Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

кафедра металургійного обладнання
(повна назва кафедри)

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

На тему Удосконалення установки валкової розливки-прокатки

Виконав: студент групи 6.1331-с2

Андрущенко Н.С.
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма
133.00.12 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Керівник Власов А.О.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Н.контроль Васильченко Т.О.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2026 року

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(повне найменування факультету)
кафедра металургійного обладнання
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – бакалавр

Напрям підготовки (спеціальність) 133 Галузеве машинобудування
(код та назва спеціальності)

Програма професійного спрямування (спеціалізація) _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.О. Власов
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___»_____**2026 р.**

ЗАВДАННЯ

до випускної кваліфікаційної роботи бакалавра

Андрущенко Нікіти Сергійовича

1. Тема проекту «Удосконалення установки валкової розливки-прокатки», керівник проекту кандидат технічних наук Власов А.О.
затверджені наказом по університету від «23» грудня 2025 р. № 1831-с
2. Термін подання студентом проекту 12 червня 2026 року.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи техніко-економічні показники установки валкової розливки-прокатки.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1. Загальна частина; 2. Спеціальна частина; 3. Експлуатаційна частина; 4. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки та рекомендації.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників): 1. Вид загальний установки ВРП - А2; 2. Ливарно прокатна кліть - А1; 3. Вісь робочого валка - А3; 4. Шестерня конічна - А3; 5. Бандаж Д50 - А3.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Власов А.О. кандидат техн. наук		
2	Власов А.О. кандидат техн. наук		
3	Власов А.О. кандидат техн. наук		
4	Власов А.О. кандидат техн. наук		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Збір матеріалу на проєктування	13.05.2026 - 18.05.2026	
2	Групування та аналіз зібраного матеріалу. Уточнення завдань проєктування	18.05.2026 - 22.05.2026	
3	Виконання теоретичної частини проєкту	22.05.2026 - 29.05.2026	
4	Виконання графічної частини проєкту	30.05.2026 - 05.06.2026	
5	Написання та оформлення пояснювальної записки	05.06.2026 - 10.06.2026	
6	Перевірка проєкту консультантами	10.06.2026 - 13.06.2026	
7	Попередній захист проєкту	14.06.2026	
8	Переплітання пояснювальної записки	Згідно з графіком	
9	Захист проєкту у ДЕК	Згідно з графіком	

Студент _____ Н.С. Андрущенко
(підпис) (ініціали, прізвище)

Керівник проекту _____ А.О. Власов
(підпис) (ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Андрущенко Н.С. Удосконалення установки валкової розливки-прокатки.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавр за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, керівник А. О. Власов. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра металургійного обладнання, 2026.

Робота присвячена розрахунку приводу ливарно-прокатної кліті (ЛПК) для проведення фізичного моделювання гарячої прокатки середньовуглецевих сталей за допомогою матеріалу-імітатора. В межах роботи проведено порівняльний аналіз чинних типів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) та комплексів ЛПК, обґрунтовано застосування модуля ЛПК як альтернативи МБЛЗ, виконано конструктивний аналіз модуля ЛПК для круглої заготовки, підібрано матеріал-імітатор для виконання фізичного моделювання, розраховано основні енергосилові параметри прокатки, на їх основі виконано кінематичний розрахунок приводу кліті, розроблено картку змащування для основних елементів приводу та алгоритми дій персоналу під час надзвичайних ситуацій. Результати роботи можуть бути використані для модернізації аналогічного обладнання на промислових підприємствах.

Ключові слова: ЛИВАРНО-ПРОКАТНА КЛІТЬ, ТРИВАЛКОВИЙ КАЛІБР, ЗУСИЛЛЯ ПРОКАТКИ, ПРИВІД, БЕЗПЕРЕРВНЕ ЛИТТЯ, ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ОХОРОНА ПРАЦІ.

ABSTRACT

Andrushchenko N.S. Improvement of the twin-roll casting and rolling installation.

Qualification graduation work for obtaining the higher education degree bachelor in specialty 133 – Industrial Machinery Engineering, supervisor A. O. Vlasov. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute them. Yu.M. Potebni, department of metallurgical equipment, 2026.

The work is dedicated to the design calculation of a casting and rolling stand (CRS) drive for physical modeling of hot rolling of medium-carbon steels using a simulative material. Within the framework of the work, a comparative analysis of existing types of continuous casting machines (CCM) and CRS complexes is performed, the application of a CRS module as an alternative to a CCM is substantiated, and a structural analysis of the CRS module for a round billet is carried out. Furthermore, a simulative material for performing physical modeling is selected, the main energy and power parameters of rolling are calculated, and based on them, a kinematic calculation of the stand drive is executed. Additionally, a lubrication chart for the main drive elements and emergency response algorithms for personnel are developed. The results of the work can be utilized for modernizing similar equipment at industrial enterprises.

Keywords: CASTING-ROLLING MILL, THREE-ROLL CALIBER, ROLLING FORCE, DRIVE, CONTINUOUS CASTING, PHYSICAL SIMULATION, LUBRICANTS, OCCUPATIONAL SAFETY.

ЗМІСТ

ВСТУП……..8
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА……..9
1.1 Коротка характеристика МБЛЗ та допоміжного обладнання……9
1.2 Застосування модуля ливарно-прокатної кліті як альтернатива МБЛЗ……..20
1.3 Характеристика модуля ЛПК для круглої заготовки……22
1.4 Технологія ЛПК та завдання до проектування розрахункової частини…….26
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА……...28
2.1 Обґрунтування вибору матеріалу-імітатора……..28
2.2 Розрахунок зусиль у тривалковому калібрі……...29
2.3 Вихідні дані та параметри осередку деформації……..31
2.4 Розрахунок середнього питомого тиску……34
2.5 Визначення повного зусилля прокатки……..35
2.6 Визначення моменту прокатки……...35
2.7 Кінематичний розрахунок привода……36
2.8 Розрахунок конічної шестерні……39
2.9 Підбір карданного валу……...43
3 ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ЧАСТИНА……..45
3.1 Функції змащення……45
3.1.1 Зниження коефіцієнту тертя……45
3.1.2 Відведення тепла……..46
3.1.3 Очищення зон фрикційного контакту……47
3.1.4 Захист від корозії……..48
3.2 Вибір схеми мащення редуктора Ц2-350-У2……49
3.3 Вибір схеми мащення редуктора 2Ч-40-20……...51
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……54
4.1 Потенційно шкідливі фактори при експлуатації установки ВРП……...54
4.2 Розрахунок контуру заземлення установки ВРП……..58
4.3 Пожежна безпека……62

4.4 Дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій……...63
4.4.1 Алгоритм дій при оголошенні сигналу «Повітряна тривога»……..63
4.4.2 Алгоритм дій при раптовому знеструмленні…….64
4.4.3 Алгоритм дій при виникненні пожежі……64
ВИСНОВКИ……...66
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ……68
ДОДАТКИ……..72

ВСТУП

Машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) є основним технологічним обладнанням для виробництва металевих напівфабрикатів у сучасній металургійній промисловості. Понад 98% світового обсягу сталі виробляється методом безперервного розливання. Водночас традиційні МБЛЗ мають суттєві недоліки: значні габарити установок, великий обсяг капітальних вкладень, тривалий технологічний ланцюг від рідкого металу до готової заготовки та значне споживання енергії.

Перспективним напрямом розвитку металургійного обладнання є суміщені технології лиття та прокатки (ЛПК), що дозволяють скоротити кількість технологічних операцій і підвищити ефективність виробництва. На базі Запорізького національного університету розроблено принципово новий пристрій - ливарно-прокатну кліть (ЛПК), що реалізує суміщений процес кристалізації та деформування металу в тривалковому замкненому калібрі.

Метою данної роботи є розрахунок приводу ливарно-прокатної кліті (ЛПК) для проведення фізичного моделювання гарячої прокатки середньовуглецевих сталей за допомогою матеріалу-імітатора.

