поверхні валка та швидкість прокатки.

Момент, створений на валу двигуна, передається безпосередньо на робочий валок через проміжну ланку — шпиндель. Довжина шпинделя складає до 2,5 м, діаметр — до 450 мм. Для виготовлення використовується легована конструкційна сталь 38ХН3МФА, що має високу міцність, добру оброблюваність і стійкість до втомного навантаження. Шпиндель піддається змінним моментам кручення та вібраційним навантаженням, які виникають під час реверсування. Його кінці з'єднані з валками та роторами двигунів через зубчасті або шліцьові муфти.

Муфта забезпечує компенсацію незначних осьових та кутових зміщень між валами, а також гасить динамічні удари при пуску та реверсуванні. У конструкції використовуються стандартні зубчасті або пружні елементи, розраховані на роботу з крутним моментом до 1,5 МН·м. Матеріал муфтової пари — сталь із термічною обробкою, твердість контактної поверхні — не менше HRC 40.

Робочі валки виготовляються зі сталі 60ХН, термічно обробленої для забезпечення необхідної твердості поверхні бочки. Геометричні параметри валка: діаметр бочки — 1150 мм, довжина — 2000 мм. Діаметр шийки — 720 мм, довжина шийки — 720 мм. Валки сприймають крутний момент і силу прокатки, що розподіляється по довжині контактної дуги. У режимі максимального навантаження зусилля обтиснення перевищує 2,5 МН, а момент на валку перевищує 1,3 МН·м. Контактна поверхня валка взаємодіє з металом при температурах понад 1200 °С.

Кожен валок спирається на два опорні вузли, що містять циліндричні роликові підшипники, змонтовані у підшипникових коробках. Підшипники мають примусове циркуляційне змащення з використанням централізованої системи, що включає насос, фільтри, бак, теплообмінник і контрольні прилади.

Температура мастила підтримується в межах 50–60 °С, а подача забезпечує достатній гідродинамічний тиск навіть при високих обертових швидкостях і навантаженнях.

Рама кліті має міжцентрову відстань 2720 мм, що забезпечує стабільність і точність при обтисненні. Напрямні коробки допускають вертикальне регулювання положення валків та фіксацію геометричних зазорів під час роботи.

У процесі деформації слябів від 780 мм до 205 мм за 13 проходів потужність, що споживається приводом, змінюється в межах 800–2900 кВт. Ці значення визначаються через опір металу деформації, середній питомий тиск, геометрію сляба, дугу контакту, окружну швидкість валків та ефективність приводу. Максимальна питома потужність виникає при зменшенні товщини заготовки до 275 мм і швидкості валків 3,5 м/с.

Прокатка здійснюється заготовками зі сталі марки Ст3сп, яка має температурно-залежний опір деформації в межах 80–150 МПа при температурах 1100–1290 °С. Опір металу враховується при визначенні середнього питомого тиску та сили прокатки, які безпосередньо використовуються при розрахунку потужності привода і крутного моменту.

Кожен прохід характеризується конкретним обтисненням, середньою товщиною, середньою шириною, довжиною, температурою, окружною швидкістю та питомою потужністю. При розрахунку крутного моменту враховується розрахункова потужність на валу, обертова частота та коефіцієнт корисної дії. Кутова швидкість визначається через обертову частоту, що змінюється відповідно до технологічного графіку.

Перевірка міцності шпинделя, валків і муфт виконується з урахуванням отриманого крутного моменту, зусилля прокатки та напружень згину та кручення. Для сталі 38ХН3МФА допустиме напруження на кручення — 80–90 МПа, для сталі 60ХН — допустиме напруження на згин — 120–140 МПа. Усі елементи конструкції мають запас міцності не менше 1,5 відповідно до стандартів [23].

Конструкція привода передбачає наявність сервісного доступу до вузлів, а також системи моніторингу температур, тиску мастила та вібрацій. Усі ключові компоненти працюють у повторно-короткочасному режимі з багаторазовими пусками, реверсами та навантаженням близьким до граничного.

Враховуючи характер навантаження, система з'єднань у приводі повинна забезпечувати мінімальний люфт, компенсацію теплових розширень і стійкість до втомного руйнування. З'єднання шпиндель-валок виконується із застосуванням прецизійної посадки, з обробкою шліців та зубців згідно з класом точності не нижче 7. Технологічні припуски забезпечують надійну передачу моменту при збереженні геометричних параметрів після термічного впливу.

Усі елементи трансмісії працюють в умовах температурних, ударних, згинальних та крутильних навантажень. Система привода проєктована з урахуванням змінного режиму роботи, де кожен прохід передбачає новий рівень обтиснення, сили прокатки та крутного моменту.

2.2 Розрахунок технології пластичної деформації слябів

Розрахунки виконано за стандартною методикою [23] з використанням фактичних режимів підприємства [21].

Розрахункові параметри пластичної деформації: сталевого злитка з масою до 20 т і початковим перетином 780×1400×3000 мм на сляб із кінцевим перетином 200×(1170-1360) мм. Середня температура металу перед подачею до прокатної кліті приймається рівною 1290 °С, а температура кінця прокатки не нижче 1100 °С, відповідно до регламенту гарячого прокатування для вуглецевих сталей [21].

Прокат виконується на стані Слябінг-1150, який має дві кліті: горизонтальну та вертикальну. Горизонтальна кліть є реверсивною, закритого типу, з робочими валками діамстром 1150 мм і довжиною бочки 2000 мм. Відстань між осями натискних гвинтів становить 2720 мм, діаметр шийки валка — 720 мм, довжина шийки — 720 мм. Вертикальна кліть обладнана валками діаметром 700 мм та довжиною бочки 1150 мм. Горизонтальні валки мають індивідуальний привід від електродвигунів типу МПС 9000-66 потужністю 7200 кВт, а вертикальні валки приводяться в дію чотирма двигунами ПВ2 800.175-8УЗ потужністю 1250 кВт кожен через редуктор з передаточним числом 3,744 [21], [22].

В якості прикладу розрахунку прийнято режим обтиснення № 8 для злитків типу 2Б з вуглецевої сталі Ст3сп (C ≈ 0.18; Si ≈ 0.23; Mn ≈ 0.53; Ni= до 0.3; S= до 0.05; P=до 0.04 Cr=до 0.3; N= до 0.008; Cu=до 0.3; As= до 0.08.), яка належать до II групи режимів обтиснень згідно з технологічною інструкцією [21], [23].

У режимі № 8 передбачено 13 проходів у робочій кліті з розподілом абсолютного обтиснення по кожному проходу. Вихідні дані наведено у таблиці 1.

Таблиця 2.1 – Режим обтиснення № 8 злитків типу 2Б перерізом 780×1400 мм [21]

Перетин слябів, мм	Номер проходу	Горизонтальна кліть, мм			Вертикальна кліть, мм	
		Показники циферблата h	Обти-скання Δh	Розши-рення	Показники циферблата b	Обти-скання Δb
1	2	3	4	5	6	7
200х(1170-1360)	0	780	-	-	1400	-
	1	670	110	11	1351	60
	2	620	50	5	1340	16
	3	570	50	6	1326	20
	4	520	50	5	1320	11
	5	470	50	8	1298	30
	6	420	50	12	1290	20
	7	370	50	16	1276	30
	8	325	45	17	1260	33
	9	275	50	22	1252	30
	10	240	35	17	1230	39
	11	220	20	10	1210	30
	12	205	15	7	1200	17
	13	205	0	0	1180	20

На основі поданого режиму виконується поетапний розрахунок основних технологічних параметрів прокатки.

Для розрахунків, які базуються на контакті між металом і обертальними валками, що передають основне навантаження, враховуються тільки горизонтальні робочі валки, бо саме вони забезпечують основну пластичну деформацію сляба. Вертикальні валки виконують допоміжну функцію обмеження розширення й у розрахунки не включаються.

Коефіцієнт тертя при захопленні розкату валками дорівнює:

$$f_З = f \cdot k_З \cdot k_Q, \tag{2.1}$$

де: $k_з$=1,35 - коефіцієнт, що враховує умови тертя при захопленні;

k_Q=1,02…1,1 – коефіцієнт, який моделює покращення захоплення внаслідок впливу рольгангу чи інших сил;

f — коефіцієнт тертя у сталому процесі;

$$f = f_0 \cdot k_B \cdot k_T \cdot k_M \cdot k_V \cdot k_{ЗМ} \cdot k_E, \tag{2.2}$$

де: $k_в$ - коефіцієнт, на матеріал валків;

k_T – коефіцієнт, на твердість поверхні валків;

k_M - коефіцієнт, властивостей матеріала сляба;

$k_{ЗМ}$ - коефіцієнт змащування;

k_V – коефіцієнт, на окружну швидкість валків;

k_E - коефіцієнт, ступінь обтиснення в проході;

f_0 - базовий коефіцієнт тертя;

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{t}{400} - 2\right)^2, \tag{2.3}$$

t = 1290 °С, температура металу перед першим проходом у кліть;

$$f_0 = 0.27 - 0.1\left(\frac{1290}{400} - 2\right)^2 = 0{,}12.$$

Коефіцієнти k_T і k_V відповідно рівні:

$$k_T = 1 + 0.43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2, \tag{2.4}$$

де: HSD – твердість валків по шкалі Шора, приймаємо як 50 (сталь 60ХН);

$$k_V = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot V)^2, \tag{2.5}$$

де: V - швидкість валків 53 об/хв = 3,2 м/с;

$$k_T = 1 + 0.43\left(1 - \frac{50}{65}\right)^2 = 1{,}02;$$

$$k_V = 0.76 + 0.82(1 - 0.1 \cdot 3.2)^2 = 1.14.$$

Прийняті значення поправочних коефіцієнтів: $k_в$=1,1 — для сталевих валків; $k_М$=1,0 — для прокату з маловуглецевої сталі; $k_{ЗМ}$=1,0 — коефіцієнт, для слябінгу з водяним охолодженням валків;; $k_Е$=0,95 — коефіцієнт, ступінь обтиснення в проході.

$$f = 0.12 \cdot 1.1 \cdot 1.02 \cdot 1 \cdot 1.14 \cdot 1 \cdot 0.95 = 0{,}15;$$

$$f_3 = 0{,}15 \cdot 1{,}35 \cdot 1{,}1 = 0{,}22.$$

Максимально допустиме обтиснення:

$$\Delta h_{max} = \alpha_{max} \cdot R, \tag{2.6}$$

де: R — радіус робочого валка, мм;

α_{max} — допустимий кут захоплення, рад

$$\alpha_{max} = \arctan(f_3); \tag{2.7}$$

$$\alpha_{max} = \arctan(0{,}22) = 0{,}217 \text{ рад} = 12°24';$$

$$\Delta h_{max} = 0{,}217 \cdot 575 = 124{,}8 \text{ мм},$$

Площа розката за проходами:

$$S_i = h_i \cdot b_i \tag{2.8}$$

де: h_i – товщина в і проході;

b_i – ширина в і проході.

$$S_0 = 780 \cdot 1400 = 1092000 \text{ мм}^2;$$

$S_1 = 670 \cdot 1351 = 905170$ мм^2 $S_3 = 570 \cdot 1326 = 755820$ мм^2

$S_2 = 620 \cdot 1340 = 830800$ мм^2 $S_4 = 520 \cdot 1320 = 686400$ мм^2

$S_5 = 470 \cdot 1298 = 610060$ мм^2

$S_6 = 420 \cdot 1290 = 541800$ мм^2

$S_7 = 370 \cdot 1276 = 472120$ мм^2

$S_8 = 325 \cdot 1260 = 409500$ мм^2

$S_9 = 275 \cdot 1252 = 344300$ мм^2

$S_{10} = 240 \cdot 1230 = 295200$ мм^2

$S_{11} = 220 \cdot 1210 = 266200$ мм^2

$S_{12} = 205 \cdot 1200 = 246000$ мм^2

$S_{13} = 205 \cdot 1180 = 241900$ мм^2.

Коефіцієнт витягування за проходами:

$$\mu_i = \frac{F_{i-1}}{F_i}; \qquad (2.9)$$

$\mu_1 = \frac{1092000}{905170} = 1.21$

$\mu_2 = \frac{905170}{830800} = 1.089$

$\mu_3 = \frac{830800}{755820} = 1.099$

$\mu_4 = \frac{755820}{686400} = 1.101$

$\mu_5 = \frac{686400}{610060} = 1.125$

$\mu_6 = \frac{610060}{541800} = 1.126$

$\mu_7 = \frac{541800}{472120} = 1.148$

$\mu_8 = \frac{472120}{409500} = 1.153$

$\mu_9 = \frac{409500}{344300} = 1.189$

$\mu_{10} = \frac{344300}{295200} = 1.166$

$\mu_{11} = \frac{295200}{266200} = 1.109$

$\mu_{12} = \frac{266200}{246000} = 1.082$

$\mu_{13} = \frac{246000}{241900} = 1.017.$

Довжина розката за проходами

$$l_i = l_{i-1} \cdot \mu_i; \qquad (2.10)$$

$l_1 = 3 \cdot 1.21 = 3.63$ м

$l_2 = 3{,}63 \cdot 1.089 = 3{,}95$ м

$l_3 = 3{,}95 \cdot 1.099 = 4{,}34$ м

$l_4 = 4{,}34 \cdot 1.101 = 4{,}78$ м

$l_5 = 4{,}78 \cdot 1.125 = 5{,}38$ м

$l_6 = 5{,}38 \cdot 1.126 = 6{,}05$ м

$l_7 = 6{,}05 \cdot 1.148 = 6{,}95$ м

$l_8 = 6{,}95 \cdot 1.153 = 8{,}01$ м

$l_9 = 8{,}01 \cdot 1.189 = 9{,}53$ м

$l_{10} = 9{,}53 \cdot 1.166 = 11{,}12$ м

$l_{11} = 11{,}12 \cdot 1.109 = 12{,}32$ м

$l_{12} = 12{,}32 \cdot 1.082 = 13{,}33$ м

$l_{13} = 13{,}33 \cdot 1.017 = 13{,}56$ м.

Кути захоплення горизонтальних валків за проходами:

$$\alpha_n = 57.3\sqrt{\frac{\Delta h_i}{R}}; \qquad (2.11)$$

$\alpha_1 = 57.3\sqrt{\frac{110}{575}} = 25°$

$\alpha_{2-7} = 57.3\sqrt{\frac{50}{575}} = 17°$

$\alpha_8 = 57.3\sqrt{\frac{45}{575}} = 16°$

$\alpha_9 = 57.3\sqrt{\frac{50}{575}} = 17°$

$\alpha_{10} = 57.3\sqrt{\frac{35}{575}} = 14°$

$\alpha_{11} = 57.3\sqrt{\frac{20}{575}} = 11°$

$\alpha_{12} = 57.3\sqrt{\frac{15}{575}} = 9°.$

Середня товщина розкату:

$$h_{cp} = \frac{h_i + h_{i-1}}{2}; \qquad (2.12)$$

$h_{cp1} = \frac{780 + 670}{2} = 725$ мм

$h_{cp2} = \frac{670 + 620}{2} = 645$ мм

$$h_{cp3} = \frac{620 + 570}{2} = 595 \text{ мм}$$

$$h_{cp4} = \frac{570 + 520}{2} = 545 \text{ мм}$$

$$h_{cp5} = \frac{520 + 470}{2} = 495 \text{ мм}$$

$$h_{cp6} = \frac{470 + 420}{2} = 445 \text{ мм}$$

$$h_{cp7} = \frac{420 + 370}{2} = 395 \text{ мм}$$

$$h_{cp8} = \frac{370 + 325}{2} = 347{,}5 \text{ мм}$$

$$h_{cp9} = \frac{325 + 275}{2} = 300 \text{ мм}$$

$$h_{cp10} = \frac{275 + 240}{2} = 257{,}5 \text{ мм}$$

$$h_{cp11} = \frac{240 + 220}{2} = 230 \text{ мм}$$

$$h_{cp12} = \frac{220 + 205}{2} = 212{,}5 \text{ мм}$$

$$h_{cp13} = \frac{205 + 205}{2} = 205 \text{ мм.}$$

Довжина дуги контакту:

$$l_д = \sqrt{R_Г \cdot \Delta h}; \qquad (2.13)$$

$$l_{д1} = \sqrt{575 \cdot 110} = 251{,}5 \text{ мм}$$

$$l_{д2-7} = \sqrt{575 \cdot 50} = 169{,}6 \text{ мм}$$

$$l_{д8} = \sqrt{575 \cdot 45} = 160{,}9 \text{ мм}$$

$$l_{д9} = \sqrt{575 \cdot 50} = 169{,}6 \text{ мм}$$

$$l_{д10} = \sqrt{575 \cdot 35} = 141{,}9 \text{ мм}$$

$$l_{д11} = \sqrt{575 \cdot 20} = 107{,}2 \text{ мм}$$

$$l_{д12} = \sqrt{575 \cdot 15} = 92{,}9 \text{ мм}$$

$$l_{д13} = 0.$$

Площа контактної поверхні:

$$F = \frac{b_{i-1} + b_i}{2} \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h_i}; \qquad (2.14)$$

$$F_1 = 1375.5 \cdot \sqrt{575 \cdot 110} = 345932{,}1 \text{ мм}^2$$

$$F_2 = 1345.5 \cdot \sqrt{575 \cdot 50} = 229140{,}6 \text{ мм}^2$$

$$F_3 = 1333 \cdot \sqrt{575 \cdot 50} = 226021.2 \text{ мм}^2$$

$$F_4 = 1323 \cdot \sqrt{575 \cdot 50} = 224325.6 \text{ мм}^2$$

$$F_5 = 1309 \cdot \sqrt{575 \cdot 50} = 221951{,}8 \text{ мм}^2$$

$$F_6 = 1294 \cdot \sqrt{575 \cdot 50} = 219408{,}4 \text{ мм}^2$$

$$F_7 = 1283 \cdot \sqrt{575 \cdot 50} = 217543{,}2 \text{ мм}^2$$

$$F_8 = 1268 \cdot \sqrt{575 \cdot 45} = 203966{,}8 \text{ мм}^2$$

$$F_9 = 1256 \cdot \sqrt{575 \cdot 50} = 212965{,}2 \text{ мм}^2$$

$$F_{10} = 1241 \cdot \sqrt{575 \cdot 35} = 176051{,}5 \text{ мм}^2$$

$$F_{11} = 1220 \cdot \sqrt{575 \cdot 20} = 130830{,}4 \text{ мм}^2$$

$$F_{12} = 1205 \cdot \sqrt{575 \cdot 15} = 111909{,}4 \text{ мм}^2$$

$$F_{13} = 0.$$

Температура розкату по проходам:

Приймаємо температура розкату першого проходу t_1 =1290°С.

Втрати температури у і-тому проході приблизно можна визначити з виразу:

$$\Delta t_{\Sigma} = 240 \left(1 - \frac{h_i}{h_1}\right)^3; \qquad (2.15)$$

$$\Delta t_{\Sigma 1} = 240 \left(1 - \frac{670}{670}\right)^3 = 0 \qquad \Delta t_{\Sigma 5} = 240 \left(1 - \frac{470}{670}\right)^3 = 6{,}4°\text{C}$$

$$\Delta t_{\Sigma 2} = 240 \left(1 - \frac{620}{670}\right)^3 = 0{,}1°\text{C} \qquad \Delta t_{\Sigma 6} = 240 \left(1 - \frac{420}{670}\right)^3 = 12{,}5°\text{C}$$

$$\Delta t_{\Sigma 3} = 240 \left(1 - \frac{570}{670}\right)^3 = 0{,}8°\text{C} \qquad \Delta t_{\Sigma 7} = 240 \left(1 - \frac{370}{670}\right)^3 = 21{,}6°\text{C}$$

$$\Delta t_{\Sigma 4} = 240 \left(1 - \frac{520}{670}\right)^3 = 2{,}7°\text{C} \qquad \Delta t_{\Sigma 8} = 240 \left(1 - \frac{325}{670}\right)^3 = 32{,}8°\text{C}$$

$$\Delta t_{\Sigma 9} = 240\left(1-\frac{275}{670}\right)^3 = 49{,}2°C \qquad \Delta t_{\Sigma 11} = 240\left(1-\frac{220}{670}\right)^3 = 72{,}7°C$$

$$\Delta t_{\Sigma 10} = 240\left(1-\frac{240}{670}\right)^3 = 63°C \qquad \Delta t_{\Sigma 12-13} = 240\left(1-\frac{205}{670}\right)^3 = 80°C.$$

Температура металу в і проході

$$t_i = t_1 - \Delta t_{\Sigma;} \tag{2.16}$$

$$t_2 = 1290 - 0{,}1 = 1289{,}9°C \qquad t_8 = 1290 - 32{,}8 = 1257{,}2°C$$

$$t_3 = 1290 - 0{,}8 = 1289{,}2°C \qquad t_9 = 1290 - 49{,}21 = 1240{,}79°C$$

$$t_4 = 1290 - 2{,}7 = 1287{,}3°C \qquad t_{10} = 1290 - 63 = 1227°C$$

$$t_5 = 1290 - 6{,}4 = 1285{,}6°C \qquad t_{11} = 1290 - 72{,}7 = 1217{,}9°C$$

$$t_6 = 1290 - 12{,}5 = 1277{,}5°C \qquad t_{12} = 1290 - 80 = 1210°C$$

$$t_7 = 1290 - 21{,}6 = 1268{,}4°C \qquad t_{13} = 1290 - 80 = 1210°C.$$

Реальні втрати тепла — через контакт з валками, охолодження повітрям, випромінювання та тривалість пауз між проходами — у формулі не враховані тому результати розрахунку відображають лише умовну температуру, яка не враховує повного комплексу теплових втрат у реальному технологічному процесі. Це призводить до завищеного значення температури.

Втім, отриманих розрахункових значень температури достатньо, оскільки вони відображають загальну тенденцію її зниження в процесі прокатки та забезпечують наближене уявлення про тепловий стан металу, необхідне для інженерних оцінок і подальших технологічних розрахунків.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку режиму обтисків

№	Параметри								
	S, мм^2	μ	l, м	α °	α, рад	$h_{ср}$, мм	$l_ф$, мм	F, мм^2	t °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	905170	1,21	3,63	25	0,44	725	251,5	345932,1	1290
2	830800	1,089	3,95	17	0,30	645	169,6	229140,6	1289,9
3	755820	1,099	4,34	17	0,30	595	169,6	226021,2	1289,2
4	686400	1,101	4,78	17	0,30	545	169,6	224325,6	1287,3
5	610060	1,125	5,38	17	0,30	495	169,6	221951,8	1285,6
6	541800	1,126	6,05	17	0,30	445	169,6	219408,4	1277,5
7	472120	1,148	6,95	17	0,30	395	169,6	217543,2	1268,4
8	409500	1,153	8,01	16	0,28	347,5	160,9	203966,8	1257,2
9	344300	1,189	9,53	17	0,30	300	169,6	212965,2	1240,79
10	295200	1,166	11,12	14	0,24	257,5	141,9	176051,5	1227
11	266200	1,109	12,32	11	0,19	230	107,2	130830,4	1217,9
12	246000	1,082	13,33	9	0,16	212,5	92,9	111909,4	1210
13	244900	1,017	13,56	0	0,00	205	0	0	1210

2.3 Розрахунок потужності привода

У процесі прокатки основне енергетичне навантаження передається через горизонтальні робочі валки, які безпосередньо здійснюють пластичну деформацію металу. Саме тому всі розрахунки потужності привода, базуються на параметрах горизонтальної кліті. Вертикальні валки виконують допоміжну функцію — та не враховуються у силових і енергетичних розрахунках.

Середнє значення межі текучості:

$$\sigma_T = 1{,}15 \cdot \sigma_0 \cdot K_t \cdot K_u \cdot K_l, \qquad (2.17)$$

де: σ_0=86 МПа— базова межа текучості;

K_t=0,6, K_u=0,9, K_v=1,35 — коефіцієнти: температурний, деформаційний та швидкісний відповідно [25].

$$\sigma_T = 1{,}15 \cdot 86 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}9 \cdot 1{,}35 = 72{,}1.$$

Коефіцієнт зовнішнього тертя:

$$f_з = К_{хс} \cdot К_{\nu} \cdot К_{хв} \cdot (1{,}05 - 0{,}0005 \cdot t_i), \quad (2.18)$$

де: $К_{хс} = 1$ - коефіцієнт хімічний склад валків;

$К_{хв} = 1$ - коефіцієнт хімічний склад смуги.

$$f_{з1} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1290) = 0{,}55$$
$$f_{з2} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1289{,}9) = 0{,}55$$
$$f_{з3} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1289{,}2) = 0{,}55$$
$$f_{з4} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1287{,}3) = 0{,}55$$
$$f_{з5} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1285{,}6) = 0{,}55$$
$$f_{з6} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1277{,}5) = 0{,}56$$
$$f_{з7} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1268{,}4) = 0{,}56$$
$$f_{з8} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1257{,}2) = 0{,}57$$
$$f_{з9} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1240{,}79) = 0{,}58$$
$$f_{з10} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1227) = 0{,}59$$
$$f_{з11} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1217{,}9) = 0{,}6$$
$$f_{з12} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1210) = 0{,}6$$
$$f_{з13} = 1{,}35(1{,}05 - 0{,}0005 \cdot 1210) = 0{,}6.$$

Температурний коефіцієнт:

$$k_t = \frac{(t_{пл} - 75 - t_i)}{t_{пл}}, \quad (2.19)$$

де: $t_{пл}$ - температура плавлення сталі, = 1500°С.

$$k_{t1} = \frac{(1500 - 75 - 1290)}{1500} = 0{,}09$$
$$k_{t2} = \frac{(1500 - 75 - 1289{,}9)}{1500} = 0{,}09$$
$$k_{t3} = \frac{(1500 - 75 - 1289{,}2)}{1500} = 0{,}091$$

$$k_{t4} = \frac{(1500 - 75 - 1287{,}3)}{1500} = 0{,}092$$

$$k_{t5} = \frac{(1500 - 75 - 1285{,}6)}{1500} = 0{,}093$$

$$k_{t6} = \frac{(1500 - 75 - 1277{,}5)}{1500} = 0{,}098$$

$$k_{t7} = \frac{(1500 - 75 - 1268{,}4)}{1500} = 0{,}104$$

$$k_{t8} = \frac{(1500 - 75 - 1257{,}2)}{1500} = 0{,}112$$

$$k_{t9} = \frac{(1500 - 75 - 1240{,}79)}{1500} = 0{,}123$$

$$k_{t10} = \frac{(1500 - 75 - 1227)}{1500} = 0{,}132$$

$$k_{t11} = \frac{(1500 - 75 - 1217{,}9)}{1500} = 0{,}138$$

$$k_{t12} = \frac{(1500 - 75 - 1210)}{1500} = 0{,}143$$

$$k_{t13} = \frac{(1500 - 75 - 1210)}{1500} = 0{,}143.$$

Опір деформації:

$$k = k_t \cdot \sigma_в, \qquad (2.20)$$

де: k_t – температурний коефіцієнт;

$\sigma_в$ – межа міцності сталі, приймаємо як 400 МН/м^2.

$k_1 = 0{,}09 \cdot 400 = 36\text{МПа}$

$k_2 = 0{,}09 \cdot 400 = 36\text{МПа}$

$k_3 = 0{,}091 \cdot 400 = 36{,}4\text{МПа}$

$k_4 = 0{,}092 \cdot 400 = 36{,}8\text{МПа}$

$k_5 = 0{,}093 \cdot 400 = 37{,}2\text{МПа}$

$k_6 = 0{,}098 \cdot 400 = 39{,}2\text{МПа}$

$k_7 = 0{,}104 \cdot 400 = 41{,}6\text{МПа}$

$k_8 = 0{,}112 \cdot 400 = 44{,}8\text{МПа}$

$k_9 = 0{,}123 \cdot 400 = 49{,}2\text{МПа}$

$k_{10} = 0{,}132 \cdot 400 = 52{,}8\text{МПа}$

$k_{11} = 0{,}138 \cdot 400 = 55{,}2\text{МПа}$

$k_{12} = 0{,}143 \cdot 400 = 57{,}2\text{МПа}$

$k_{13} = 0{,}143 \cdot 400 = 57{,}2\text{МПа}.$

Середній питомий тиск (МПа):

$$p_{cp} = k \cdot \left(1 + f \cdot \left(\frac{l_{зі}}{h_i} - 1\right)\right); \quad (2.21)$$

$$p_{cp1} = 36\left(1 + 0{,}55\left(\frac{251.5}{670} - 1\right)\right) = 23{,}6$$

$$p_{cp2} = 36\left(1 + 0{,}55\left(\frac{169{,}6}{620} - 1\right)\right) = 21{,}6$$

$$p_{cp3} = 36{,}4\left(1 + 0{,}55\left(\frac{169{,}6}{570} - 1\right)\right) = 22{,}3$$

$$p_{cp4} = 36{,}8\left(1 + 0{,}55\left(\frac{169{,}6}{520} - 1\right)\right) = 23{,}2$$

$$p_{cp5} = 37{,}2\left(1 + \cdot\, 0{,}55\left(\frac{169{,}6}{470} - 1\right)\right) = 24{,}1$$

$$p_{cp6} = 39{,}2\left(1 + 0{,}56\left(\frac{169{,}6}{420} - 1\right)\right) = 26{,}1$$

$$p_{cp7} = 41{,}6\left(1 + 0{,}56\left(\frac{169{,}6}{370} - 1\right)\right) = 29$$

$$p_{cp8} = 44{,}8\left(1 + 0{,}57\left(\frac{160{,}9}{325} - 1\right)\right) = 31{,}9$$

$$p_{cp9} = 49{,}2\left(1 + 0{,}58\left(\frac{169{,}6}{275} - 1\right)\right) = 38{,}3$$

$$p_{cp10} = 52{,}8\left(1 + 0{,}59\left(\frac{141{,}9}{240} - 1\right)\right) = 40{,}1$$

$$p_{cp11} = 55{,}2\left(1 + 0{,}6\left(\frac{107{,}2}{220} - 1\right)\right) = 38{,}2$$

$$p_{cp12} = 57{,}2\left(1 + 0{,}6\left(\frac{92{,}9}{205} - 1\right)\right) = 38{,}4$$

$$p_{cp13} = 57{,}2\left(1 + 0{,}6\left(\frac{0}{205} - 1\right)\right) = 22{,}9$$