Для досягнення поставленої мети в роботі виконані наступні задачі:

1. Виконано конструктивний аналіз модуля ЛПК для круглої заготовки;
2. Підібрано матеріал-імітатор для виконання фізичного моделювання;
3. Розраховано основні енерго-силові параметри прокатки;
4. На їх основі виконано кінематичний розрахунок приводу кліті;
5. Розроблено картку мащення для основних елементів приводу;
6. Розробити алгоритми дій персоналу під час надзвичайних ситуацій під час експлуатації установки.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Коротка характеристика МБЛЗ та допоміжного обладнання

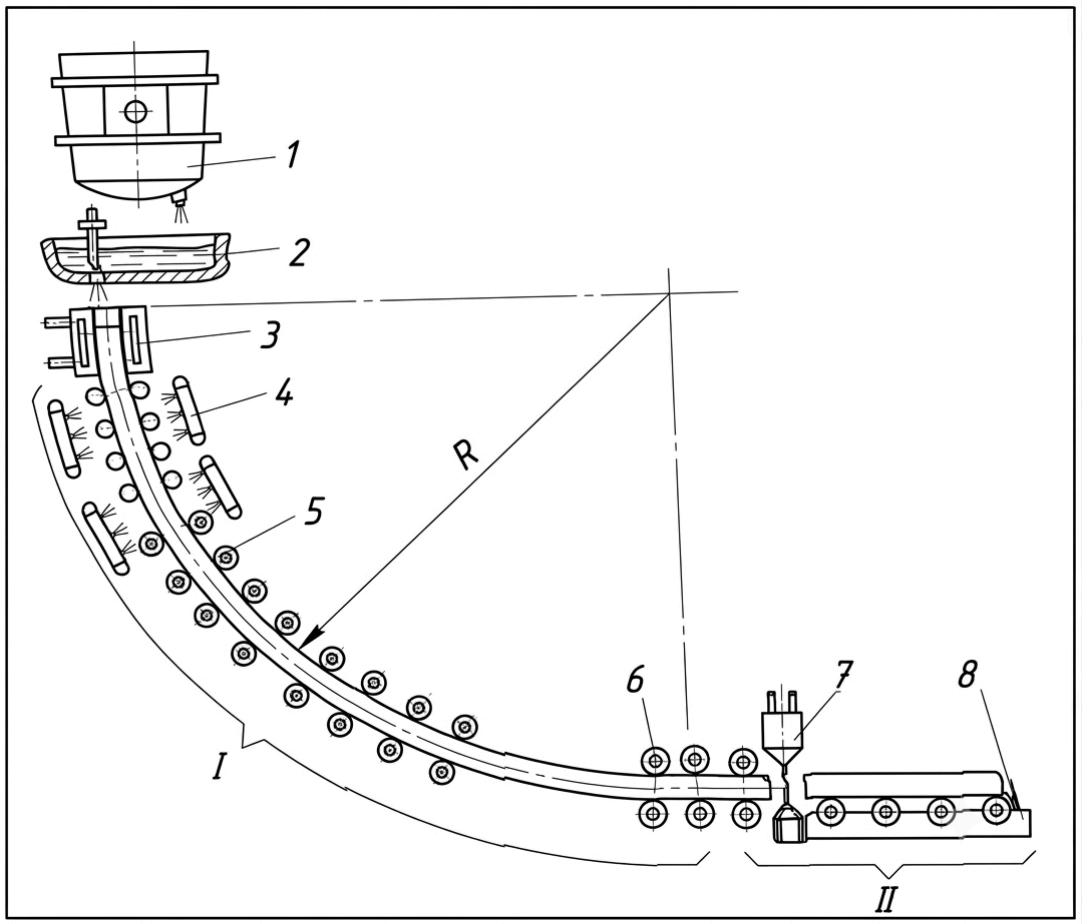
Машина безперервного лиття заготовок - це металургійний агрегат, у якому рідкий метал безперервно перетворюється на напівфабрикат (заготовку, блюм або сляб) для подальшого прокатного переділу. До широкого промислового освоєння методу безперервного розливання в 1950-х роках сталь розливали виключно у нерухомі чавунні виливниці, отримуючи злитки масою від кількох сотень кілограмів до десятків тонн. Злитки потребували подальшого нагрівання та прокатки на блюмінгах і слябінгах - операцій трудомістких, енергоємних і супроводжуваних значними втратами металу через обрізання дефектних голівок і донних частин. Введення технології безперервного розливання кардинально змінило цей ланцюг: рідкий метал безпосередньо перетворюється на готовий напівфабрикат, що виключає проміжний переділ та суттєво скорочує витрати металу, енергії й виробничого часу [1].

Промислове освоєння технології безперервного розливання сталі почалося у 50-х роках 20-го ст. Перші виробничі установки являли собою вертикальні машини з відносно невисокою швидкістю витягування і обмеженою продуктивністю. Кардинальним поворотом у розвитку технології стало впровадження радіальних МБЛЗ у 1960-х роках. Зменшення висоти цеху з 30-40 м (вертикальна схема) до 10-15 м (радіальна схема) різко знизило капітальні витрати на будівництво і відкрило шлях до масового тиражування МБЛЗ. До кінця 1970-х років криволінійні і радіальні машини стали стандартом для нових сталеплавильних цехів. У подальшому прогрес у галузі МБЛЗ визначався переважно підвищенням швидкості розливання і якості металу, а також розширенням марочного сортаменту.

У світовому масштабі нині понад 98 % обсягу виробленої сталі розливається методом безперервного лиття [2]. Дані Всесвітньої асоціації сталі свідчать, що у більшості провідних країн-виробників частка безперервно литого металу сягає 97-99 % від загального обсягу виплавленої сталі [3]. Таке домінування пояснюється комплексом переваг перед традиційним розливанням:

підвищенням виходу придатного металу на 10-15 %, зниженням питомих витрат енергії, покращенням однорідності хімічного складу по перерізу заготовки та можливістю повної автоматизації процесу.

Технологічний процес безперервного розливання охоплює наступну послідовність операцій [4]. Рідка сталь, попередньо підготовлена на агрегатах позапічної обробки, заповнює сталерозливний ківш, який встановлюється на поворотний стенд машини безперервного розливання. З ковша метал надходить через захисну трубу у проміжний ківш (промківш), де відбувається усереднення температури, часткове відділення неметалевих включень і забезпечується безперервна подача металу до кристалізаторів навіть під час заміни ковшів. З промківша метал через занурювальний стакан надходить у водоохолоджуваний мідний кристалізатор, де відбувається формування твердої оболонки заготовки. Частково затверділа заготовка витягується системою роликів у зону вторинного охолодження (ЗВО), де завершується кристалізація. Після повного твердіння заготовка ріжеться газокисневим різаком або механічними ножицями на мірні довжини [4]. За конструктивною схемою виділяють п'ять основних типів МБЛЗ [4]: вертикальні; вертикальні з вигином; радіальні; криволінійні; горизонтальні. Крім того, окремо виділяють валкові та стрічкові МБЛЗ. Вертикальні МБЛЗ є найпростішими конструктивно: заготовка рухається вертикально донизу упродовж усієї металургійної довжини машини. Їхня перевага полягає у відсутності деформацій заготовки при витягуванні, що є важливим для відливання спеціальних сталей та великих перерізів. Недолік - значна висота будівлі цеху (до 30–40 м). Вертикальні машини з вигином поєднують початкову вертикальну ділянку з наступним плавним вигином заготовки у горизонтальне положення. Це дозволяє суттєво знизити висоту споруди порівняно з чисто вертикальними машинами.



1 - сталерозливний ківш; 2 - промківш; 3 - кристалізатор; 4 - зона вторинного охолодження; 5,6 - тягнуче-правильна машина; 7 - газорізальна машина.

Рисунок 1.1 - Принципова схема радіальної МБЛЗ

Радіальні МБЛЗ, у яких кристалізатор і зона охолодження розташовані по дузі постійного радіуса, набули найширшого поширення завдяки оптимальному балансу між компактністю будівлі та продуктивністю. Виправлення заготовки від кривизни відбувається у тягнуче-правильній машині при одноточковому або багатоточковому вигині. Криволінійні (S-подібні) машини відрізняються змінним радіусом кривизни по довжині зони твердіння. Завдяки цьому процес виправлення заготовки розподіляється на більшу відстань і здійснюється при нижчій температурі, що дозволяє виливати метал з підвищеними вимогами до структури. Горизонтальні МБЛЗ, у яких кристалізатор і весь тракт орієнтовані

горизонтально, не потребують виправлення заготовки і широко застосовуються для виливання кольорових металів та трубних заготовок зі спеціальних сталей [4].

Сталерозливний ківш є першою ланкою технологічного тракту МБЛЗ. Місткість сучасних ковшів коливається в широких межах - від 30-50 т для малотоннажних машин до 200-350 т для великих промислових агрегатів. Ківш встановлюється на поворотний стенд, який дозволяє оперативно перемикатися між черговим і наступним ковшем, забезпечуючи безперервність подачі металу. Витрата металу з ковша регулюється стопорним або шиберним затвором. Для захисту металу від окиснення і тепловтрат застосовуються синтетичні теплоізолюючі суміші, що засипаються на дзеркало металу у ковші, а перелив металу з ковша у промківш захищається занурювальною трубою або захисним патроном.

Промківш виконує функцію буферної ємності між сталерозливним ковшем і кристалізаторами. Основні функції промківша [4, 1]: забезпечення безперервної подачі металу у кристалізатор під час заміни ковшів; усереднення температури і хімічного складу рідкої сталі; флотація і виведення неметалевих включень у покривний шлак; оперативне регулювання витрати металу на кожний струмінь. Місткість промківша для сортових МБЛЗ становить, як правило, від 15 до 40 т залежно від кількості струменів і продуктивності машини. Для підтримання постійної температури металу в промківші застосовуються системи плазмового або індукційного підігрівання. Управління витратою металу на ділянці «промківш - кристалізатор» здійснюється системою «стопор-моноблок - стакан-дозатор - занурювальний стакан», що забезпечує захист струменя від вторинного окиснення і рівномірний розподіл металу між кристалізаторами [1].

Кристалізатор є ключовим конструктивним вузлом МБЛЗ, у якому відбувається первинне тверднення заготовки [4]. Конструктивно кристалізатор являє собою водоохолоджувану металеву форму з робочою поверхнею із мідних сплавів з добавками хрому, цирконію або срібла. Мідь і її сплави обрані як

матеріал кристалізатора завдяки поєднанню двох ключових властивостей - високої теплопровідності, що забезпечує ефективне відведення тепла від рідкого металу, і достатньої міцності при робочих температурах. Для підвищення зносостійкості та збільшення ресурсу робоча поверхня кристалізатора покривається хромом та/або нікелем методом гальванічного осадження. Товщина покриття зазвичай становить 0,08-0,15 мм. Охолодження кристалізатора здійснюється водою, яка циркулює у каналах або зазорах між робочою гільзою і зовнішнім корпусом.

Важливою конструктивною особливістю сучасних кристалізаторів є змінна конусність робочої поверхні по висоті. При кристалізації металу у кристалізаторі тверда оболонка заготовки стискається через термічну усадку і відходить від стінок. Якщо геометрія кристалізатора не враховує цього стискання, у проміжку між оболонкою і стінкою утворюється повітряний зазор, що різко знижує інтенсивність теплопередачі і може призвести до проривів металу. Кристалізатори зі змінною конусністю вирішують цю проблему: у верхній частині, де оболонка ще тонка, поперечний переріз кристалізатора відповідає розміру відлитої заготовки, а нижче поступово розширюється, компенсуючи усадку. Застосування кристалізаторів зі змінною конусністю дозволяє поліпшити якість поверхні заготовки та підвищити швидкість розливання [1].

Для запобігання налипанню кристалізувального металу до стінок кристалізатор здійснює зворотно-поступальне хитання - осциляцію. Під час руху кристалізатора вниз (в напрямку витягування заготовки) між оболонкою і стінкою утворюється короткочасний гідродинамічний тиск від рідкого металу, що додатково відокремлює оболонку від стінки. Під час зворотного ходу (вгору) стінка ковзає вздовж оболонки, запобігаючи злипанню. Частота осциляції кристалізатора у сучасних машинах регулюється в діапазоні 60-400 $хв^{-1}$, а амплітуда складає 3-8 мм. Для зменшення тертя між оболонкою і стінкою у простір між ними подається шлакоутворююча суміш (порошок або гранули), яка при контакті з рідким металом плавиться і утворює рідку мастильну плівку.

Вибір матеріалу для виготовлення кристалізатора є компромісом між теплопровідністю, міцністю і зносостійкістю. Чиста мідь має найвищу теплопровідність (близько 400 Вт/(м·К)), але низьку твердість і швидко зношується при контакті з твердіючою оболонкою заготовки. Тому на практиці застосовують мідно-хромові або мідно-хромово-цирконієві сплави, у яких теплопровідність дещо нижча (330-370 Вт/(м·К)), але твердість і жаростійкість суттєво вищі. Робоча поверхня кристалізатора зазнає значних теплових навантажень: теплові потоки у зоні початку твердіння можуть перевищувати 1,5-2,0 МВт/м². Для подовження ресурсу кристалізатора його робоча поверхня покривається хромом або нікелем, а у деяких конструкціях - комбінованим покриттям нікель-хром. Після відпрацювання ресурсу кристалізатор відновлюється шляхом зняття зношеного покриття і повторного хромування.

Зона вторинного охолодження (ЗВО) є найдовшою ділянкою МБЛЗ, у якій відбувається поступове завершення твердіння заготовки [4]. Конструктивно ЗВО складається з кількох послідовних секцій, що відрізняються щільністю розташування опорних роликів і інтенсивністю охолодження. Перша секція розташована безпосередньо під кристалізатором; тут опорні ролики розташовані найщільніше, а охолодження найінтенсивніше - ця ділянка сприймає максимальний феростатичний тиск рідкого ядра. У наступних секціях ролики встановлені рідше, а щільність форсункового охолодження знижується в міру зменшення рідкої серцевини заготовки. Охолодження у ЗВО здійснюється форсунками водяного (повного конуса або плоскоструменевими) або водоповітряного розпилення. Водоповітряне охолодження забезпечує дрібніший розмір крапель і вищу рівномірність охолодження по периметру заготовки, що особливо важливо для сортових перерізів. Нерівномірне охолодження у ЗВО є головним чинником виникнення поздовжніх тріщин, осьової ліквації та пористості [1].

Зона вторинного охолодження на сучасних МБЛЗ розбита на кілька функціонально відмінних секцій. Перша секція (безпосередньо під кристалізатором, «нульова секція») характеризується мінімальним кроком

роликів і максимальною щільністю водяних форсунок. Тут ферростатичний тиск рідкого ядра є найбільшим, а тверда оболонка заготовки ще відносно тонка. Надмірне охолодження на цій ділянці може призвести до поперечних тріщин на поверхні заготовки через термічні напруження. Наступні секції забезпечують поступово знижуване охолодження по мірі того, як оболонка товщає і ферростатичний тиск знижується. Остання секція ЗВО (секція кінцевого тверднення) завершує процес кристалізації і забезпечує плавне вирівнювання температурного профілю поперечного перерізу заготовки. Загальна металургійна довжина МБЛЗ (відстань від дзеркала металу у кристалізаторі до точки повного твердіння) для сортових заготовок перерізом $150 \cdot 150$ мм при швидкості розливання 2,0 м/хв становить 6-8 м.

Роликовий апарат МБЛЗ виконує функцію підтримання заготовки проти дії ферростатичного тиску рідкого ядра і запобігання вибухлості поверхні заготовки між роликами. Ролики виготовляються зі зносостійких легованих сталей і в умовах роботи зазнають одночасно теплового і механічного навантаження. Кожен ролик внутрішньо охолоджується водою. Крок роликів у першій секції ЗВО становить 100-150 мм, а у наступних секціях збільшується до 200-350 мм. Підшипникові вузли роликів ущільнені від потрапляння охолоджуючої води і металевої окалини. Знос роликів і подушок підшипників є одним із основних джерел відмов у роботі МБЛЗ; заміна зношеного роликового апарата - обов'язкова складова планово-попереджувального обслуговування машини.

Тягнуче-правильна машина (ТПА) здійснює дві ключові функції [4]: по-перше, витягування заготовки з кристалізатора з постійно контрольованою швидкістю; по-друге, виправлення заготовки від кривизни, набутої при русі по радіусному або криволінійному тракту МБЛЗ. ТПА складається з кількох пар клітинних роликів з приводними двигунами. У сучасних МБЛЗ кожна пара роликів обладнана індивідуальним приводом з регулюванням швидкості, що дозволяє реалізовувати технологію «м'якого» обтиснення заготовки з рідкою серцевиною. Виправлення заготовки при криволінійній схемі МБЛЗ

відбувається у кілька точок: кожна пара роликів вносить невелику частку загальної деформації правки, що запобігає виникненню концентрованих напружень у ще не повністю затверділому металі.

Поділ безперервної заготовки на мірні довжини здійснюється двома основними методами: газокисневим різанням або гідравлічними ножицями [4]. Газокисневе різання застосовується переважно для заготовок великих перерізів (блюмів, слябів), де ножиці потребували б надмірно потужного приводу. Різак переміщується разом із заготовкою під час різання, а після відокремлення шматка повертається у вихідне положення. Гідравлічні ножиці конструктивно простіші і забезпечують ширший фронт різання; вони широко застосовуються для сортових заготовок перерізом до 200 · 200 мм. Після поділу мірні заготовки надходять на транспортні рольганги і охолоджувальні стелажі, де відбувається їхнє повне охолодження до температури, прийнятної для маркування, складування або передачі на подальший переділ.