Сила прокатки:

$$P_i = p_{cpi} \cdot F_i; \quad (2.22)$$

$P_1 = 23{,}6 \cdot 345932.1 = 8{,}18\ МН$ $P_7 = 29 \cdot 217543.3 = 6{,}3МН$

$P_2 = 21{,}6 \cdot 229140.6 = 4{,}95\ МН$ $P_8 = 31{,}9 \cdot 203966.8 = 6{,}51МН$

$P_3 = 22{,}3 \cdot 226021.2 = 5{,}1МН$ $P_9 = 38{,}3 \cdot 212965.2 = 8{,}15МН$

$P_4 = 23{,}2 \cdot 224325.6 = 5{,}2МН$ $P_{10} = 40{,}1 \cdot 176051.5 = 7{,}05МН$

$P_5 = 24{,}1 \cdot 221951.8 = 5{,}35МН$ $P_{11} = 38{,}2 \cdot 130830.4 = 5МН$

$P_6 = 26{,}1 \cdot 219408.4 = 5{,}73МН$ $P_{12} = 38{,}4 \cdot 111909.4 = 4{,}3МН$

Момент прокатування (МНм):

$$M_{пр} = P \cdot \psi \cdot l_{ді}, \quad (2.23)$$

де: ψ – коефіцієнт плеча прикладання зусилля прокатування, приймаємо $\psi = 0{,}5$ [26].

$$M_{пр0} = 0$$

$M_{пр1} = 8{,}18 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}2515 = 1{,}03$ $M_{пр7} = 6{,}3 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1696 = 0{,}53$

$M_{пр2} = 4{,}95 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1696 = 0{,}42$ $M_{пр8} = 6{,}51 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1609 = 0{,}52$

$M_{пр3} = 5{,}1 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1696 = 0{,}43$ $M_{пр9} = 8{,}15 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1696 = 0{,}69$

$M_{пр4} = 5{,}2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1696 = 0{,}44$ $M_{пр10} = 7{,}05 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1419 = 0{,}5$

$M_{пр5} = 5{,}35 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1696 = 0{,}45$ $M_{пр11} = 5 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1072 = 0{,}27$

$M_{пр6} = 5{,}73 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}1696 = 0{,}49$ $M_{пр12} = 4{,}3 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}0929 = 0{,}2$

Нейтральний кут (рад):

$$\gamma_i = \frac{\frac{0{,}5\alpha_i}{1-\alpha_i}}{2f}; \quad (2.24)$$

$$\gamma_1 = \frac{\frac{0{,}5 \cdot 0{,}44}{1-0{,}44}}{2 \cdot 0{,}15} = 0{,}12 \qquad \gamma_8 = \frac{\frac{0{,}5 \cdot 0{,}28}{1-0{,}28}}{2 \cdot 0{,}15} = 0{,}058$$

$$\gamma_{2-7} = \frac{\frac{0{,}5 \cdot 0{,}3}{1-0{,}3}}{2 \cdot 0{,}15} = 0{,}06 \qquad \gamma_9 = \frac{\frac{0{,}5 \cdot 0{,}3}{1-0{,}3}}{2 \cdot 0{,}15} = 0{,}06$$

$$\gamma_{10} = \frac{\frac{0,5 \cdot 0,24}{1-0,24}}{2 \cdot 0,15} = 0,047 \qquad \gamma_{12} = \frac{\frac{0,5 \cdot 0,16}{1-0,16}}{2 \cdot 0,15} = 0,029$$

$$\gamma_{11} = \frac{\frac{0,5 \cdot 0,19}{1-0,19}}{2 \cdot 0,15} = 0,035$$

Випередження металу:

$$S_i = \gamma_i \cdot \frac{R}{h_i} \tag{2.25}$$

$$S_1 = 0,12 \cdot \frac{575}{670} = 0,103 \qquad S_7 = 0,06 \cdot \frac{575}{370} = 0,093$$

$$S_2 = 0,06 \cdot \frac{575}{620} = 0,056 \qquad S_8 = 0,058 \cdot \frac{575}{325} = 0,103$$

$$S_3 = 0,06 \cdot \frac{575}{570} = 0,061 \qquad S_9 = 0,06 \cdot \frac{575}{275} = 0,126$$

$$S_4 = 0,06 \cdot \frac{575}{520} = 0,066 \qquad S_{10} = 0,047 \cdot \frac{575}{240} = 0,113$$

$$S_5 = 0,06 \cdot \frac{575}{470} = 0,07 \qquad S_{11} = 0,035 \cdot \frac{575}{220} = 0,092$$

$$S_6 = 0,06 \cdot \frac{575}{420} = 0,082 \qquad S_{12} = 0,029 \cdot \frac{575}{205} = 0,081.$$

Окружна швидкість робочого валка:

Частота обертання горизонтальних робочих валків за проходами визначається згідно з ТІ [21] і становить: 15 об/хв у першому і 20 об/хв у другому, 30 об/хв у проходах 3–7, та 40 об/хв у проходах 8–13.

$$V_в = \frac{\pi D n}{60} \tag{2.26}$$

$$V_{в1} = \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 15}{60} = 1,2 \frac{м}{с} \qquad V_{в3-7} = \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 30}{60} = \frac{2,4м}{с}$$

$$V_{в2} = \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 20}{60} = \frac{1,6м}{с} \qquad V_{в8-13} = \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 40}{60} = \frac{3,1м}{с}.$$

Швидкість прокатування:

$$V = V_в \cdot (1 + S_i) \tag{2.27}$$

$V_1 = 1{,}2 \cdot (1 + 0{,}103) = 1{,}3 \frac{м}{с}$

$V_2 = 1{,}6 \cdot (1 + 0{,}056) = 1{,}69 \frac{м}{с}$

$V_3 = 2{,}4 \cdot (1 + 0{,}061) = 2{,}55 \frac{м}{с}$

$V_4 = 2{,}4 \cdot (1 + 0{,}066) = 2{,}56 \frac{м}{с}$

$V_5 = 2{,}4 \cdot (1 + 0{,}07) = 2{,}58 \frac{м}{с}$

$V_6 = 2{,}4 \cdot (1 + 0{,}082) = 2{,}6 \frac{м}{с}$

$V_7 = 2{,}4 \cdot (1 + 0{,}093) = 2{,}62 \frac{м}{с}$

$V_8 = 3{,}1 \cdot (1 + 0{,}103) = 3{,}42 \frac{м}{с}$

$V_9 = 3{,}1 \cdot (1 + 0{,}126) = 3{,}49 \frac{м}{с}$

$V_{10} = 3{,}1 \cdot (1 + 0{,}113) = 3{,}45 \frac{м}{с}$

$V_{11} = 3{,}1 \cdot (1 + 0{,}092) = 3{,}38 \frac{м}{с}$

$V_{12} = 3{,}1 \cdot (1 + 0{,}081) = 3{,}35 \frac{м}{с}$

$V_{13} = 3{,}1 \cdot (1 + 0) = 3{,}1 \frac{м}{с}$

Величина відносного обтискання:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h}{h_{сpi}} \tag{2.28}$$

$\varepsilon_1 = \frac{110}{725} = 0{,}15$

$\varepsilon_2 = \frac{50}{645} = 0{,}08$

$\varepsilon_3 = \frac{50}{595} = 0{,}08$

$\varepsilon_4 = \frac{50}{545} = 0{,}09$

$\varepsilon_5 = \frac{50}{495} = 0{,}1$

$\varepsilon_6 = \frac{50}{445} = 0{,}11$

$\varepsilon_7 = \frac{50}{395} = 0{,}13$

$\varepsilon_8 = \frac{35}{374{,}5} = 0{,}12$

$\varepsilon_9 = \frac{50}{300} = 0{,}17$

$\varepsilon_{10} = \frac{35}{257{,}5} = 0{,}14$

$\varepsilon_{11} = \frac{20}{230} = 0{,}09$

$\varepsilon_{12} = \frac{15}{212{,}5} = 0{,}07$

Швидкість деформації ($с^{-1}$):

$$U_i = \frac{V}{l_{дi} \cdot \varepsilon_i} \quad (2.29)$$

$$U_1 = \frac{1,32}{251,5 \cdot 0,15} = 0,04 \qquad U_7 = \frac{2,61}{169,6 \cdot 0,13} = 0,12$$

$$U_2 = \frac{1,69}{169,6 \cdot 0,08} = 0,13 \qquad U_8 = \frac{3,42}{160,9 \cdot 0,12} = 0,18$$

$$U_3 = \frac{2,55}{169,6 \cdot 0,08} = 0,18 \qquad U_9 = \frac{3,49}{169,6 \cdot 0,17} = 0,12$$

$$U_4 = \frac{2,56}{169,6 \cdot 0,09} = 0,16 \qquad U_{10} = \frac{3,45}{141,9 \cdot 0,14} = 0,18$$

$$U_5 = \frac{2,58}{169,6 \cdot 0,1} = 0,15 \qquad U_{11} = \frac{3,38}{107,2 \cdot 0,09} = 0,16$$

$$U_6 = \frac{2,6}{169,6 \cdot 0,11} = 0,14 \qquad U_{12} = \frac{3,35}{92,9 \cdot 0,07} = 0,51$$

$$U_{13} = 0$$

Потужність привода (кВт):

$$N_i = \frac{2\pi \cdot n_i \cdot M_i \cdot 10^3}{60} \quad (2.30)$$

$$N_1 = \frac{2\pi \cdot 15 \cdot 1,03 \cdot 10^3}{60} = 1614 \qquad N_5 = \frac{2\pi \cdot 30 \cdot 0,45 \cdot 10^3}{60} = 1426$$

$$N_2 = \frac{2\pi \cdot 20 \cdot 0,42 \cdot 10^3}{60} = 879,3 \qquad N_6 = \frac{2\pi \cdot 30 \cdot 0,49 \cdot 10^3}{60} = 1526$$

$$N_3 = \frac{2\pi \cdot 30 \cdot 0,43 \cdot 10^3}{60} = 1344 \qquad N_7 = \frac{2\pi \cdot 30 \cdot 0,53 \cdot 10^3}{60} = 1679$$

$$N_4 = \frac{2\pi \cdot 30 \cdot 0,44 \cdot 10^3}{60} = 1383 \qquad N_8 = \frac{2\pi \cdot 40 \cdot 0,52 \cdot 10^3}{60} = 2192$$

$$N_9 = \frac{2\pi \cdot 40 \cdot 0{,}69 \cdot 10^3}{60} = 2893 \qquad N_{11} = \frac{2\pi \cdot 40 \cdot 0{,}27 \cdot 10^3}{60} = 1122$$

$$N_{10} = \frac{2\pi \cdot 40 \cdot 0{,}5 \cdot 10^3}{60} = 2095 \qquad N_{12} = \frac{2\pi \cdot 40 \cdot 0{,}2 \cdot 10^3}{60} = 836{,}4$$

$$N_{13} = 0$$

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку потужності привода та його елементів

№	Параметри										
	n, об/хв	$p_{ср}$, МПа	P, МН	$M_{пр}$, МНм	γ, рад	S	$V_в$, $\frac{м}{с}$	V, $\frac{м}{с}$	ε	U, c^{-1}	N, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	15	23,6	8,18	1,03	0.12	0.103	1.2	1.3	0.15	0.04	1614
2	20	21,6	4,95	0,42	0.06	0.056	1.6	1.69	0.08	0.13	879,3
3	30	22,3	5,05	0,43	0.06	0.061	2.4	2.55	0.08	0.18	1344
4	30	23,2	5,20	0,44	0.06	0.066	2.4	2.56	0.09	0.16	1383
5	30	24,1	5,35	0,45	0.06	0.07	2.4	2.58	0.1	0.15	1426
6	30	26,1	5,73	0,49	0.06	0.082	2.4	2.6	0.11	0.14	1526
7	30	29,0	6,30	0,53	0.06	0.093	2.4	2.62	0.13	0.12	1679
8	40	31,9	6,51	0,52	0.058	0.103	3.1	3.42	0.12	0.18	2192
9	40	38,3	8,15	0,69	0.06	0.126	3.1	3.49	0.17	0.12	2893
10	40	40,1	7,05	0,50	0.047	0.113	3.1	3.45	0.14	0.18	2095
11	40	38,2	5,00	0,27	0.035	0.092	3.1	3.38	0.09	0.18	1122
12	40	38,4	4,30	0,20	0.029	0.081	3.1	3.35	0.07	0.16	836,4
13	40	22,9	0,00	0,00	0	0	3.1	3.1	0	0.51	0

2.4 Перевірка деталей привода стану слябінгу-1150

Розрахунок деталей привода стану виконується для перевірки їхньої здатності працювати в умовах максимального навантаження, що виникає під час прокатки. Визначаються основні параметри, необхідні для забезпечення міцності, жорсткості та надійності передавання крутного моменту від електродвигуна до робочих валків. Розрахунки виконано на основі навантажень, отриманих у попередньому підрозділі.

Розрахунок деталей привода виконується лише для горизонтальних валків, оскільки саме вони передають основне зусилля деформації та мають найбільше навантаження у процесі прокатки.

Згідно з ТІ 226-П.О3-ГЛ-01-2023 [21], привід горизонтальних валків стану слябінг-1150 здійснюється безпосередньо від електродвигуна типу МПС-9000 через шпиндель, без шестеренної кліті (u=1). Номінальна потужність ($N_{ном}$) одного двигуна становить 7200 кВт, а номінальна частота обертання валка (n) — 53 об/хв. Номінальний обертальний момент :

$$M_{ном} = \frac{9550 \cdot N}{n} \tag{2.31}$$

$$M_{ном} = \frac{9550 \cdot N}{n} = 1.3 \text{ МНм}.$$

Розрахункові значення задовольняють умови:

$$M_{пр_{max}} = 1{,}03 \text{МНм} \leq M_{ном} = 1{,}3 \text{ МНм};$$

$$N_{max} = 1614 \text{ кВт} \leq N_{ном} = 7200 \text{ кВт}$$

Отже, електропривод забезпечує потрібний запас потужності та моменту, стабільну роботу кліті в усьому режимі обтиснення і відповідає виробничим вимогам.

Перевірка валків на міцність при згині

$$[P] = \frac{0.4 * D^3 * [\sigma_{зг}]}{L_б + l_ш - 0.5 * B'} \tag{2.32}$$

де: D — діаметр бочки валка, приймаємо як 1150 мм;

$[\sigma_{зг}]$ — допустиме напруження згину для сталі 60ХН, приймаємо як 140 МПа;

$L_б$ — довжина робочої зони валка, приймаємо як 1900 мм;

$l_ш$=(1…1,5)D — довжина шийки валка, приймаємо як 1500 мм;

В — ширина сляба, приймаємо як 1400 мм.

$$[P] = \frac{0.4 \cdot 1{,}15^3 \cdot 140}{1{,}9 + 1{,}5 - 0.5 \cdot 1{,}4} = 31{,}6 \text{ МН}$$

$$P = 8{,}18 \text{ МН} \leq [P] = 31{,}6 \text{ МН}.$$

Перевірка міцності валків по шийкам:

$$P_ш = \frac{0.4 \cdot d_ш^3 \cdot \sigma}{\sqrt{l_ш + R \cdot \Delta h}}, \quad (2.33)$$

де: $d_ш$=(0,6…0,75)$D_в$ – діаметр шийки валка, приймаємо як 690мм.

$$P_ш = \frac{0.4 \cdot 0{,}69^3 \cdot 140}{\sqrt{1.1 + 0.575 \cdot 0.11}} = 17.1 \text{ МН}$$

$$P = 8{,}18 \text{ МН} \leq P_ш = 17{,}1 \text{ МН}$$

Перевірка вала на міцність при крученням

$$\tau = \frac{16 \cdot M_{пр}}{\pi \cdot D_ш^3}, \quad (2.34)$$

де: $D_ш$ - діаметр шийки валка, =690 мм;

[τ] — допустиме напруження на кручення (для сталі 60ХН ≈ 50–90 МПа).

$$\tau = \frac{16 \cdot 1{,}03}{\pi \cdot 0{,}69^3} = 15{,}97 \text{ МПа}$$

$$\tau = 15{,}97 \text{ МПа} \leq [\tau] = 50 \text{ МПа}.$$

Усі деталі привода стану слябінг-1150, включно з валками, шийками, муфтою та посадками, успішно пройшли розрахункову перевірку на міцність. Зусилля прокатки не перевищують гранично допустимих значень для згину,

кручення, а конструкція муфтового з'єднання забезпечує надійне передавання крутного моменту без шпонок.