Технологія поділу безперервної заготовки на мірні довжини безпосередньо впливає на якість торцевих поверхонь і оперативність виробничого процесу. Газокисневе різання є традиційним способом: різак переміщується синхронно з рухомою заготовкою протягом всього часу різання, а після відокремлення повертається у вихідне положення. Температура металу при різанні складає 800-900°С, що суттєво полегшує процес. Гідравлічні ножиці забезпечують вищу продуктивність при менших витратах і не потребують горючих газів, але обмежені по перерізу і масі заготовки. Ширина зони «ливарного шва» при газовому різанні становить 3-5 мм - металева стружка, що утворюється при різанні, потрапляє у систему збирання відходів.

Захист рідкого металу від контакту з атмосферним повітрям є одним з найважливіших завдань при безперервному розливанні. Окиснення металу на контакті з повітрям призводить до утворення оксидних неметалевих включень, які погіршують якість і механічні властивості прокату. Комплексна система захисту від вторинного окиснення включає кілька елементів [1]: захисну трубу між сталерозливним ковшем і промківшем, занурювальний стакан між

промківшем і кристалізатором, продувку аргоном через стопор-моноблок для очищення металу від включень і запобігання засміченню стакана-дозатора, шлакоутворюючий покрив на поверхні металу у промківші і кристалізаторі. Ступінь захисту металу від вторинного окиснення безпосередньо визначає загальний рівень забрудненості заготовки включеннями і є критичним параметром при виробництві спеціальних та якісних сталей.

Електромагнітне перемішування (EMS) є ефективним методом поліпшення структури безперервнолитої заготовки. За розташуванням в машині розрізняють три типи EMS [1]: перемішування у кристалізаторі (M-EMS), у зоні вторинного охолодження (S-EMS) і у зоні кінцевого тверднення (F-EMS). M-EMS спрямоване на виведення газових бульбашок і неметалевих включень на поверхню рідкого металу у кристалізаторі, рівномірний розподіл температури рідкої ванни і сприяє більш рівномірному початковому тверднення оболонки. S-EMS і F-EMS застосовуються для формування рівноосної кристалічної структури у центральних зонах заготовки, зменшення центральної ліквації і пористості. Найбільший ефект від EMS досягається при виробництві блюмів і круглих заготовок великого перерізу, де природна конвекція недостатня для забезпечення однорідності кристалізації.

Технологія «м'якого» обтиснення заготовки з рідкою серцевиною (soft reduction) є одним із найефективніших засобів боротьби з осьовою пористістю і осьовою ліквацією у безперервнолитих заготовках [1]. Принцип методу полягає у тому, що у тій ділянці МБЛЗ, де центральна частина заготовки ще перебуває у рідко-твердому стані, ролики тягнуче-правильної машини або спеціальних секцій ЗВО здійснюють невелике (2-6 мм за товщиною) обтиснення заготовки. Це обтиснення компенсує усадку металу при фінальному твердненні серцевини, запобігаючи розкриттю осьових пор і відтоку збагаченого домішками розплаву у осьову зону. Результатом застосування технології «м'якого» обтиснення є зменшення степеня осьової ліквації і підвищення щільності центральних зон

заготовки, що є критичним при виробництві трубних заготовок і заготовок для виробів відповідального призначення.

Якість безперервнолитої заготовки визначається рядом структурних і поверхневих показників. До основних дефектів безперервнолитої заготовки відносять [1]: осьову пористість і осьову ліквацію - нерівномірний розподіл домішок і пори у центральних зонах заготовки, зумовлені умовами кристалізації; підповерхневі тріщини і раковини - поверхневі дефекти, зазвичай пов'язані з нерівномірним охолодженням у кристалізаторі або неоптимальним режимом осциляції; поперечні тріщини - виникають при виправленні заготовки в умовах підвищеного опору деформації; кутові тріщини - характерні для прямокутних перерізів і пов'язані з концентрацією напружень у кутових зонах при охолодженні. Для запобігання зазначеним дефектам необхідне чітке регулювання швидкості розливання, температури металу у промківші, режимів первинного та вторинного охолодження [1].

За видом продукції розрізняють заготівельні (сортові), блюмові, слябові та стрічкові МБЛЗ. Заготівельні машини відливають перерізи квадратної або круглої форми розміром менше $200 \cdot 200$ мм і, як правило, є багатоструменевими (4-8 струменів). Блюмові машини відливають перерізи від $200 \cdot 200$ до $450 \cdot 450$ мм і слугують вихідним матеріалом для середньо- і великосортного прокату, а також для виробництва труб. Слябові машини відливають плоскі заготовки шириною від 600 до 2600 мм і товщиною 150-350 мм для виробництва гарячекатаного листа. Круглі заготовки (ø 100-700 мм) відливаються на спеціалізованих МБЛЗ і використовуються у першу чергу для виробництва безшовних труб.

Сучасні промислові МБЛЗ для сортової заготовки є багатоструменевими машинами. Збільшення кількості струменів до 6-8 дозволяє підтримувати баланс між продуктивністю одного сталеплавильного агрегату і масою разових плавок, а також підвищує завантаженість кожного окремого струменя [1]. Річна продуктивність одного струменя блюмової МБЛЗ має становити щонайменше 200 тис. т, що визначає мінімальну кількість струменів для узгодження зі

сталеплавильним агрегатом заданої продуктивності. Висока якість безперервнолитої заготовки досягається впровадженням агрегатів позапічної обробки (агрегати «ківш-піч», вакуумматори), захисту металу від вторинного окиснення та електромагнітного перемішування у кристалізаторі [1].

Позапічна обробка сталі є невід'ємною умовою застосування МБЛЗ. До числа необхідних операцій позапічної обробки перед безперервним розливанням відносять [1]: доведення хімічного складу і температури сталі на установках «ківш-піч»; видалення сірки і неметалевих включень шляхом обробки синтетичним шлаком; вакуумне дегазування для видалення водню і зниження вмісту кисню при виробництві відповідальних марок сталі; мікролегування і коригування складу плавки. Недостатня підготовка металу перед розливанням призводить до нестабільного ходу процесу і зниження якості заготовок. Агрегати «ківш-піч» і вакуумні установки таким чином є не лише допоміжним, але і технологічно обов'язковим обладнанням при МБЛЗ [1].

Сучасні промислові МБЛЗ оснащені комплексними системами автоматизованого управління. Датчики рівня металу у промківші та кристалізаторі, витратоміри та термопари безперервно передають дані на програмований контролер, який регулює швидкість витягування заготовки, режим осциляції кристалізатора та витрату охолоджуючої води у ЗВО. Система автоматичного управління підтримує температуру металу у промківші у вузькому діапазоні «±5°С» від оптимальної, що є критичним для забезпечення стабільних умов кристалізації. Автоматизований контроль дозволяє мінімізувати ймовірність прориву металу - найбільш небезпечного і дорогого відмов у виробництві. Прорив металу виникає при надмірно тонкій твердій оболонці, що не витримує феростатичного тиску рідкого ядра, і призводить до виходу рідкого металу за межі машини, пошкодження обладнання і вимушеного простою.

Автоматизована система управління сучасної МБЛЗ включає кілька взаємопов'язаних контурів регулювання. Контур регулювання рівня металу у кристалізаторі підтримує постійний рівень за сигналами вихрострумового або

радіоактивного датчика шляхом зміни положення стопора промківша. Відхилення рівня металу від заданого більш ніж на ±2 мм сигналізує про нештатний режим і може призвести до зупинки машини. Контур регулювання швидкості розливання координує витягування заготовки з тепловим станом зони тверднення, враховуючи температуру металу у промківші і марку сталі. Система прогнозування прориву металу аналізує інформацію від термопар, розміщених у стінках кристалізатора, і при виявленні ознак можливого прориву автоматично знижує швидкість розливання.

Незважаючи на домінуюче місце у світовій металургії, МБЛЗ має ряд обмежень. Для трубної заготовки малого діаметра (100-150 мм) характерна підвищена осьова рихлість і ліквація, зумовлені несприятливими умовами кристалізації у центральній зоні малого перерізу. Цей дефект ускладнює наступну прошивку заготовки при трубопрокатному переділі і знижує якість труби. Узгодження роботи системи «сортова МБЛЗ - дрібносортний стан» є технологічно складнішим завданням порівняно з великосортними агрегатами: необхідне точне узгодження ритму плавок, температурних режимів і транспортних схем [1]. Крім того, МБЛЗ є капіталомісткою установкою з тривалим процесом підготовки до початку розливання кожної плавки. Саме ці обмеження є одним із стимулів для розробки альтернативних технологій, зокрема суміщеного лиття і прокатки.