Це свідчить про високу надійність і працездатність конструкції привода при роботі в умовах великого зусилля деформації та змінних навантажень.

3. Експлуатаційна частина

3.1 Опис системи технології обслуговування і ремонту Слябінг-1150

Система технічного обслуговування і ремонту привода прокатного стану Слябінг-1150 на ПАТ «Запоріжсталь» є важливою складовою забезпечення його надійної експлуатації, технологічної стабільності та відповідності продуктивності вимогам виробничого плану. Зважаючи на складність конструкції, циклічність навантажень і режим реверсування, обслуговування механізмів, що забезпечують роботу кліті, здійснюється за принципами планово-попереджувальної системи (ППР) відповідно до нормативів, затверджених внутрішніми регламентами підприємства [21], [22].

Система ТОіР передбачає п'ятирівневу структуру обслуговування привода, що охоплює як профілактичні огляди, так і капітальні ремонти з демонтажем, заміною або модернізацією вузлів. Щозмінний нагляд виконується операторами на посту керування, а складні ремонтні втручання — ремонтними бригадами, інженерами та діагностичними групами. Під час кожного циклу обслуговування застосовуються технологічні карти, акти дефектації, графіки виконання робіт та інструкції з техніки безпеки [21], [26].

До етапів ТОіР входять: щозмінне операторське обслуговування (перевірка мастила, вібрацій і температури), щотижнева перевірка затяжок і ізоляції, місячне технічне обслуговування (змащування, віброконтроль, очищення), сезонна ревізія (редуктори, заземлення, системи охолодження), річні та капітальні втручання з демонтажем і випробуванням обладнання [21], [22].

Таблиця 3.1 – Характеристика видів технічного обслуговування привода Слябінг-1150

Вид	Періоди	Основні операції	Орієнтовна тривалість	К-ть працівників
1	2	3	4	5
Щозмінне	2-3 рази на добу	Візуальний огляд, перевірка рівня масла, контроль шуму, температури, вібрації	30 хв-1 год	1 оператор
Щотижневе	Раз на тиждень	Перевірка ущільнень, муфт, електрокабелів, затягування з'єднань	2-4 год	2-3 особи
Місячне	Раз на місяць	Змащування, очищення вентиляцій, перевірка люфтів, вимірювання вібрації	6-8 год	3-4 особи
Сезоне (квартальне)	Раз на 3 місяці	Ревізія редукторів, перевірка систем охолодження, заземлення, захисту	16-24 год	4-6 особи
Середній ремонт	Раз на рік	Частковий демонтаж, перевірка основних вузлів, заміна окремих елементів	До 72 год	10-12 особи
Капітальний ремонт	Раз на 2 роки	Повний демонтаж, дефектація, балансування, стендові випробування	До 108 год	До 20 особи

Представлені дані відображають типову структуру експлуатаційної практики, базовану на внутрішніх регламентах підприємства. Тривалість та склад бригад формуються залежно від складності робіт, фактичного стану агрегату й поточного виробничого графіка. Щозмінне обслуговування здійснюється оператором безпосередньо на робочому місці, тоді як середній та капітальний ремонт виконуються з залученням фахівців кількох профілів, включаючи механіків, електромонтерів та вібродіагностів. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективний технічний супровід функціонування привода в умовах інтенсивної експлуатації.

Тривалість ремонтів регламентується нормативами, узгодженими з міжремонтним ресурсом вузлів: поточні ремонти виконуються щоквартalу, тривалістю до 24 годин; середні — щороку, до 72 годин; капітальні — раз на 2 роки, тривалістю до 108 годин. Згідно з документами ремонтно-механічної служби, капремонт супроводжується повним розбиранням, дефектацією, балансуванням обертових деталей, заміною зношених компонентів і модернізацією при потребі [22], [26].

Система ТОіР реалізується як у цеховому форматі, так і із залученням централізованих ремонтних служб комбінату. Приблизно 25% усього персоналу ПАТ «Запоріжсталь» задіяні в технічному обслуговуванні та ремонтах обладнання [26]. Згідно з оцінками головного механіка комбінату, частка централізованих ремонтів у структурі загальних ремонтних робіт становить близько 35%, що свідчить про достатній рівень внутрішньозаводської координації процесів [26].

Для виявлення стану вузлів привода, зокрема шпинделів, підшипників і редукторів, використовується багатофакторна діагностика, яка включає вібраційний аналіз, термографію та аналіз мастил. Застосовуються портативні та стаціонарні системи, результати вимірів фіксуються в електронній системі моніторингу, що синхронізується з диспетчерським центром. Це дозволяє оперативно формувати попередження при досягненні критичних параметрів і приймати рішення щодо термінових втручань [22], [26].

Під час обслуговування систем змащення особливу увагу приділяють стабільності температурного режиму та якості мастильних матеріалів. Впроваджено лабораторний контроль за в'язкістю, вмістом води й металевих домішок. З урахуванням аналізу ефективності змащування, розглядається доцільність часткової заміни мастил типу DIN KP2K–30 на синтетичні аналоги з поліпшеними антифрикційними властивостями для високотемпературних зон.

У зв'язку зі змінами у структурі виробництва й впровадженням енергоефективних технологій, що декларуються як стратегічний напрямок Групи «Метінвест» [25], модернізація приводних систем передбачає поступове впровадження частотно-регульованих електроприводів. Такі оновлення зумовлюють необхідність змін у системі діагностики, зокрема розширення спектру аналізу струмів навантаження та контролю параметрів пускових режимів.

З метою удосконалення технічного супроводу обладнання, в останні роки запроваджено елементи предиктивного сервісу. Завдяки збереженню історичних даних про температуру, вібрації, навантаження та втручання, інженерно-технічний персонал має змогу прогнозувати терміни виходу з ладу вузлів та оптимізувати планування закупівель і логістику запасних частин [22]. Це дозволяє зменшити незаплановані простої та підвищити точність формування річного графіка ТОіР.

Окремий напрямок у структурі ТОіР займає навчання та кваліфікаційна підготовка персоналу. На підприємстві функціонує навчальний центр, де працівники проходять щорічне підвищення кваліфікації за напрямами дефектації, діагностики, використання новітніх матеріалів і організації ремонтних робіт [21].

Капітальні ремонти організовуються з урахуванням структури ремонтного циклу, яка включає 24 поточних втручання, 24 середніх та один капітальний ремонт протягом дворічного періоду. Усі заходи документуються в електронному журналі, який є частиною системи управління

обслуговуванням. За допомогою журналу здійснюється аналіз дефектів, розрахунок ефективності ремонтних дій, формування кошторисів на модернізацію [22], [26].

Формування ремонтних бригад здійснюється за нормативами трудомісткості та фонду робочого часу. Згідно з розрахунками, середня чисельність ремонтного персоналу на обслуговування слябінгу становить 89 осіб, включаючи 32 чергових і 57 штатних ремонтників. Такий склад дозволяє покривати усі обсяги робіт з урахуванням міжремонтного обслуговування, аварійних втручань і планових ремонтів [26].

Загальна річна трудомісткість технічного обслуговування Слябінг-1150 оцінюється в понад 166 тисяч людино-годин. Це включає усі види обслуговування — від змащування і перевірок до балансування і модернізацій. Структура робіт адаптована під змінний графік, передбачає погодинну і преміальну оплату, з урахуванням виконання нормативів [26].

Система організації ремонтного господарства на ПАТ «Запоріжсталь» поєднує цеховий та централізований підходи. Більшість операцій проводиться силами ремонтно-механічної служби головного механіка, проте при модернізації або складних капремонтах залучаються спеціалізовані підрядні організації. Завдяки такій гнучкості забезпечується баланс між оперативністю втручань і якістю реалізації робіт [26].

3.2 Складання річного графіка технічного обслуговування та капітального ремонту слябінга-1150

Забезпечення надійної та безперебійної роботи привода прокатного стану слябінг-1150 неможливе без чіткої організації системи технічного обслуговування і ремонту (ТОіР). Ця система повинна охоплювати всі технічні заходи, спрямовані на підтримання працездатності обладнання, виявлення і усунення несправностей, профілактику аварій і простоїв. Основним

організаційним документом, який регламентує виконання цих заходів протягом календарного року, є річний графік обслуговування та ремонту.

Розробка річного графіка ТОіР проводиться згідно з вимогами «Временного положения о ТОиР» [20], а також на основі внутрішніх нормативних документів ПАТ «Запоріжсталь», зокрема технологічної інструкції з експлуатації і ремонту привода слябінга-1150 [21], [22]. Графік будується з урахуванням реального технічного стану обладнання, його режиму роботи, напрацювання міжремонтного ресурсу, статистики відмов, а також виробничого навантаження цеху.

Загальні принципи складання річного графіка ТОіР

Основною метою складання графіка є планування в часі необхідних заходів з обслуговування і ремонту привода з урахуванням мінімізації впливу на виробничий процес. Графік повинен включати:

- строк виконання обслуговування (з точністю до зміни);
- види робіт (огляд, технічне обслуговування, поточний ремонт, капітальний ремонт);
- відповідальних виконавців;
- необхідні ресурси (матеріали, запасні частини, інструменти);
- тривалість робіт;
- перерви на модернізацію або аварійні втручання (за необхідності).

ТОіР привода поділяється на п'ять рівнів:

Оглядове (щозмінне) обслуговування — здійснюється черговим персоналом цеху. До завдань належать перевірка рівня мастила, виявлення витоків, контроль шуму, вібрацій, температурних показників, візуальний контроль вузлів.

Періодичне (тижневе і місячне) — виконується штатною ремонтною службою. Включає очистку вузлів, перевірку затяжок, мастила, заміну фільтрів, діагностику ізоляції тощо.

Сезонне (квартальне) — включає глибшу перевірку вузлів і підсистем, випробування елементів електропривода, очищення і перевірку систем охолодження та змащення.

Поточний ремонт — з періодичністю 1 раз на три місяці (до 24 годин). Передбачає заміну зношених деталей, перевірку редукторів, підшипників, шпинделів, налаштування приводів.

Капітальний ремонт — виконується один раз на 2 роки (тривалість — 108 годин), включає повне розбирання привода, дефектування, заміну зношених елементів, калібрування вузлів, балансування обертових елементів [22].

Залежно від циклічності навантаження, режимів роботи (кількість змін, обсяг продукції), визначається обсяг і періодичність втручань. Наприклад, у випадку інтенсивної експлуатації у три зміни графік ТОіР включатиме щотижневі технічні огляди з обов'язковим зняттям вібраційних характеристик, перевіркою температурних датчиків на підшипниках та контролем мастильних систем.

При побудові графіка використовується умовне позначення:

ТО-1 — щозмінне;

ТО-2 — тижневе;

ТО-3 — місячне;

ТР — поточний ремонт;

КР — капітальний ремонт.

Нижче подано приклад (умовний) структури річного графіка технічного обслуговування та ремонту привода слябінга-1150:

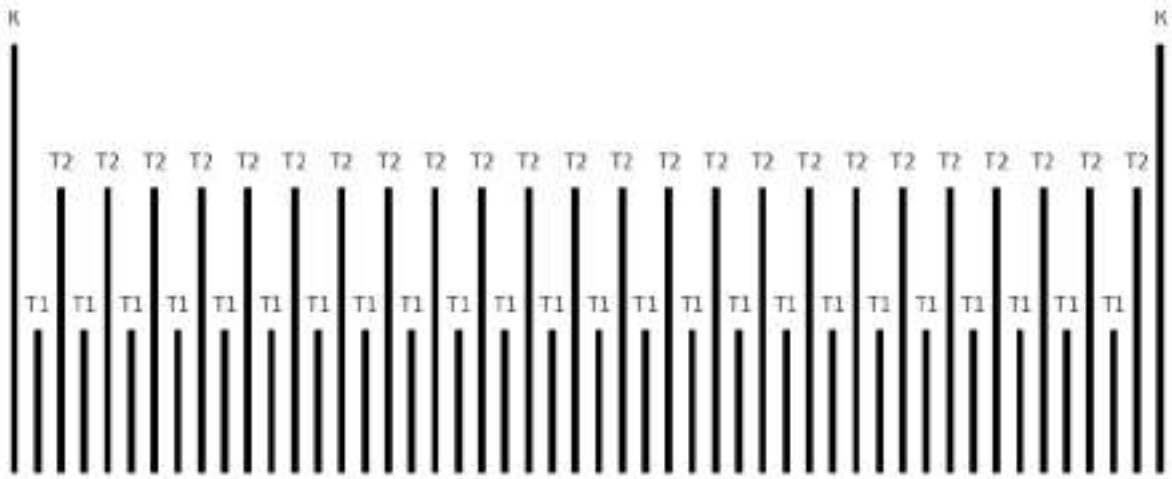


Рисунок 3.1 – Структура ремонтного циклу стана слябінг-1150

1. Період виконання капітального ремонту 2 роки.

2. Тривалість капітального ремонту 108 годин.

3. Період поточного ремонту T_1 - 24/12.

4. Період поточного ремонту T_2 - 24/24.

Структура ремонтного циклу - 24 Т+24 То+К

Цей графік слугує основою для формування щотижневих, щомісячних та квартальних планів робіт. При цьому важливу роль відіграє система моніторингу технічного стану (віброконтроль, температурні та струмові сенсори), яка може коригувати частину обсягів ТО в залежності від реальних показників зносу [21], [23].

Складання та погодження річного графіка виконується за участі відділу головного механіка, служби технічного контролю, а також представників виробництва та енергетиків. Документ проходить затвердження на рівні цеху і погоджується з плановим департаментом.

Усі роботи ведуться на основі уніфікованих технічних карт, що забезпечує контроль якості і точність дій виконавців. Виконання заходів за графіком дозволяє уникнути аварійних зупинок, знизити позапланові витрати та забезпечити стійку роботу слябінга-1150 у складних умовах металургійного виробництва [22].

Успішна реалізація річного графіка ТОіР неможлива без належного ресурсного забезпечення. До основних ресурсів, які мають бути заплановані та доступні для виконання робіт, належать:

– запасні частини та комплектуючі, включаючи підшипники, манжети, сальники, муфти, елементи приводів та систем охолодження;

– мастильні матеріали, які мають відповідати нормам по термічній стабільності, в'язкості, стійкості до окислення;

– спеціалізоване обладнання і інструмент, серед якого домінують пристрої для діагностики, індикаторні прилади, системи балансування, гідравлічні домкрати;

– засоби індивідуального захисту для персоналу, які забезпечують безпеку при роботах у небезпечних умовах (висока температура, електрика, масляне середовище).

Роботи, які передбачено виконувати відповідно до графіка, повинні супроводжуватися оформленням технічної документації. Після завершення кожного етапу обслуговування чи ремонту відповідальні особи (майстри, інженери) фіксують результати у спеціальних формах журналів, а також в електронній базі SAP або іншій обліковій системі підприємства. Це дозволяє відстежувати історію обслуговування, аналізувати тенденції відмов, а також формувати аналітичні звіти для керівництва.

Контроль за дотриманням графіка ТОіР здійснюється керівником ремонтної служби цеху та представниками технічного контролю. Для цього проводяться регулярні внутрішні аудити, перевірки якості виконання робіт, відповідності інструменту, стану обладнання після втручання. За недотримання термінів або за порушення технології обслуговування передбачено дисциплінарну відповідальність.

Особливу увагу приділяють узгодженню графіка ТОіР із виробничим планом цеху. З урахуванням того, що обтискний стан є вузловим агрегатом, його виведення з експлуатації навіть на короткий термін потребує ретельного планування. Саме тому виконання капітальних і середніх ремонтів зазвичай

заплановане на періоди зниженого виробничого навантаження (наприклад, у святкові або планові зупинки підприємства).

Загалом річний графік ТОіР є стратегічним інструментом управління технічним станом привода слябінг-1150, що дозволяє забезпечити стабільну роботу агрегату, скоротити витрати на аварійне обслуговування та підтримати високу якість кінцевої продукції підприємства [21], [22].

Капітальний ремонт є ключовим елементом системи технічного обслуговування та ремонту обладнання в металургійному виробництві. Для обтискного стану типу Слябінг-1150, який задіяний у формуванні слябів зі злитків великої маси, своєчасне і якісне виконання капітального ремонту дозволяє гарантувати тривалу й безпечну експлуатацію обладнання, уникнути аварійних зупинок та подовжити строк служби основних механізмів.

Суть капітального ремонту полягає у повному або частковому розбиранні обладнання, дефектації його елементів, очищенні внутрішніх поверхонь, заміні зношених частин, проведенні регламентних робіт, а також налагодженні і випробуванні функціональних систем після збирання. Ремонт охоплює електромеханічну частину привода, гідросистему, шпинделі, підшипникові вузли, охолоджувальну систему, станину, вали, елементи передавальних механізмів, а також контрольно-вимірювальну апаратуру.

На ПАТ «Запоріжсталь» виконання капітального ремонту Слябінга-1150 регламентується внутрішніми стандартами і здійснюється один раз на два роки. Тривалість ремонтних робіт становить 108 годин. Протягом цього часу повинні бути виконані всі заплановані операції відповідно до узгодженого графіка, який формується механічною службою цеху разом із відділами головного механіка, енергетика, автоматизації та технологічного контролю [21], [22].

Перед безпосереднім складанням графіка проводиться оцінка технічного стану агрегату на основі поточних діагностичних даних. Аналізується вібраційний стан вузлів, перевіряється тиск у гідросистемі, замірюються струмові навантаження на електродвигуни, проводиться

температурний аналіз окремих ділянок. Результати обстеження дозволяють визначити обсяг ремонтних робіт: які вузли слід знімати для дефектації, які потребують обов'язкової заміни, де можна обмежитися регулюванням або очищенням. З урахуванням цих даних формується технічне завдання на ремонт, що включає перелік вузлів, очікуваний обсяг робіт, потребу в запасних частинах, матеріалах, інструменті та робочій силі.

Окрім безпосередньо технічних показників, у підготовці до капітального ремонту також враховується історія експлуатації стану за попередній міжремонтний період. Особлива увага приділяється кількості позапланових зупинок, зафіксованим дефектам, зміні параметрів навантаження під час роботи. Це дає змогу враховувати не лише фактичний знос елементів, а й імовірність повторення раніше виявлених несправностей. Такий підхід допомагає приймати більш зважені рішення щодо потреби в оновленні окремих вузлів або модифікації регламенту обслуговування. До процесу аналізу залучається не лише ремонтний персонал, а й оператори стану, які можуть надати цінну інформацію щодо поведінки обладнання в режимі реального виробництва.

Після узгодження ремонтного обсягу та визначення критичних операцій, формується власне календарно-операційний графік капітального ремонту. Цей документ деталізує послідовність технологічних дій, розподіляє обсяг робіт між спеціалістами, визначає час початку та закінчення кожного етапу. Такий графік дозволяє уникнути накладання взаємозалежних операцій, забезпечити своєчасне постачання необхідного обладнання, запобігти простоям через логістичні збої.

Планування капремонту враховує тривалість і трудомісткість робіт. Наприклад, розбирання головного редуктора, що включає демонтаж кришок, виймання валів і перевірку стану зубчастих передач, може займати до 12 годин, тоді як балансування обертових елементів електропривода триває близько 8 годин. Заміна мастил, очищення системи охолодження,

калібрування гідравлічних циліндрів займає менше часу, але є критичною з точки зору безпеки експлуатації агрегату.

У ПАТ «Запоріжсталь» для проведення капітального ремонту Слябінга-1150 формується ремонтна бригада чисельністю до 20 осіб, яка включає електромеханіків, слюсарів-ремонтників, фахівців із КВПіА, інженерів технічного контролю та представників служби головного енергетика [22]. Робота виконується у дві зміни, що дозволяє оптимізувати тривалість втручання та забезпечити цілодобовий темп робіт без зниження якості.

Особливу увагу під час ремонту приділяють шпиндельним з'єднанням. Ці вузли працюють у важких умовах значного крутного моменту, високих температур і вібрацій. Їх стан визначає загальну надійність роботи головного приводу. Під час капремонту виконується демонтаж шпинделів, перевірка посадкових місць, оцінка зносу зубців, заміна ущільнень та змащування. Зношені елементи передаються в центральну ремонтну майстерню для відновлення або утилізації.

Не менш відповідальним є контроль стану головного редуктора. Його корпус очищується, внутрішні деталі знімаються, проводиться магнітопорошковий контроль тріщин, шліфування та регулювання зазорів. Після складання виконується перевірка плавності ходу, шумового фону та герметичності мастильної системи. Супровідні документи заповнюються під контролем інженера служби діагностики.

Усі операції капітального ремонту вписуються в уніфіковану таблицю, що регламентує етапи робіт, тривалість кожної операції, назву відповідальної служби, кількість виконавців та заплановану зміну.

Таблиця 3.2 — Перелік і тривалість основних монтажно-демонтажних робіт у межах капітального ремонту вузла привода Слябінга-1150

№	Перелік ремонтних робіт	К-ть годин, год.	К-ть робітників, осіб	Трудоємкість, люд.-год
1	2	3	4	5
1	Демонтаж головки привода	8	6	48
2	Демонтаж кришки редуктора привода;	6	6	36
3	Заміна вихідного вала редуктора привода	8	6	48
4	Монтаж колони під установку балки з будівельною частиною	10	6	60
5	Демонтаж захисних укриттів, настилу робочої зони	6	6	36
6	Монтаж технологічного стола з будівельною частиною	12	6	72
7	Монтаж кришки редуктора привода з будівельними роботами	8	6	48
8	Монтаж корпусу привода з відновленням конструктивного з'єднання	8	6	48
9	Встановлення привода з балансуванням та фіксацією	6	6	36
10				
	Всього	72	54	432

Цей графік є базовим інструментом координації роботи всіх ремонтних служб. Його щозмінно перевіряє інженер-технолог, який фіксує фактичні відхилення, затримки, непередбачені ситуації. При виявленні ускладнень — наприклад, відсутність потрібної запчастини чи складність з демонтажем — в

оперативному порядку вносяться корективи в порядок виконання наступних операцій.

На завершальному етапі капітального ремонту виконуються пусконалагоджувальні випробування. До валків подається обертальний момент, перевіряються тиск у гідросистемі, вібрації в шпинделях, рівень шуму, а також контрольна прокатка без навантаження. Після цього технічна служба оформлює акт здачі-приймання обладнання, який затверджується керівником ремонтного підрозділу та головним механіком цеху.

Таким чином, чітке планування капітального ремонту слябінга-1150 з урахуванням технологічних норм, діагностичних даних та виробничого графіка забезпечує безпечну та ефективну експлуатацію агрегату впродовж наступного міжремонтного циклу. Розробка подібного графіка — це не лише питання організації праці, а й ключовий фактор підвищення надійності та довговічності устаткування прокатного виробництва.

3.3 Пропозиції щодо удосконалення обладнання та системи ремонту привода обтискного прокатного стану

3.3.1 Вдосконалення конструкції шпинделів привода

Шпиндель є однією з найбільш навантажених та критичних деталей у приводі обтискного прокатного стану. У процесі експлуатації шпинделі Слябінга-1150 піддаються змінним крутильним моментам, повторюваним ударам та реверсивним навантаженням, що призводить до втомного руйнування матеріалу та зниження експлуатаційної надійності вузла. Згідно з аналізом ремонтної документації ПАТ «Запоріжсталь», до 28% усіх позапланових втручань у привід кліті пов'язані зі шпиндельним пристроєм.

Основними несправностями шпинделів є знос шліцьових з'єднань, утворення тріщин у зонах концентрації напружень, розбиття посадочних

місць, втрата співвісності внаслідок деформації вала, а також розриви, викликані втомними напруженнями в зонах перепаду діаметра.

Стандартні шпинделі, що застосовуються на Слябінгу-1150, виготовляються зі сталі 38ХН3МФА з діаметром до 450 мм та довжиною до 2500 мм. При цьому термін служби шпинделя не перевищує 24 місяців у середньому, що обумовлює необхідність регулярної заміни або відновлення елементів привода. Витрати на ремонт одного комплекту шпинделів становлять орієнтовно 180–220 тис. грн, включаючи виготовлення, балансування, термообробку та монтаж.

З метою підвищення ресурсу та зниження експлуатаційних витрат пропонується впровадження модернізованої конструкції шпинделів із наступними особливостями:

- використання сталі 40ХН2МА або аналогічної легованої сталі з підвищеною гартівністю;

- локальна термообробка контактних зон за допомогою індукційного або лазерного гартування (до твердості HRC 55–58);

- зміна геометрії перехідних ділянок із мінімізацією концентрацій напружень (радіус R = 12–15 мм замість 5–6 мм);

- шліцьові з'єднання нового профілю з покращеною точністю та додатковим азотуванням;

- запровадження контролю твердості та мікроструктури по довжині тіла шпинделя на етапі виготовлення.

Таблиця 3.2 – Порівняння технічних параметрів стандартного та модернізованого шпинделя

Параметр	Стандартний шпиндель (38ХН3МФА)	Модернізований шпиндель (40ХН2МА)
1	2	3
Діаметр (мм)	450	450
Довжина (мм)	2500	2500

1	2	3
Гартовані зони	Відсутні	Є, до HRC 58
Тип шліців	Прямі	Модифіковані, з азотуванням
Радіус переходу, мм	5–6	12–15
Середній ресурс, міс.	18–24	30–36
Частота ремонтів (на рік)	1,5	0,8
Орієнтовні втрати на ремонт, грн/рік	340 000	180 000

Підрахунок економічного ефекту базується на скороченні кількості ремонтів протягом 2 років експлуатації. При зменшенні кількості замін із 3 до 2 на один комплект шпинделів і середній вартості 200 тис. грн на заміну досягається економія 200 тис. грн кожні два роки на одну пару. Якщо на стані встановлено чотири шпинделі, річна економія становить:

$$E_{\text{ек}} = \left(N_{\text{ст}} - N_{\text{мод}}\right) C \frac{n}{t} = (3 - 2) \cdot 200000 \cdot \frac{2}{2} = 200000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}.$$

Окрім прямої економії, важливо враховувати й скорочення часу простою обладнання. Один ремонт шпинделя триває в середньому 6 годин, що знижує ефективність роботи всієї кліті. За зменшення одного ремонту на рік отримуємо 6 годин додаткової роботи, або орієнтовно 60 тонн умовно недовиробленої продукції (за середньою продуктивністю 10 т/год). При середній вартості продукції 25 000 грн/т потенційний приріст обсягу реалізації становить:

$$\Delta R = 60 \cdot 25\,000 = 1\,500\,000 \text{ грн.}$$

Сумарна ефективність від впровадження модернізованих шпинделів, враховуючи економію на ремонті та додаткову продукцію, перевищує 1,7 млн грн на рік.

Додатково модернізація дозволяє зменшити вібраційні навантаження на інші елементи привода, знижуючи ризик вторинного зносу муфт, підшипників і корпусів. Також зменшується імовірність аварійної зупинки привода під час проходження сляба через кліть — одного з найнебезпечніших моментів у роботі агрегату.

Таким чином, запропоноване вдосконалення конструкції шпинделів є технічно обґрунтованим, економічно доцільним і спрямованим на підвищення загальної надійності привода обтискного прокатного стану. Результати можуть бути адаптовані для інших станів подібного типу в межах виробничої програми ПАТ «Запоріжсталь».

3.3.2 Оптимізація мастильної системи привода

Мастильна система є ключовим елементом забезпечення довговічної та безвідмовної роботи підшипників, редукторів і з'єднань привода прокатного стану. Недостатня ефективність мастила або його передчасне старіння призводять до локального перегріву, прискореного зношування поверхонь тертя та аварійних зупинок агрегату. Згідно з внутрішнім аудитом ПАТ «Запоріжсталь», понад 20% випадків виходу з ладу вузлів привода Слябінга-1150 пов'язані з проблемами у системі змащування [22].

На Слябінгу-1150 використовується централізована циркуляційна система змащення з примусовою подачею мастила. Її основними елементами є мастильна станція з баком об'ємом 0,5 м³, електропривідний насос, фільтри тонкого очищення, теплообмінник, а також система трубопроводів, що забезпечує безперервне змащення підшипників і редукторів. Робочий тиск у системі досягає 0,4 МПа, а витрата мастила становить до 12 л/хв на кожен вузол. Контроль температури та тиску здійснюється за допомогою датчиків з виведенням сигналів на пульт керування. Мастильний матеріал циркулює по замкненому контуру: після проходження через вузли тертя мастило

повертається у бак. У штатному режимі експлуатації застосовується мінеральне мастило типу І-40А.