1.2 Застосування модуля ливарно-прокатної кліті як альтернатива МБЛЗ

Поєднання процесів безперервного лиття і прокатки є одним із найперспективніших напрямків розвитку технологій переділу «сталь - прокат». Реалізація такого поєднання дозволяє скоротити кількість переділів, використати теплову енергію безперервнолитої заготовки на виході з МБЛЗ та суттєво знизити питомі енерговитрати [1]. Відомо три основних підходи до організації суміщеного виробничого ланцюга [1]: технологія «гарячого посаду», при якій гаряча заготовка після МБЛЗ без суттєвого охолодження

завантажується у нагрівальну піч і прокочується при температурах, близьких до оптимальних; технологія прямої прокатки, при якій заготовка з МБЛЗ відразу, без нагрівання, подається у прокатний стан; та суміщені процеси, де кристалізація і деформація металу відбуваються в одному агрегаті.

Принципова ідея процесу валкової розливки-прокатки (ВРП), при якому розплав подається безпосередньо у зазор між охолоджуваними обертовими валками, де одночасно відбуваються кристалізація і деформація, вперше запатентована Г. Бессемером у 1857 р. Пізніше, у 1865 р., ним отримано окремий патент на двовалкове лиття сталі [5]. Однак впровадження технології зайняло понад 100 років через складнощі управління потоком рідкого металу між валками, проблеми з вогнетривкими матеріалами зони контакту, недостатню якість поверхні відлитої смуги і контролю бічних крайок [5]. Перше промислове освоєння ВРП для алюмінієвих сплавів відбулося у 1950-х роках, а для сталі - значно пізніше.

Нині ВРП комерційно застосовується для виробництва тонких штаб і смуг завтовшки від 1 до 6 мм із різних марок сталей та алюмінієвих сплавів. Процес забезпечує суттєво нижче енергоспоживання і менший рівень викидів CO_2 порівняно з традиційним ланцюгом МБЛЗ - нагрівальна піч - прокатний стан [5]. За оцінками дослідників, скорочення питомих енерговитрат складає від 25 до 40 % залежно від марки сталі і сортаменту продукції [5]. Технологія CASTRIP (США), розроблена компаніями Nucor, BHP і IHI, стала прикладом першого у світі комерційно успішного виробництва тонкої сталевої смуги безпосередньо з розплаву [6].

Разом з тим, традиційна МБЛЗ залишається процесом першого вибору для виробництва листа найвищої якості [6]. ВРП і МБЛЗ, таким чином, не конкурують, а взаємодоповнюються у різних нішах металургійного виробництва: МБЛЗ орієнтована на широкий сортамент і максимальну якість поверхні та структури, тоді як ВРП знаходить застосування у компактних «міні заводах» з вузьким сортаментом і акцентом на економічність виробництва. Обмеженням ВРП є складнощі досягнення стандартних вимог до поверхні та

механічних властивостей для широкого спектру марок сталі, що стримує її застосування у виробництві автомобільного листа та інших відповідальних виробів.

Модуль ливарно-прокатної кліті (ЛПК) є основним функціональним вузлом установки ВРП, де безпосередньо здійснюється перетворення рідкого металу на катану заготовку. Принципова відмінність ЛПК від класичних прокатних клітей полягає у тому, що валки-кристалізатори одночасно виконують дві функції: відведення тепла від металу, що кристалізується, і формоутворення заготовки під дією сил деформації [7, 8]. Тепловідведення у ЛПК відбувається інтенсивніше, ніж у нерухомому кристалізаторі МБЛЗ, оскільки валки безперервно відновлюють охолоджену поверхню за рахунок обертання. Це дозволяє досягати вищих швидкостей розливання порівняно зі звичайними МБЛЗ при однаковому розмірі перерізу заготовки.

Усі відомі у світовій практиці установки ВРП для листа і штаби використовують два валки-кристалізатори [7]. Принципово новим напрямком є розроблення тривалкових ЛПК для виробництва масивних круглих або квадратних заготовок, аналогів яким у практиці ВРП не існує [7, 8]. Двовалковий контур, ефективний для листової продукції, не в змозі утворити замкнений деформуючий контур для формування масивного тіла заготовки - метал при заповненні зазору між двома валками не утримується по периметру перерізу і не отримує рівномірної деформації. Тривалковий контур, навпаки, утворює замкнений простір між трьома валками-кристалізаторами, де метал обробляється по всьому периметру заготовки одночасно. Це відкриває можливість суттєво покращити якість трубної заготовки малого діаметра завдяки деформуванню металу в процесі кристалізації.

1.3 Характеристика модуля ЛПК для круглої заготовки

На базі Запорізького національного університету розроблено принципово новий пристрій для валкової розливки-прокатки суцільних і порожнистих заготовок [7, 8]. На відміну від двовалкових установок ВРП, де виготовляються

виключно листові та штабові вироби, у пристрої ЛПК задіяно три водоохолоджуваних валки-кристалізатори. Конструктивно вони розташовані у горизонтальній площині під кутом 120° один до одного, що утворює замкнутий тривалковий деформуючий контур. Рідкий метал подається зверху у простір між трьома валками, кристалізується при одночасному деформуванні і виходить знизу у вигляді круглої заготовки [7].

Замкнутий тривалковий контур охоплює метал по всьому периметру поперечного перерізу заготовки [8]. Завдяки рівномірному тепловому полю по периметру і рівномірній деформації на усій поверхні заготовки формується однорідна структура з рівноосною кристалізацією. Рівноосна кристалізація виключає виникнення переважно орієнтованої дендритної структури, характерної для МБЛЗ, і суттєво підвищує однорідність механічних властивостей металу по перерізу. Для заготовок, призначених для трубопрокатного переділу, це є особливо важливим, оскільки рівноосна структура зменшує схильність до утворення тріщин при прошивці.

Привід валків-кристалізаторів є груповим від одного асинхронного електродвигуна змінного струму потужністю 5,5 кВт; кінематичний зв’язок між трьома валками через редуктор і конічні шестерні забезпечує їхню синхронну роботу [8]. Синхронізація обертання є принципово важливою для симетричного тривалкового процесу: будь-яке відхилення від синхронності призводить до асиметрії деформуючого контуру і, відповідно, до відхилення форми поперечного перерізу заготовки від кола. Система групового приводу забезпечує жорсткий кінематичний зв'язок між усіма трьома валками при конструктивній простоті та відносно низькій вартості обладнання. Регулювання швидкості обертання валків у широкому діапазоні реалізується за допомогою частотного перетворювача, що дозволяє оперативно змінювати швидкість розливання залежно від марки металу і необхідного діаметра заготовки.