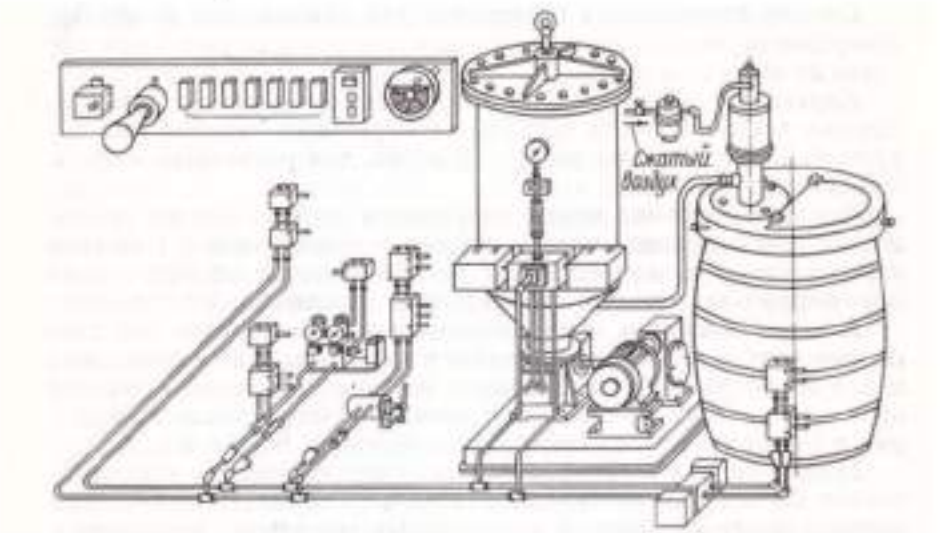


Рисунок 3.2 - схема дволінійної автоматичної системи густого мастила кінцевого типу

Хоча І-40А відповідає мінімальним експлуатаційним вимогам, воно не забезпечує стабільних характеристик при значному коливанні температур — особливо в літній та зимовий періоди. У ряді випадків було зафіксовано падіння в'язкості мастила нижче допустимого рівня, що спричинило збільшення тертя та перегрів підшипників.

Як альтернативу І-40А рекомендовано застосовувати синтетичне мастило класу ISO VG 220–320, наприклад, Shell Omala S4 GX або Mobil SHC 630, яке демонструє стабільні властивості в діапазоні температур від –25 до +120 °C. Такі мастила мають покращені антифрикційні властивості, утворюють стійку мастильну плівку та в 2–3 рази довше зберігають експлуатаційні властивості в умовах змінного навантаження. У таблиці 3.3 наведено порівняння основних характеристик.

Таблиця 3.3 – Порівняння характеристик мінерального та синтетичного мастил

Параметр	І-40А (мінеральне)	Shell Omala S4 GX (синтетичне)
1	2	3
Діапазон робочих температур (°С)	–10 … +80	–25 … +120
Кінематична в'язкість при 40 °С (мм²/с)	~150	~220
Індекс в'язкості	~90	160–170
Міжзмінна заміна	4–6 місяців	до 12 місяців
Частота доливання	щотижнево	щомісячно
Стійкість до окиснення	Середня	Висока

З урахуванням вартості мастила (~180 грн/л для І-40А та ~430 грн/л для синтетичного) перехід на синтетичне мастило потребує початкових інвестицій. Однак за рахунок зменшення витрати мастила та збільшення міжзмінного інтервалу окупність очікується протягом 8–10 місяців експлуатації. Крім того, скорочення кількості аварій та ремонтів дозволяє досягти додаткового економічного ефекту.

Розрахунок економії базується на таких вихідних даних:

- об'єм циркулюючого мастила — 400 л;
- частота заміни І-40А — кожні 4 місяці;
- частота заміни синтетичного мастила — 12 місяців;
- вартість робіт із заміни мастила — 5000 грн/заміна;
- кількість замін І-40А на рік — 3;
- кількість замін синтетичного — 1.

Загальні витрати на мастило та заміну:

- І-40А: $(3 \cdot 400 \cdot 180) + (3 \cdot 5000) = 216\,000 + 15\,000 = 231\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$

- Синтетичне:$(1 \cdot 400 \cdot 430) + (1 \cdot 5000) = 172\,000 + 5\,000 = 177\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$

Орієнтовна економія становить 54 000 грн на рік лише за рахунок заміни мастильного матеріалу. Додатково варто враховувати уникнення щонайменше одного аварійного простою привода на рік (оцінка: 6 годин, 10 т/год, 25 000 грн/т) — ще 1 500 000 грн недовиробленої продукції.

У технічному плані доцільно також дооснастити систему мастила температурними датчиками з автоматичним сигналом перевищення критичних значень та впровадити цифровий реєстратор тиску й витрати в контурі змащення. Сигнали з таких пристроїв можуть подаватися на SCADA-систему цеху, що забезпечить швидке реагування персоналу.

У системі технічного обслуговування необхідно скоригувати графік перевірки стану мастила з урахуванням нового ресурсу, а також розширити програму лабораторного аналізу: додати спектральний аналіз забруднень та вимірювання вмісту води. Це дозволить своєчасно виявляти погіршення характеристик мастильного середовища ще до прояву дефектів у вузлах тертя.

Крім того, рекомендовано ввести локальні маслостанції зі змінними фільтрами, що дадуть змогу оперативно очищати мастило в контурі без зупинки стану. Досвід впровадження таких систем на аналогічному обладнанні комбінату свідчить про зниження вмісту домішок у мастилі до 30%, що безпосередньо впливає на зносостійкість вузлів [26].

У результаті запровадження комплексу заходів — переходу на синтетичне мастило, встановлення сенсорики, впровадження маслостанцій і цифрового моніторингу — забезпечується зниження ймовірності відмов мастильної системи, збільшення міжремонтного інтервалу, підвищення ресурсу підшипників і редукторів, а також суттєве зменшення загальних витрат на експлуатацію привода обтискного прокатного стану.

3.3.3 Впровадження предиктивної діагностики та сенсорного моніторингу

Сучасні підходи до технічного обслуговування промислового обладнання передбачають поступовий відхід від жорстко регламентованих графіків у бік обслуговування на основі фактичного стану. Це особливо актуально для привода обтискного прокатного стану Слябінг-1150, де висока циклічність навантажень, реверсування та значна інерційність обумовлюють підвищені вимоги до надійності вузлів. Відмова окремого елемента приводить не лише до простою, а й до технологічних дефектів та підвищених ризиків для персоналу.

На даний час основні контрольні процедури виконуються вручну, а параметри, як-от вібрація, температура або навантаження, реєструються періодично. Така інтервальна модель діагностики не дозволяє виявити ранні ознаки зносу або відхилення від номінальних умов. Значна частина дефектів — зокрема, мікротріщини у шліцьових з'єднаннях, деградація підшипників або розцентрування редукторів — виникають поступово, але залишаються непоміченими до моменту аварії. Це знижує ефективність системи ТОіР та збільшує втрати виробництва.

Доцільним є поетапне впровадження комплексу предиктивної діагностики, що ґрунтується на встановленні сенсорних вузлів з постійною реєстрацією критичних параметрів у режимі реального часу. Зокрема, сенсори контролюють рівень вібрації, температуру в зонах тертя, електричне навантаження на двигуни, а також акустичні сигнали, які можуть свідчити про приховані дефекти. Дані від сенсорів надходять до локального контролера, інтегрованого з SCADA або MES-системою цеху, де обробляються за допомогою математичних моделей прогнозування з урахуванням історичних даних та типових профілів деградації.

Техніко-економічна доцільність такої системи підтверджується прикладами її впровадження на суміжних виробництвах. Згідно з публічними

даними Групи Метінвест, інтеграція сенсорного моніторингу на електроприводах і прокатному обладнанні дозволила знизити кількість аварійних зупинок на 20–25 % та скоротити витрати на ремонт до 18 % [25].

Для Слябінга-1150 базовий сценарій впровадження може включати встановлення комбінованих сенсорів (вібрація + температура) на шпинделях, редукторах і головних підшипниках. Загальні витрати на один привід орієнтовно складатимуть 130 тис. грн, з урахуванням закупівлі обладнання, монтажу та налаштування. При цьому економічна вигода оцінюється через уникнення аварійної зупинки, яка в середньому триває 6 годин і веде до недовипуску близько 60 тонн продукції. Враховуючи вартість однієї тонни металу близько 25 тис. грн, потенційні втрати сягатимуть 1,5 млн грн, що значно перевищує початкові інвестиції.

Важливим напрямом є також цифровізація сервісної документації. Запровадження QR-маркування вузлів привода з доступом до електронного паспорта обладнання, технічної історії, графіка замін і протоколів перевірок дозволяє оптимізувати роботу технічного персоналу та знизити ймовірність помилок при обслуговуванні.

Успішна реалізація системи передбачає оновлення внутрішніх регламентів. Зокрема, до технологічних карт ТО має бути включена перевірка сигналів з сенсорів, а також фіксація відхилень у централізованому журналі технічного стану. Необхідно провести навчання персоналу роботі з цифровими інтерфейсами моніторингу та визначити критичні порогові значення для кожного параметра, після перевищення яких диспетчер ініціює діагностику або зупинку обладнання.

Результатом впровадження стане формування нової моделі обслуговування — не просто профілактичної, а прогнозної, яка дозволяє завчасно планувати ремонтні втручання, закупівлю запчастин та формування змінного завдання на ремонтний персонал. У перспективі така система може бути розширена до інших агрегатів обтискного цеху та інтегрована в загальнозаводську цифрову платформу технічного обліку.

3.3.4 Підвищення кваліфікації та технічної культури обслуговування

Надійність функціонування привода обтискного прокатного стану безпосередньо залежить не лише від технічного стану агрегатів, а й від рівня підготовки персоналу, що здійснює технічне обслуговування та ремонт. У сучасних умовах експлуатації, коли обладнання працює у складних температурно-навантажувальних режимах, а ремонтні цикли максимально оптимізовані, підготовленість персоналу набуває вирішального значення.

Практика показує, що частина технічних збоїв у приводі Слябінга-1150 має не техногенну, а людську природу. Йдеться про порушення регламентів, некоректне використання інструменту, несвоєчасне реагування на відхилення в параметрах або невірну інтерпретацію сигналів від систем контролю. За даними внутрішнього технічного звіту ПАТ «Запоріжсталь», людський фактор є супутньою причиною понад 30% інцидентів, пов'язаних із приводом головної кліті [22].

Одним із першочергових завдань модернізації системи ТОіР має стати перегляд програми підготовки персоналу. Традиційна модель підвищення кваліфікації, яка передбачає загальні інструктажі, не відповідає сучасному рівню технічної складності приводних систем. Необхідне впровадження диференційованого підходу з урахуванням специфіки обслуговування окремих елементів (електроприводи, шпинделі, підшипники, редуктори, системи мастила та охолодження).

Доцільно створити модульну систему навчання, де окремі модулі будуть присвячені роботі із сенсорними системами, читанню SCADA-даних, цифровій діагностиці, технічному аналізу ресурсів вузлів, а також основам взаємодії з предиктивними алгоритмами. В межах підприємства таку функцію може виконувати навчально-виробничий центр або інтегрований підрозділ технічного навчання при інженерно-технологічному відділі обтискного цеху.

Особливу увагу необхідно приділяти формуванню культури обслуговування. Це поняття включає дотримання стандартів точності, відповідальність за виконання процедур, системність у документуванні результатів та обґрунтованість технічних рішень. Для цього рекомендується запровадити внутрішні аудитні перевірки дотримання технологічних регламентів. Аудит має проводитись вибірково, без попередження, з подальшим обговоренням результатів на технічних нарадах. Такий підхід не лише виявляє системні помилки, а й сприяє розвитку внутрішньої відповідальності працівників.

Ефективним інструментом є також ротація ремонтного персоналу між ділянками. Перехресне навчання дозволяє спеціалістам ознайомлюватися з особливостями роботи інших вузлів, що сприяє зменшенню кількості помилок у випадках непередбачених ситуацій. Крім того, ротація дає змогу виявити приховані лідерські та технічні компетенції, що може бути використано при формуванні змінного складу або призначенні майстрів.

Важливо також інтегрувати у навчальний процес елементи зворотного зв'язку. Оператори та слюсарі повинні мати змогу повідомляти про непрактичність окремих регламентів, необхідність коригування послідовності операцій або вдосконалення технологічних карт. На основі таких відгуків можливо здійснювати адаптацію документації без втрати її формальної точності.

У частині електротехнічної підготовки акцент варто змістити на розуміння роботи з частотними перетворювачами, системами плавного пуску, а також гармонічним аналізом струмів навантаження. У межах курсу можуть бути застосовані практичні моделі на навчальному стенді або комп'ютерні тренажери з емуляцією аварійних ситуацій.

Додатковим елементом підвищення технічної культури є впровадження персоніфікованої відповідальності. Це означає закріплення вузлів за конкретними особами із веденням технічного журналу обслуговування, що дозволяє оцінювати якість виконання робіт не лише колективно, але й

індивідуально. При цьому фіксуються всі технічні втручання, оцінка результатів і підпис відповідальної особи.

Рекомендовано також узагальнювати типові випадки відмов з аналізом причин та пропозиціями щодо їх уникнення в майбутньому. Така практика — «розбір інцидентів» — широко застосовується в технічно складних галузях і дозволяє колективно формувати корисні висновки на основі реального досвіду.

На додаток до технічного навчання необхідно включити короткі тренінги з ефективної комунікації в аварійних ситуаціях. Це дає змогу уникнути втрати часу в умовах стресу та підвищує злагодженість дій при виконанні складних ремонтних операцій.

Усі зазначені заходи формують комплексний підхід до вдосконалення кадрового потенціалу в галузі технічного обслуговування та створюють передумови для сталого підвищення надійності привода прокатного стану. У поєднанні з модернізацією обладнання та впровадженням цифрових рішень, високий рівень технічної підготовки персоналу стає вирішальним фактором ефективності експлуатації та конкурентоспроможності підприємства в цілому.

3.3.5 Перехід до превентивної моделі технічного обслуговування

Історично система технічного обслуговування і ремонту прокатного устаткування в більшості металургійних підприємств України грунтувалася на реактивному підході, за яким ремонтні дії ініціювалися лише після виникнення несправностей. Такий підхід, хоча й передбачає менші витрати у короткостроковій перспективі, є ризикованим і неефективним з точки зору сучасних виробничих умов, де навіть короткочасний простій технологічної лінії призводить до значних втрат.

На прикладі Слябінга-1150 ПАТ «Запоріжсталь» очевидно, що відмова окремих елементів привода — шпинделів, підшипників, редукторів або електродвигунів — часто стає причиною зупинки всієї кліті з відповідними фінансовими втратами. При цьому значна частина таких збоїв могла б бути

запобігнута шляхом своєчасного виявлення деградаційних процесів та виконання регламентного втручання до моменту виходу вузла з ладу.

Перехід до превентивної моделі ТО передбачає планування технічного обслуговування на основі імовірності відмови, статистики зносу, ресурсних характеристик і тенденцій, виявлених під час моніторингу. Головною метою такого підходу є мінімізація ризиків простою та максимальне використання залишкового ресурсу елементів без втрати надійності.

У впровадженні превентивного підходу ключову роль відіграє систематизація даних про технічний стан обладнання. На підприємстві доцільно створити електронну базу з історією обслуговування кожного ключового вузла привода, включаючи результати вібродіагностики, температурного контролю, аналізу мастил, механічної дефектації тощо. Таке агрегованє джерело інформації дозволить формувати персоналізовані графіки обслуговування, адаптовані до фактичних умов експлуатації.

У структурі цеху або ремонтної служби має бути створена аналітична група з прогнозування відмов, яка за допомогою доступних програмних засобів (Excel, Power BI, спеціалізоване ПЗ SAP PM, Siemens CMMS тощо) зможе на основі даних формувати плани превентивних втручань. Замість рівномірного навантаження майстерні за жорстким графіком, технічні дії виконуються тоді, коли є обґрунтований ризик погіршення стану, але ще не сталося критичне пошкодження.