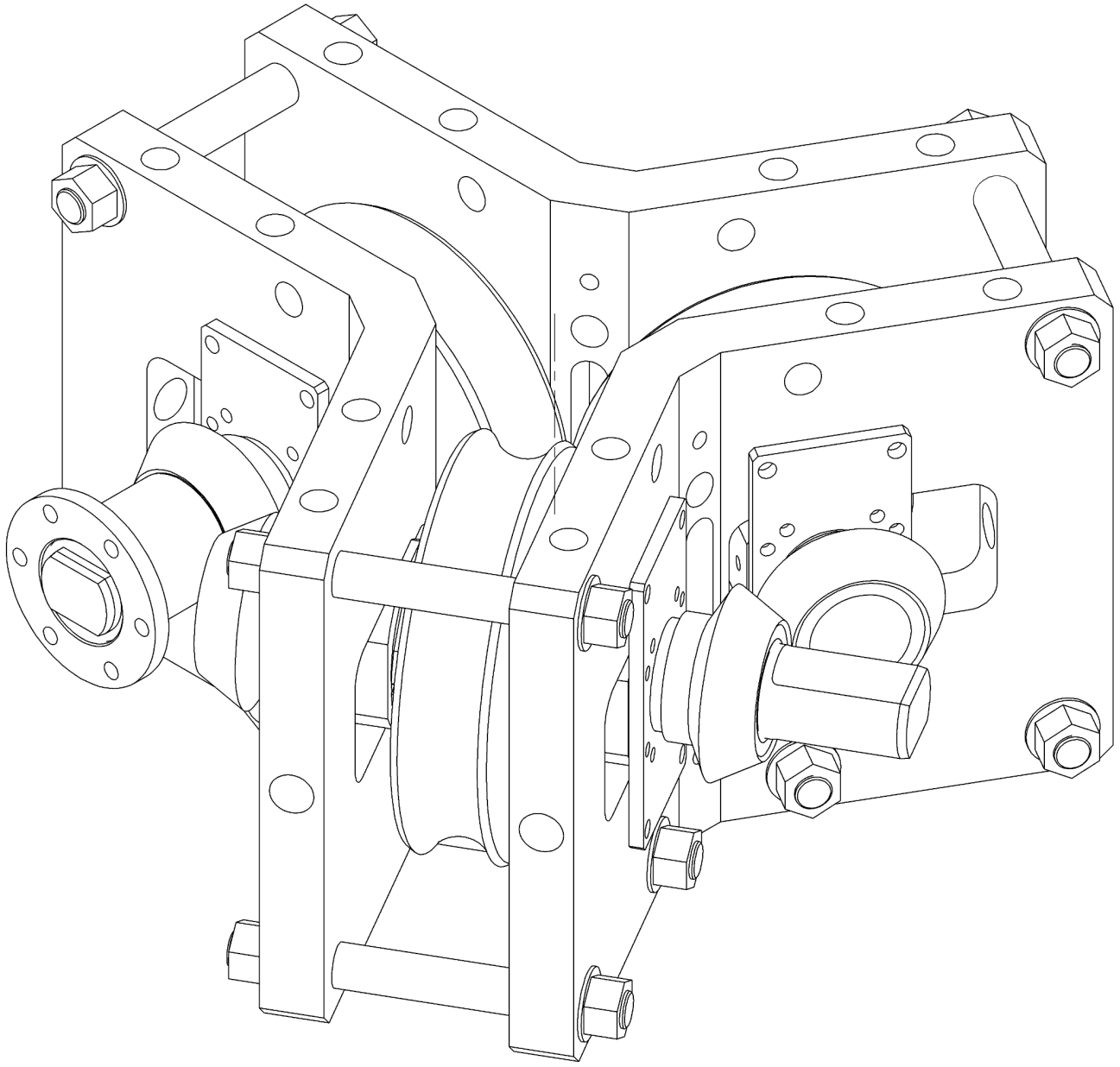


Рисунок 1.2 - Ливарно-прокатна кліть

Бандажі валків-кристалізаторів виготовляються з інструментальної сталі з внутрішнім водяним охолодженням [8]. Мідні сплави забезпечують вищий коефіцієнт теплопровідності, що сприяє інтенсивному тепловідведенню від металу, який кристалізується. Внутрішня порожнина бандажа омивається охолоджуючою водою у замкненому контурі. Опори валків-кристалізаторів виконані на підшипниках ковзання, що дозволяє мінімізувати радіальний розмір вузла і знизити металомісткість конструкції. Регулювання положення валків передбачене у двох напрямках: осьовому (діапазон 0-5 мм) і радіальному

(діапазон до 50 мм). Розширений діапазон радіального регулювання необхідний для зміни міжвалкового зазору при переналадці на інший діаметр заготовки.

Основні проектні технічні параметри установки ЛПК [8]: діаметри валків-кристалізаторів 180-250 мм; потужність електродвигуна 5,5 кВт; передавальне число редуктора 40; планований розмірний ряд діаметрів відлитої заготовки 20-80 мм; маса установки в зборі до 1000 кг.

Технологічне оснащення ЛПК включає вхідну і вивідну привалкову арматуру, а також змінні бандажі для кожного типорозміру заготовки. Бандажі розроблені для технологічного ряду діаметрів від 20 до 60 мм у першому етапі і до 80 мм у перспективі [8]. Загальна ідеологія конструкції оснащення ЛПК орієнтована на принцип максимальної технологічності - простота конструкції, мінімальна кількість деталей і з'єднань, зручність обслуговування. Цей принцип особливо важливий при освоєнні принципово нового технологічного процесу, коли неминуче виникають непередбачені технологічні ситуації, що потребують оперативного втручання.

Слід підкреслити наукову новизну і практичне значення розробленого пристрою ЛПК. Усі суттєві досягнення у сфері ВРП протягом останніх 60 років стосувалися виключно виробництва тонкого листа і штаб [7]. Отримання масивних круглих заготовок методом ВРП є принципово новим технічним завданням, для вирішення якого недостатньо простого масштабування відомих рішень. Необхідна розробка нової конструктивної схеми (тривалковий контур), нових методів розрахунку енергосилових параметрів (оскільки класичні методи теорії прокатки не враховують специфіки тривалкового контуру при наявності рідкого ядра), нових підходів до організації охолодження і технологічного оснащення. Таким чином, розроблення ЛПК є завданням, що поєднує дослідницький і конструкторський компоненти.

1.4 Технологія ЛПК та завдання до проектування розрахункової частини

Технологічний процес у ЛПК охоплює три основні стадії: підготовку і розплавлення шихти у плавильному агрегаті, подачу рідкого металу у тривалковий деформуючий контур та безпосереднє суміщення кристалізації і деформації у цьому контурі [8]. Рідкий метал подається зверху у міжвалковий зазор і по мірі просування вниз кристалізується під одночасним деформаційним впливом трьох валків-кристалізаторів. Виведення заготовки з кліті відбувається безперервно у напрямку, паралельному осям обертання валків. Швидкість виходу заготовки визначається частотою обертання валків і геометрією деформуючого контуру.

Для забезпечення необхідної кількості дослідних плавок за робочу зміну передбачено двостадійний режим плавлення: попередній нагрів металу у підігрівальній печі і остаточна плавка у плавильній печі [8]. Підігрівальна піч, у якій метал доводиться до розплавленого або частково розплавленого стану, дозволяє скоротити час, необхідний для остаточної плавки. Це забезпечує можливість виконати кілька дослідних плавок протягом одного робочого дня, що є критичним для ефективного проведення науково-дослідних і пусконалагоджувальних робіт. У випадку вимушеної зупинки процесу розливання на будь-якій стадії рідкий метал може бути витриманий у підігрівальній печі до усунення причин зупинки.

Оскільки процес є принципово новим і не має аналогів у відомій світовій практиці ВРП [7, 8], технологічний регламент формується паралельно з проектуванням конструкції установки на основі теоретичного аналізу і даних первинних дослідних плавок. Ключовими технологічними параметрами, що підлягають визначенню і оптимізації в ході досліджень, є: температура металу при заливанні; швидкість обертання валків-кристалізаторів; зусилля і момент прокатки; ступінь обтиснення заготовки у деформуючому контурі; температурний режим охолодження валків і металу. Взаємний зв'язок між цими параметрами є предметом окремого теоретичного дослідження.

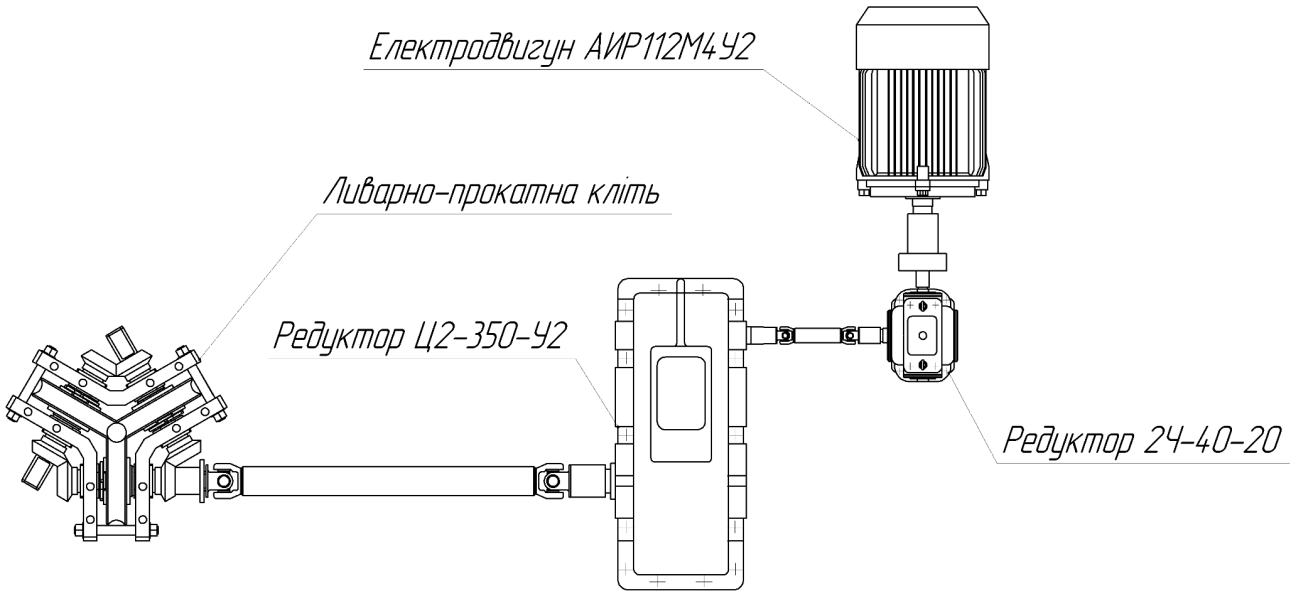


Рисунок 1.3 - Схема установки ВРП

Завданнями розрахункової частини дипломної роботи є: Підбір матеріалу-імітатора для виконання фізичного моделювання, розрахунок основних енергосилових параметрів процесу - сили та моменту прокатки, вибір і розрахунок елементів привода ЛПК на основі вже наявних: електродвигуна АИР112М4У2 потужністю 5,5 кВт та циліндричного редуктора Ц2-350-У2 з u = 40.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування вибору матеріалу-імітатора