Переваги такого підходу полягають у кількох аспектах. По-перше, зменшується кількість аварійних зупинок, що має безпосередній вплив на ритмічність виробництва. По-друге, знижується навантаження на ремонтні бригади, оскільки замість аврального реагування формується структурований план дій. По-третє, зменшуються витрати на запасні частини, оскільки заміна виконується не надто рано і не надто пізно — тобто в момент, коли вона є економічно доцільною.

Згідно з оцінками, впровадження превентивної моделі дозволяє знизити загальні витрати на технічне обслуговування на 10–15% протягом перших двох

років експлуатації. Наприклад, якщо річні витрати на утримання привода становлять 2 млн грн, очікувана економія може досягати 200–300 тис. грн без урахування економічного ефекту від зменшення втрат продукції через простої.

У зв'язку з переходом на превентивну модель обов'язковою є адаптація існуючих інструкцій і технологічних карт. Потрібно внести зміни до графіків ППР, передбачити гнучкі вікна для виконання технічного обслуговування та закласти механізм коригування планів у залежності від сигналів із систем моніторингу.

Організаційно рекомендується перейти до моделі обслуговування типу «сервісного контракту» всередині підприємства, коли окремі підрозділи або бригади відповідають за стан обладнання не лише під час ремонту, а й між втручаннями. Це стимулює відповідальність, формує зацікавленість у недопущенні дефектів та дозволяє нарощувати досвід у роботі з конкретним типом обладнання.

На рівні підготовки персоналу слід приділити увагу розвитку компетенцій у сфері аналізу зносу, статистики ресурсів і прогнозування технічного стану. Це може бути реалізовано через модулі внутрішнього навчання або співпрацю з технічними ВНЗ, що мають лабораторії з машинного стану та діагностики.

Впровадження превентивної моделі обслуговування сприятиме не лише підвищенню технічної надійності Слябінга-1150, а й поступовій трансформації всієї системи управління технічним станом на підприємстві у відповідності до стандартів Industry 4.0. Така трансформація передбачає гнучке реагування, цифрове прогнозування і підвищення прозорості процесів ТОіР, що є основою для підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності продукції.

3.3.6 Порівняльна оцінка ефективності запропонованих рішень

Для обґрунтування доцільності запропонованих заходів з модернізації привода обтискного прокатного стану Слябінг-1150 було проведено порівняльну оцінку їх ефективності на основі технічних, економічних та організаційних критеріїв. Основною метою такої оцінки є визначення пріоритетності впровадження окремих рішень, виходячи з їх впливу на зменшення експлуатаційних витрат, підвищення надійності обладнання та зменшення непродуктивних простоїв.

Для порівняння враховано орієнтовні витрати на реалізацію кожного з заходів, очікуваний річний економічний ефект (економія на ремонтах, уникнення втрат продукції, зменшення простоїв) та індикативний термін окупності.

Таблиця 3.4 – Узагальнена ефективність запропонованих заходів модернізації привода Слябінг-1150

№	Назва заходу	Орієнтовна вартість впровадження, тис. грн	Очікувана економія, тис. грн/рік	Окупність, міс
1	2	3	4	5
1	Вдосконалення конструкції шпинделів	200	1700	2-3
2	Оптимізація мастильної системи	130	1400	1-2
3	Сенсорний моніторинг і предиктивна діагностика	130	1500	2-3

1	2	3	4	5
4	Підвищення кваліфікації та технічної культури обслуговування	60	400	1-2
5	Перехід до превентивної моделі обслуговування	80	250	4-6
	Усього	600	5250	

Результати техніко-економічного обґрунтування модернізації привода Слябінг-1150 свідчать про доцільність впровадження технічних, організаційних та цифрових удосконалень. Аналіз показав, що найбільш вагомий ефект досягається при реалізації взаємопов'язаних заходів — покращення ресурсної стійкості шпинделів, оптимізації мастильної системи, впровадження сенсорного моніторингу, підвищення технічної культури персоналу та переходу до превентивного обслуговування.

Кожен із напрямів демонструє високий потенціал окупності (до 2–3 місяців у разі типових сценаріїв), тоді як сукупний економічний ефект перевищує витрати більш ніж у вісім разів. Це зумовлено зниженням ризику аварійних зупинок, мінімізацією втручань, зменшенням втрат металу та стабілізацією виробничого ритму. Запропоновані заходи також створюють передумови для переходу до гнучких, цифровізованих систем управління технічним станом обладнання в обтискному цеху.

Впровадження удосконалень не лише підвищує надійність привода Слябінг-1150, а й сприяє реалізації стратегій технічного розвитку та ефективного виробничого менеджменту на підприємстві.

4. Охорона праці та техногенна безпека

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Виконання робіт з технічного обслуговування та капітального ремонту привода обтискного прокатного стану Слябінг-1150 на ПАТ «Запоріжсталь» супроводжується впливом значної кількості шкідливих і небезпечних виробничих факторів. Особливості середовища гарячого прокатного цеху, конструктивна складність і масогабаритність привода, обмежена доступність вузлів та висока інтенсивність технологічних процесів обумовлюють підвищений рівень професійного ризику для ремонтного персоналу. З урахуванням цього аналіз чинників небезпеки є обов'язковим етапом планування заходів з охорони праці, профілактики травматизму й професійних захворювань [21], [22], [25].

У процесі експлуатації привода, а особливо під час його ремонту, працівники перебувають у зоні впливу фізичних, хімічних, електричних, термічних та психофізіологічних чинників. Інтенсивність їх впливу залежить від виду виконуваних робіт (діагностика, змащування, заміна вузлів), характеру несправності, тривалості перебування у зоні ремонту та від стану сусіднього обладнання.

Одним з найбільш критичних чинників є високий рівень шуму. У зонах навколо головного привода рівень звукового тиску часто перевищує 90–100 дБА, що значно перевищує допустиме значення згідно з ДСН 3.3.6.037-99 (норма — 85 дБА). Тривала дія шуму викликає зниження слуху, втому, розсіяність уваги, що створює загрозу помилок при виконанні небезпечних операцій. У таких умовах обов'язковим є використання протишумових навушників або берушів класу $H \geq 30$ дБ [23].

Вібрація, особливо локальна, передається через ручний пневмоінструмент і впливає на кисті рук, передпліччя та хребет. В умовах роботи з пневмогайковертами, відбійними молотками або при зачистці

поверхонь зафіксовано рівень локальної вібрації до 130 дБ, що потребує обмеження тривалості безперервної роботи та обов'язкового застосування рукавиць із антивібраційними вставками. За стандартами НПАОП 0.00-1.28-10 тривалість безперервного впливу не повинна перевищувати 1 год у разі рівня вібрації понад 120 дБ.

Температурний фактор пов'язаний із залишковим теплом після зупинки агрегату та загальним тепловим навантаженням у прокатному цеху. Температура у підклітьовому просторі в літній період досягає 45–50 °С, що унеможливлює довготривале перебування без регулярних перерв і гідратації. Згідно з ДСанПіН 3.3.6.042-99 при температурі понад 35 °С допустима безперервна робота не повинна перевищувати 20 хвилин з наступною перервою не менше 10 хв у прохолодному приміщенні. Працівники мають бути забезпечені спецодягом з термостійких матеріалів (типу ЛЗК або КВТ) та питним режимом.

Електричні ризики пов'язані з напругою, що подається на електроприводи (до 750 В), а також з накопиченим зарядом на ємнісних вузлах частотних перетворювачів. Основними джерелами небезпеки є пошкоджена ізоляція, недотримання порядку знеструмлення, або помилковий пуск після зупинки. Роботи дозволено виконувати лише при наявності наряду-допуску, після зняття напруги, заземлення і перевірки відсутності фаз. Всі працівники проходять інструктаж з електробезпеки та забезпечуються відповідними ЗІЗ — діелектричні рукавички, калоші, інструмент з ізоляцією, а також індикатори напруги.

Механічні небезпеки реалізуються під час демонтажу масивних вузлів (валів, корпусів редукторів, кронштейнів). Через велику масу (від 0,5 до 3 т) всі операції підйому виконуються із залученням кранів, траверс, такелажного обладнання. При порушенні правил стропування або некоректному підборі вантажопідйомного обладнання зростає ризик падіння елементів, що загрожує тяжким травматизмом. Для зниження ризику обов'язковим є візуальний

контроль стану строп, обмеження доступу у зону підйому та присутність сигнальника при кожному підйомі [22].

Обмежений простір — ще один важливий чинник. Частина ремонтних операцій (наприклад, ревізія підшипників або діагностика електрообладнання) виконується в підклітьовому просторі, де доступ утруднений, освітлення слабке, а вентиляція недостатня. Тут значно підвищується ризик ударів, падіння інструментів або втрати свідомості. Для зниження ризику використовуються налобні ліхтарі, переносні джерела світла, спецодяг із сигналізуючими елементами, а також обов'язкова наявність радіозв'язку або портативних переговорних пристроїв.

Хімічні чинники пов'язані з використанням та залишками технологічних рідин: мастил, гідравлічних емульсій, охолоджувачів. При їх перегріванні або розкладанні можуть утворюватися пари, які викликають подразнення слизових, головний біль, а за високої концентрації — хронічне отруєння. Особливу небезпеку становлять мікрокраплі з металевим пилом та сажевими залишками. Захист забезпечується респіраторами класу FFP2–FFP3, вентиляцією або витяжним рукавом під час зачистки [23].

Психофізіологічні фактори включають напруження уваги, стрес, перевтому. Під час капітальних ремонтів персонал часто працює понад 10–12 годин у посиленому темпі, у складних умовах, у зоні шуму, підвищеної температури і вібрації. Це призводить до зниження концентрації та ризику неадекватної реакції. Згідно з внутрішніми положеннями ПАТ «Запоріжсталь», у зонах підвищеної небезпеки робота допускається не більше 2 год поспіль, після чого передбачено зміну або відпочинок із медичним контролем [22], [25].

Таким чином, технічне обслуговування і ремонт привода обтискного стану відбувається в умовах комплексного впливу шкідливих і небезпечних факторів, що вимагає не лише засобів індивідуального захисту, але й ефективного планування робіт, впровадження сучасних технологій, дотримання інструкцій, культури виробничої безпеки та психологічної готовності персоналу.

4.2 Засоби індивідуального захисту та вимоги до організації робочого місця при ремонті привода Слябінг-1150

Безпечна експлуатація та обслуговування промислового обладнання неможливі без дотримання вимог охорони праці, впровадження системної організації безпечного робочого місця та використання сучасних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Особливої актуальності ці вимоги набувають під час проведення ремонтів привода обтискного стану Слябінг-1150, коли роботи виконуються в умовах підвищеного ризику — при наявності високих температур, механічного навантаження, електричної напруги, обмеженого доступу та інтенсивного шумового тла [21], [22], [23].

Робоче середовище у зоні розміщення привода характеризується запиленістю, вібрацією, залишковим теплом від агрегатів, ризиком ураження електричним струмом, а також присутністю мастил та гідравлічних рідин. Демонтаж та обслуговування вузлів відбуваються на висоті або в підклітьовому просторі, із застосуванням важкого такелажного обладнання, що зумовлює підвищену небезпеку. Для підйому і переміщення деталей використовуються кран-балки, талі, вантажні траверси, електромеханічні домкрати, а також акумуляторний інструмент з низьким рівнем вібрації та покращеною мобільністю [22].

Згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 13688:2015, ДНАОП 0.00-4.26-96 та внутрішніми стандартами ПАТ «Запоріжсталь», усі працівники, залучені до ремонтних робіт, повинні бути забезпечені індивідуальними засобами захисту. Мінімальний комплект включає:

- комбінезон або костюм із вогнетривкої тканини з антистатичним просоченням;
- захисну каску з підборідним ременем і ліхтарем;
- діелектричне взуття з посиленим носком;
- термостійкі або маслостійкі рукавиці відповідно до типу робіт;

- протишумові навушники або беруші (Н ≥ 30 дБ);
- напівмаску або респіратор класу FFP2/FFP3;
- страхувальний пояс із карабінами (при роботах на висоті);
- налобний ліхтар або акумуляторна лампа з магнітною основою.

Окремо видаються захисні окуляри, щитки з полікарбонату, комірці для захисту шиї, рукавиці з комбінованим захистом (від вологи, термічного й механічного впливу). Усі ЗІЗ проходять інвентаризацію, маркування, мають паспорт, інструкцію з використання та термін служби. Зношені або пошкоджені засоби захисту негайно вилучаються з експлуатації.

Організація робочого місця включає:

- встановлення меж ремонтної ділянки із застосуванням сигнальної стрічки або тимчасових бар'єрів;
- візуальне позначення проходів, виходів, евакуаційних маршрутів;
- забезпечення освітлення робочої зони з інтенсивністю не менш ніж 200 лк;
- використання протиковзних накладок або гумових килимків;
- наявність вогнегасників, аптечок, засобів зв'язку;
- підключення всього обладнання до мережі 36 В або живлення від акумулятора.

Інструмент має бути технічно справним, з робочими ручками, ізольованими елементами, без слідів корозії або пошкоджень. Перед кожним використанням перевіряється справність перемикачів, акумуляторів, кріплень. Впровадження акумуляторного інструменту дозволило не лише знизити вібраційне навантаження, а й підвищити мобільність працівника у важкодоступних зонах без використання пневмошлангів, які часто є джерелом травматизму через спотикання або обмеження рухів.

Усі операції з використанням кранів і вантажопідйомного обладнання проводяться відповідно до плану підйому, затвердженого майстром. Перед початком робіт перевіряється стан строп, гаків, гальмівних пристроїв, фіксуються параметри підйому в журналі. У зоні робіт дозволено перебування

лише осіб, які безпосередньо виконують операції. Наявність сигналіста та контроль з боку керівника зміни є обов'язковими.

Комунікація між членами бригади забезпечується через портативні радіостанції, а у разі аварійної ситуації діє система оповіщення з виводом сигналу на пульт управління та чергового диспетчера. Усі схеми евакуації, місця розташування душових, аптечок, засобів пожежогасіння позначені на інформаційних щитах.

Психофізіологічний стан персоналу враховується при формуванні змін. У разі підвищеної температури або шуму понад гранично допустимі рівні (35 °С або 90 дБА), встановлюється обмеження тривалості безперервної роботи до 2 годин із наступною ротацією. Робота понад 4 години без перерви заборонена. Працівники повинні мати доступ до питної води, охолоджувальних пристроїв, а також зони відпочинку.

До початку робіт оформлюється наряд-допуск, в якому зазначено:

- місце проведення робіт;
- склад бригади;
- перелік операцій;
- заходи безпеки;
- особа, відповідальна за електробезпеку;
- строки та засоби контролю.

Умови виконання наряду контролюються інженером служби охорони праці або призначеною особою. Наряд-допуск зберігається не менше 30 діб після завершення робіт. Всі працівники розписуються в журналі інструктажу та ознайомлення з умовами допуску.

В останні роки на підприємстві впроваджено електронні чек-листи охорони праці, які працівник заповнює на планшеті перед допуском до робіт. Система перевіряє, чи видано ЗІЗ, чи пройдено інструктаж, чи перевірено інструмент. Дані синхронізуються з базою управління охороною праці. Це дозволяє оперативно фіксувати відхилення, аналізувати статистику порушень та підвищити рівень контролю.