Фізичне моделювання є ефективним інструментом дослідження процесів обробки металів тиском, що дозволяє відтворити кінематику, напружений стан та характер течії металу в умовах лабораторного стенду. Для коректної реалізації такого моделювання матеріал-замінник (імітатор) повинен задовольняти таким інженерним критеріям подібності:

1) опір деформуванню при кімнатній температурі за абсолютним значенням має відповідати опору гарячої прокатки конструкційних сталей;

2) деформаційне зміцнення у робочому діапазоні деформацій має бути мінімальним або відсутнім;

3) матеріал повинен мати достатню пластичність, що виключає утворення тріщин при прокатці;

4) технологічна доступність та можливість виготовлення зразків заданої геометрії (кругла заготовка діаметром 50,8 мм).

При гарячій прокатці середньовуглецевих сталей (наприклад, Сталь 35 за ДСТУ 7809) у діапазоні температур 1100 – 1200 °C середній опір деформуванню становить $\sigma_s \approx 30–60$ МПа [9]. Алюміній технічної чистоти у відпаленому стані при кімнатній температурі характеризується $\sigma_{0,2} \approx 35–45$ МПа, що забезпечує необхідну механічну подібність.

Обрана марка: АД1 у відпаленому стані (ДСТУ 4722, аналог AA 1100-O). Хімічний склад: Al ≥ 99,30 %, Fe ≤ 0,60 %, Si ≤ 0,30 %. Стан: М – відпалений. Механічні властивості: $\sigma_{0,2} = 35–40$ МПа; $\sigma_В = 75–105$ МПА; $\delta \geq 25$ % [10].

Коефіцієнт подібності за напруженням:

$$k_\sigma = \sigma_{s(Al)} / \sigma_{s(Ст)} = 40 / 45 \approx 0,88 \qquad (2.1)$$

Значення $k_\sigma \approx 0{,}88$ є прийнятним для фізичного моделювання. Матеріал задовольняє всім критеріям подібності та рекомендується для подальших розрахунків і фізичного експерименту.

2.2 Розрахунок зусиль у тривалковому калібрі

У тривалковій прокатній кліті три валки, розташовані рівномірно під кутом 120° один до одного, утворюють замкнений круглий калібр. Кожний валок охоплює рівно 120° поперечного перерізу заготовки. Внаслідок симетрії конструкції зусилля на кожен валок є однаковим [8].

Повне зусилля прокатки в тривалковій кліті:

$$P = n \cdot P_1 \quad (2.2)$$

де:

n – кількість валків ($n = 3$);

P_1 – зусилля прокатки на один валок, Н.

Зусилля прокатки на один валок визначається за методом питомих тисків [11]:

$$P_1 = p_{\text{сер}} \cdot F_{\text{к}} \quad (2.3)$$

де:

$p_{\text{сер}}$ – середній питомий тиск металу на валок, МПа;

$F_{\text{к}}$ – площа проекції вогнища контакту (один валок), мм².

Площа проекції осередку контакту [11]:

$$F_{\text{к}} = l_{\text{д}} \cdot b \quad (2.4)$$

де:

$l_д$ – довжина дуги контакту (проекція на площину прокатки), мм;

b – ширина п’ятна контакту валка з заготовкою , мм.

Довжина дуги контакту у розрахунково-пояснювальній частині уточнюється за даними тривимірної геометричної моделі, побудованої в CAD-середовищі SolidWorks. Аналітична оцінка довжини дуги за спрощеною формулою:

$$l_д = \sqrt{(R \cdot \Delta h)} \tag{2.5}$$

де:

R – радіус валка по шийці, мм;

Δh – обтискання по радіусу заготовки від одного валка, мм.

У трьохвалковому калібрі кожен валок формує третину периметра (сектор 120°). Ширина п`ятна контакту розраховується як хорда цього сектора для кінцевого діаметра:

$$b = d_1 \cdot sin(60°) = 50 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 43,33 \text{ мм} \tag{2.6}$$

Середній питомий тиск прокатки через коефіцієнт напруженого стану [11]:

$$p_{сер} = \sigma_s \cdot n_\sigma \tag{2.7}$$

де:

σ_s – межа плинності матеріалу заготовки, МПа;

n_σ – коефіцієнт напруженого стану.

Коефіцієнт напруженого стану для умов закритого калібру [11]:

$$n_{\sigma} = 1,15 \cdot \left(\frac{f \cdot l_{д}}{d_{ср}}\right) \quad (2.8)$$

де:

1,15 – коефіцієнт тривісного напруженого стану (критерій Мізеса);

f – коефіцієнт тертя Кулона на поверхні контакту валок–заготовка;

$l_{д}$ – довжина дуги захоплення;

$d_{ср}$ – середній діаметр заготовки.

2.3 Вихідні дані та параметри осередку деформації

Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку зусилля прокатки

Параметр	Познач.	Значення	Одиниці
Діаметр валків по шийці	D	200	мм
Початковий діаметр заготовки	d_0	50,8	мм
Кінцевий діаметр заготовки	d_1	50,0	мм
Кількість валків	n	3	шт.
Матеріал заготовки	–	АД1 (відп.)	–
Межа плинності АД1 (відп.)	σ_s	40	МПа
Коефіцієнт тертя (сталь–Al)	f	0,30	–
Довжина дуги контакту (SolidWorks)	$l_{д}$	8,98	мм
Ширина п’ятна контакту	b	43,33	мм

Визначення радіуса валка по шийці:

$$R = D / 2 = 200 / 2 = 100 \text{ мм} \quad (2.9)$$

Загальне обтискання по діаметру заготовки:

$$\Delta d = d_0 - d_1 = 50{,}8 - 50{,}0 = 0{,}8 \text{ мм} \quad (2.10)$$

Обтискання по радіусу від одного валка:

$$\Delta h = \Delta d / 2 = 0{,}8 / 2 = 0{,}4 \text{ мм} \quad (2.11)$$

Для правильного проходження процесу лиття-прокатки в кліть повинна поступати достатня для підтримки швидкості прокатки кількість розплавленого металу. Максимальна кількість металу, яку можна подати в кліть також регулюється кутом захоплення - кут між прямою лінією, що з'єднує центри валків, та радіусом валка, який проведено в точку першого контакту заготовки з валком.

Кут захоплення(a) повинен бути ≤ куту тертя(β) між металом та валком. Максимальний кут захоплення, при якому валки зможуть затягнути метал в кліть визначається за формулою:

$$a_{max} = \beta = arctan(f) = arctan(0,18) = 10,2° \quad (2.12)$$

де:

f - коефіцієнт тертя між сталлю та алюмінієм [12].

Аналітична оцінка довжини дуги контакту за формулою (2.5) дає $l_{д,ан} = \sqrt{(100 \cdot 0{,}4)} \approx 6{,}32$ мм. Проте фактична геометрія тривалкового закритого калібру суттєво відрізняється від схеми плоскої прокатки: одночасний контакт

трьох циліндричних валків із круглою заготовкою формує складну просторову криву контакту, яка замикається в кільце.

Для точного визначення довжини дуги контакту виконано вимірювання безпосередньо в CAD-середовищі SolidWorks на основі тривимірної параметричної моделі кліті, скріншот якої приведено на рисунку 2.1.