Під час підготовки до ремонтної кампанії служба головного механіка проводить оцінку ризиків (згідно з внутрішньою методикою або стандартом FMEA), виявляє критичні вузли, формує план дій на випадок надзвичайної ситуації, а також оцінює потребу в додаткових ЗІЗ або зміні складу бригади.

Комплексність підходу, що поєднує технічне забезпечення, регламентовану підготовку персоналу, адміністративний контроль і цифрові інструменти, є основою забезпечення безпечних умов праці під час ремонту привода Слябінг-1150. Така система охорони праці дозволяє не лише знижувати ризик травматизму, але й забезпечити виконання робіт у межах графіку, без позапланових зупинок та із збереженням технічної цілісності обладнання.

4.3 Пожежна та техногенна безпека

У процесі експлуатації та ремонту привода обтискного прокатного стану Слябінг-1150 на ПАТ «Запоріжсталь» виникають численні потенційні загрози, пов'язані як із пожежною небезпекою, так і з іншими техногенними ризиками. Особливості гарячого металургійного виробництва, присутність легкозаймистих матеріалів, висока температура, значне пиловиділення, а також виконання зварювальних і різальних робіт в обмеженому просторі створюють умови, які потребують підвищеної уваги до питань безпеки.

Основними джерелами пожежонебезпеки є відкриті гарячі поверхні, електрообладнання під навантаженням, наявність іскор від фрикційних взаємодій, залишки технологічних мастил і парів горючих речовин. Під час ремонту привода додаються процеси демонтажу вузлів, проведення газозварювання, використання легкозаймистих матеріалів (фарби, лаки, кабельна ізоляція), що суттєво підвищує ймовірність виникнення займання або вибуху. Металевий пил у поєднанні з органічними залишками в умовах високої температури також може створювати вибухонебезпечне середовище, особливо у важкодоступних зонах, де технічне очищення відбувається нерегулярно.

Згідно з вимогами ДБН В.1.1-7:2016, виробничі приміщення металургійного комплексу класифікуються як категорії А або Б за пожежною небезпекою. Це вимагає обладнання зон системами пожежного сповіщення, стаціонарними та мобільними засобами гасіння (вогнегасники, водяне або пінне пожежогасіння), евакуаційними виходами та автономними джерелами освітлення. У приміщеннях, де зберігаються мастила або горючі матеріали, додатково встановлюються системи вентиляції та вогнезахисні бар'єри.

Одним із ключових елементів протипожежної безпеки є організація контролю перед проведенням гарячих робіт. Згідно з внутрішніми нормативними актами ПАТ «Запоріжсталь», перед кожним газозварюванням або різанням у зоні ремонту обов'язковим є оформлення наряду-допуску з зазначенням осіб, відповідальних за контроль. Всі горючі матеріали мають бути вилучені із зони, встановлюються вогнезахисні скрани, а поблизу місця робіт розміщується вогнегасник з піною або вуглекислотою. У випадках підвищеного ризику застосовуються додаткові заходи — чергування відповідального з тепловізором або контроль стану атмосфери (наявність пари, газів, пилу).

Для електрообладнання застосовуються лише сертифіковані вогнегасники класу С (наприклад, вуглекислотні). Заборонено використовувати воду або пінні суміші у разі виникнення загоряння на електричних щитах, трансформаторах або приводах. Усі електропідключення мають бути заземлені, ізоляція — перевірена, а розподільчі щити — герметизовані з обмеженим доступом.

Евакуаційні шляхи повинні бути чітко марковані, не загромаджені, обладнані світловими покажчиками. У темний час або при задимленні увімкнення аварійного освітлення має здійснюватися автоматично. Двері екстрених виходів відкриваються без використання ключів. Всі працівники повинні бути ознайомлені з маршрутами евакуації та проходити навчальні тренування не рідше одного разу на півроку. Для ремонтного персоналу

передбачені інструктажі перед кожною зміною, особливо під час роботи в зонах підвищеної небезпеки.

Техногенна безпека охоплює не лише протипожежний аспект, а й систему аналізу аварійних ситуацій. На підприємстві використовується методологія HAZOP (Hazard and Operability Studies) для моделювання сценаріїв аварій — ураження струмом, загазованість, руйнування кріплень, обвал конструкцій. Застосовується також FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) для оцінки наслідків потенційних відмов обладнання та розробки профілактичних заходів. На підставі результатів моделювання формується база заходів оперативного реагування, включаючи алгоритми локалізації загроз, послідовність евакуації, запуск систем аварійного оповіщення, оповіщення чергових підрозділів ДСНС.

У зонах, де ймовірне накопичення пилу або парів мастила, встановлюються автоматичні датчики контролю середовища — температури, вологості, газового складу. При досягненні критичних параметрів система подає сигнал диспетчеру або автоматично блокує подачу електроенергії, вмикає витяжку або водяне зрошення. Також застосовуються переносні газоаналізатори для індивідуального використання ремонтним персоналом.

Особливу увагу приділяють тренуванням. Працівники проходять навчання на симуляторах, відпрацьовують дії у разі виникнення загоряння, використання засобів пожежогасіння, евакуацію з задимлених приміщень. Для тих, хто залучений до гарячих робіт, обов'язкове проходження щорічної переатестації. У рамках програми підвищення культури безпеки проводяться внутрішньоцехові конкурси, дні охорони праці, тематичні інструктажі.

Техногенна безпека також передбачає заходи зі зниження пожежної навантаженості. Замість горючих ізоляційних матеріалів використовуються негорючі (на основі скловолокна, мінеральної вати), впроваджуються кабелі у вогнезахисній оболонці, застосовуються фарби з уповільнювачами горіння. Будівельні конструкції, що раніше виготовлялися з дерева, поступово замінюються на металеві або вогнестійкі композитні.

Для оперативної взаємодії працівники забезпечуються доступом до електронних схем розташування гідрантів, планів евакуації, контактів відповідальних осіб. Виробничі зони обладнані стендами з інформаційними таблицями, покажчиками, QR-кодами для швидкого отримання інструкцій. Усі інциденти фіксуються в електронному журналі, аналізуються, визначається їх першопричина та готуються пропозиції щодо усунення факторів ризику.

Сучасне розуміння пожежної та техногенної безпеки базується на проактивному підході: не лише реагування на інциденти, а й попередження їх виникнення шляхом технологічної модернізації, навчання, цифрового моніторингу та постійного вдосконалення нормативної бази. Такий підхід дозволяє мінімізувати ризики, зберегти здоров'я та життя персоналу, забезпечити безперервність технологічного процесу та відповідність стандартам корпоративної відповідальності у сфері охорони праці та довкілля.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було проведено дослідження технічного стану, особливостей експлуатації, організації обслуговування і ремонту, а також удосконалення системи привода обтискного прокатного стану Слябінг-1150 ПАТ «Запоріжсталь». Робота охоплює технічні, організаційні, економічні та безпекові аспекти, що забезпечують ефективну, безперебійну й безпечну роботу обладнання в умовах високонавантаженого виробництва.

У першому розділі проаналізовано конструктивні особливості стану Слябінг-1150, зокрема робочої кліті, вузлів подачі та рольгангів. Особливу увагу приділено аналізу недоліків експлуатації та зносу привода — шпинделів, підшипників і мастильних систем. Виявлено, що значна частина пошкоджень пов’язана з недосконалістю конструкції окремих вузлів, старінням елементів і недостатньою ефективністю наявної системи обслуговування.

У другому розділі здійснено розрахунки основних технічних параметрів роботи привода: обертових моментів, зусиль прокатки, допустимих навантажень. Наведено технічні характеристики привода, побудовані на основі чинної технічної інструкції ПАТ «Запоріжсталь» та нормативної бази. Результати підтвердили необхідність контролю навантажень та врахування динамічних режимів при проектуванні й експлуатації привода.

У третьому розділі розроблено організаційно-технологічну модель обслуговування привода. Проаналізовано існуючу систему ППР, складено річний графік технічного обслуговування та капітального ремонту з урахуванням фактичного стану обладнання й сучасних вимог до надійності. Запропоновано модернізацію конструкції шпинделів, оптимізацію системи мастила, впровадження сенсорного моніторингу, перехід до предиктивної моделі обслуговування та підвищення технічної компетенції персоналу. Порівняльна оцінка ефективності цих заходів довела їх економічну доцільність — сукупна економія при реалізації рішень може сягати понад 5 млн грн/рік

завдяки зменшенню простоїв, уникненню аварій та скороченню витрат на ремонти.

Окремим напрямом у роботі стала реалізація принципів цифровізації. У межах модернізації передбачено впровадження автоматизованої системи збору та аналізу технічного стану вузлів привода на основі сенсорних платформ, що дозволяють прогнозувати ресурс елементів у реальному часі. Це створює передумови для переходу до сервісної моделі обслуговування на основі фактичного стану обладнання.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці та техногенної безпеки. Здійснено аналіз виробничих ризиків у зоні привода — фізичних, хімічних, психофізіологічних та електротехнічних. Розроблено комплекс заходів для підвищення рівня безпеки: використання сучасних ЗІЗ, організація робочого місця, електронний контроль допусків, впровадження чек-листів і тренувань персоналу. Підкреслено важливість формування культури безпеки та переходу до проактивного управління ризиками.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що ефективне функціонування привода Слябінга-1150 залежить від стану вузлів, рівня автоматизації моніторингу, організації обслуговування та культури виробництва. Запропоновані в роботі технічні, організаційні та інженерні рішення можуть бути покладені в основу модернізації системи обслуговування не лише на цьому об’єкті, а й у подібних агрегатах прокатного виробництва в Україні.

Отримані результати можуть бути використані при плануванні капремонтів, розробці технічних умов, впровадженні систем діагностики, а також для формування навчальних програм підвищення кваліфікації персоналу в галузі експлуатації та ремонту важкого металургійного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арендаренко В. М., Дудніков І. А. Теорія механізмів і машин. Полтава : ПНТУ, 2020. 324 с.
2. Коваленко О. В. Вібродіагностика обладнання / Вісник Криворізького технічного університету. 2017. Вип. 45. С. 112–118.
3. Крот П. В. Проблеми динаміки і діагностики редукторних ліній привода прокатних станів / Збірник праць міжнар. конф. «Динаміка, надійність і довговічність механічних систем». Севастополь : СевНТУ, 2008. С. 47–52.
4. Литвиненко О. В. Діагностика технічного стану обладнання / Український радіоелектронний журнал. 2023. № 6. С. 61–66.
5. Нестерчук Д. М., Квітка С. О., Галько С. В. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин. Мелітополь : МДПУ, 2017. 146 с.
6. Лазаренко О. В., Бублик В. В. Методи та засоби технічної діагностики. Харків : УкрДУЗТ, 2020. 180 с.
7. Одарченко М. С., Степанов В. І., Черненко Я. М. Основи охорони праці. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 240 с.
8. Пересада С. М. Обобщенная теорія косвенного векторного управління асинхронним двигуном / Технічна електродинаміка. 1999. № 3. С. 21–27.
9. Пересада С. М., Ковбаса С. М. Теорія мехатронних систем 1 : метод. вказ. до виконання розрахунково-графічної роботи. Київ : НТУУ “КПІ”, 2011. 72 с.
10. Садовий О. В., Дерець О. Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2014. 98 с.
11. Самойлюк Є. П., Сафонов В. В. Боротьба з шумом і вібрацією в промисловості. Київ : Вища школа, 1990. 206 с.

12. Складання, ремонт та монтаж механічного обладнання / Донбаський держ. техн. ун-т. Алчевськ : ДДТУ, [б. д.]. 96 с.

13. Соколов О. В. Методи удосконалення технології прокатки / Металургія : зб. наук. праць. 2017. Вип. 40. С. 58–63.

14. Технологія прокатки металів / Нац. техн. ун-т України “КПІ”. Київ : КПІ, [б. д.]. 220 с.

15. Шваб’юк В. І. Опір матеріалів. Київ : НУ “Львівська політехніка”, 2016. 308 с.

16. Технологічна інструкція / Орг. ПАТ «Запоріжсталь». Запоріжжя, 2023. 94 с.

17. Внутрішній технічний звіт ПАТ «Запоріжсталь» : модернізація обтискного цеху. Запоріжжя, 2023. 140 с.

18. Обдул В. Д., Ленок А. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічного завдання та технологічних розрахунків для курсового проєкту з дисципліни “Технологія листового прокатування”. Запоріжжя : НУ “Запорізька політехніка”, 2021. 70 с.

19. Методи розрахунків технологічних навантажень металургійних машин : конспект лекцій. Донецьк : Донбаська держ. машинобудівна академія, [б. д.]. 67 с.

20. Бешта О. С., Балахонцев О., Бородай В. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві. Дніпропетровськ : МОН України, Нац. гірн. ун-т, 2010. 224 с.

21. Монтаж металургійного обладнання : навч. посіб. / Жук А. Я., Малишев Г. П., Желябіна Н. К., Таратута К. В. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2017. 328 с.

22. Технічне обслуговування металургійного обладнання : навч. посіб. / Жук А. Я., Малишев Г. П., Желябіна Н. К., Таратута К. В. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2017. 288 с.

23. Ремонт металургійного обладнання : навч. посіб. / Жук А. Я., Малишев Г. П., Желябіна Н. К., Таратута К. В. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2017. 236 с.

24. Напрями творчого проектування та його техніко-економічне обґрунтування. Книга 1 : навч. посіб. / Жук А. Я., Желябіна Н. К., Таратута К. В., Коваль М. В. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2012. 574 с.

25. Напрями творчого проектування та його техніко-економічне обґрунтування. Книга 2 : навч. посіб. / Жук А. Я., Бойко О. В., Таратута К. В., Коваль М. В. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2012. 542 с.

26. Обґрунтування економічної доцільності технічних рішень : навч.-метод. посіб. / Жук А. Я., Желябіна Н. К., Таратута К. В., Коваль М. В. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 364 с.

27. Мархель І. І. Деталі машин : навч. посіб. Київ : Алерта, 2005.368 с.

28. Лапін В. М. Основи охорони праці. Львів : ЛБІ НБУ, 2002. 142 с.

29. Рижков В. Г. Електробезпека : метод. вказівки до дипломного та курсового проектування, контрольних робіт і практичних занять для студентів спеціальності «Металургія чорних металів» / уклад. В. Г. Рижков. Запоріжжя, 2004. 60 с.

30. Мацьків О. О. Професійна та цивільна безпека : навч. посіб. Львів : ЛНМУ ім. Данила Галицького, 2022. 140 с.

31. Грибан В. Г., Фоменко А. Є., Казначеєв Д. Г. Безпека життєдіяльності та охорона праці : навч. посіб. Дніпро : ДДУВС, 2022. 242 с.

32. Запорожець О. І. Основи охорони праці : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2019. 424 с.

33. Новіков С. В. «Метінвесті» розповіли, як трансформують бізнес за допомогою ШІ / RBC.ua. URL: https://www.rbc.ua/rus/news/metinvesti-rozpovili-k-transformuyut-biznes-1749564846.html (дата звернення: 12.06.2025).

ДОДАТКИ

СПИСОК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

№ п/п	Найменування	Кільк. листів	Формат
1	Креслення загального виду	1	А1
2	Складальны креслення	2	А1
3	Креслення експлуатаційної частини	1	А1
4	Деталювання	1	А3
5	Специфікації	3	А4