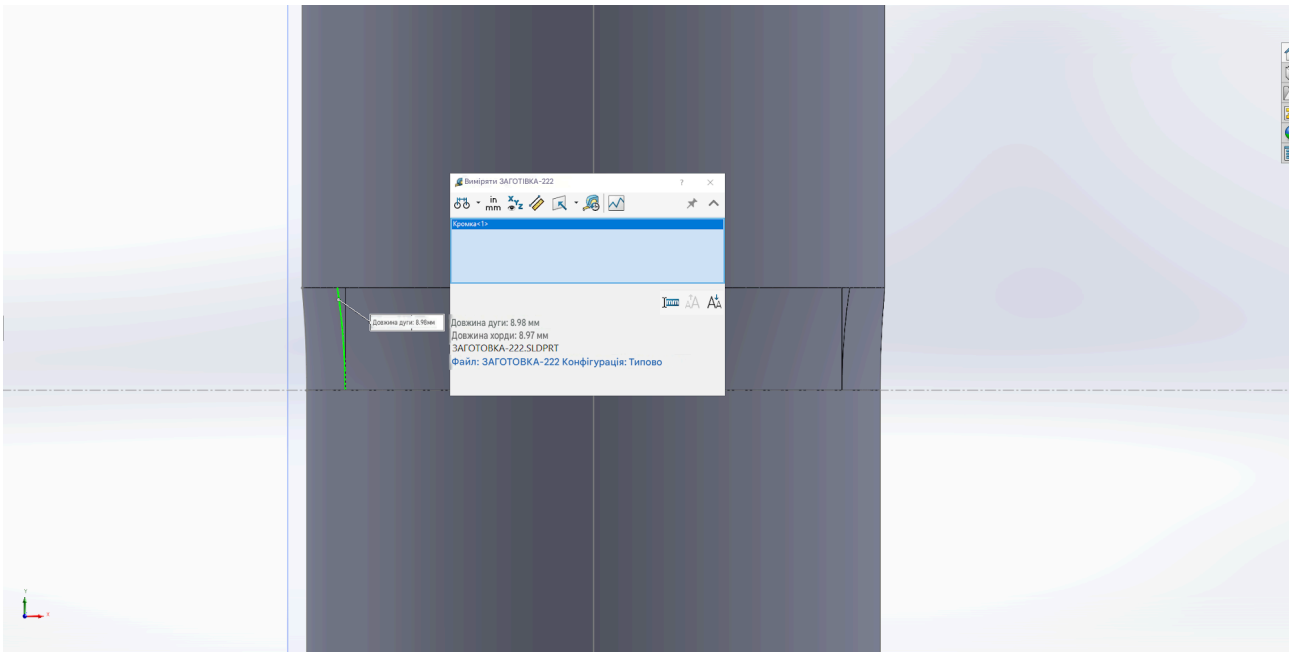


Рисунок 2.1 - вимірювання довжини дуги контакту в SolidWorks

Отримане значення через SolidWorks:

$$l_д = 8{,}98 \text{ мм} \tag{2.13}$$

Розходження між аналітичним (6,32 мм) та CAD-значенням (8,98 мм) пояснюється тим, що формула (2.5) не враховує поперечну кривизну поверхні валка та заготовки у закритому калібрі. Надалі для розрахунку використовується уточнене значення $l_д = 8{,}98$ мм.

Площа проекції осередку контакту (один валок) (за формулою 2.4):

$$F_к = l_д \cdot b = 8{,}98 \cdot 43{,}33 = 387{,}96 \text{ мм}^2 \tag{2.14}$$

Середній діаметр заготовки в осередку деформації:

$$d_{\text{сер}} = (d_0 + d_1) / 2 = (50{,}8 + 50{,}0) / 2 = 50{,}4 \text{ мм} \quad (2.15)$$

Відносне обтиснення:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} \cdot 100\% = \frac{0{,}8}{50{,}8} \cdot 100\% = 0{,}015748 \cdot 100\% \approx 1{,}57\% \quad (2.16)$$

Коефіцієнт витяжки:

$$\mu = (d_0 / d_1)^2 = (50{,}8 / 50{,}0)^2 = 1{,}032 \quad (2.17)$$

Перевірка умови захоплення ($f \geq \text{tg}\ \alpha$):

$$\text{tg}\ \alpha = 0{,}063 < f = 0{,}18 \quad (2.18)$$

Умова захоплення задовольняється із достатнім запасом.

2.4 Розрахунок середнього питомого тиску

Безрозмірний параметр жорсткості вогнища деформації (з уточненим значенням довжини дуги):

$$l_д / \Delta h = 8{,}98 / 0{,}4 = 22{,}4 \quad (2.19)$$

Значення $l_д$ / Δh = 22,4 $\gg$ 5 підтверджує режим «пласкої прокатки», при якому вплив зовнішнього тертя є визначальним. Застосування формули (2.8) для таких умов є методично обґрунтованим.

Коефіцієнт напруженого стану (за формулою 2.8):

$$n_{\sigma} = 1,15 \cdot (1 + \frac{0,3 \cdot 8,98}{50,4}) = 1,15 \cdot (1 + \frac{2,668}{50,4}) =$$
$$= 1,15 \cdot (1 + 1,0533) \approx 1,2113 \quad (2.20)$$

Середній питомий тиск (за формулою 2.7):

$$p_{сер} = \sigma_s \cdot n_{\sigma} = 40 \cdot 1,2113 = 48,45 \text{ МПа} \quad (2.21)$$

2.5 Визначення повного зусилля прокатки

Зусилля прокатки на один валок (за формулою 2.3):

$$P_1 = p_{сер} \cdot F_к = 48,45 \cdot 387,96 = 18796,66 \text{ Н} \approx 18,7 \text{ кН} \quad (2.22)$$

Повне зусилля прокатки (за формулою 2.2):

$$P = n \cdot P_1 = 3 \cdot 18796 = 56\,388 \text{ Н} \quad (2.23)$$

2.6 Визначення моменту прокатки

Момент прокатки на один валок:

$$M_{пр1} = P_1 \cdot \Psi \cdot l_д = 18796 \cdot 0,41 \cdot 0,00896 = 69,04 \text{ Нм} \quad (2.24)$$

де:

Ψ - коефіцієнт плеча сили при прокатці.

Момент тертя на один валок:

$$M_{\text{тр1}} = P_1 \cdot f \cdot \frac{d_{\text{ц}}}{2} = 18796 \cdot 0,12 \cdot \frac{0,06}{2} = 67,66 \text{ Нм} \quad (2.25)$$

де:

f -коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання.

Сумарний момент на один валок:

$$M_{\text{вал1}} = M_{\text{пр1}} + M_{\text{тр1}} = 69,04 + 67,66 = 136,7 \text{ Нм} \quad (2.26)$$

Момент прокатки на кліть:

$$M_{\text{кл}} = M_{\text{вал1}} \cdot 3 = 136,7 \cdot 3 = 410,1 \text{ Нм} \quad (2.27)$$

2.7 Кінематичний розрахунок привода

Гіпотетично прийнято, що для правильного проходження перехідних процесів: кристалізації та деформації заготовки у тривалковій кліті швидкість прокатки має дорівнювати u = 0,5 м/хв = 0,0083 м/с.

Питома частота обертання валків:

$$n_{\text{вал}} = \frac{u}{\pi \cdot D_{\text{вал}}} = \frac{0,5}{3,1416 \cdot 0,2125} = 0,749 \text{ об/хв} \quad (2.28)$$

де:

$D_{\text{вал}}$ - діаметр валка, м.

Необхідна частота обертання двигуна:

$$n_{\text{дв.необх}} = n_{\text{вал}} \cdot u_{\text{ц}} = 0,749 \cdot 40 = 29,96 \approx 30 \text{ об/хв} \quad (2.29)$$

Оскільки номінальна частота двигуна становить 1435 об/хв (при частоті струму 50 Гц, для зниження швидкості до 30 об/хв частотний перетворювач повинен зменшити частоту струму до:

$$f_{\text{роб}} = 50 \cdot \frac{30}{1435} = 1,1 \text{ Гц} \quad (2.30)$$

На асинхронному двигуні активний опір статора при напрузі нижче номінальної (380В) падає, що веде за собою зменшення магнітного потоку та, в свою чергу, зменшення максимального моменту. Через погіршення охолодження при частоті обертання 30 об/хв виникає ризик перегріву, так що допустимий момент падає ще більше [13].

Мінімальна частота струму для роботи двигуна АИР112М4У2 на номінальному моменті без ризику перегріву дорівнює 20 Гц. Виходячи з цього, мінімальна частота обертання двигуна дорівнює:

$$n_{\text{дв.мін}} = 1435 \cdot \frac{20}{50} = 574 \text{ об/хв} \quad (2.31)$$

Для забезпечення питомої швидкості обертання валків $n_{\text{вал}} = 0,749$ об/хв загальне необхідне передавальне число:

$$u_{\text{заг.н}} = \frac{n_{\text{дв.мін}}}{n_{\text{вал}}} = \frac{574}{0,749} = 766,36 \quad (2.32)$$

Оскільки циліндричний редуктор Ц2-350-У2 має передавальне число $u_{\text{ц}} = 40$, необхідне передавальне число черв’ячного редуктора становить:

$$u_{\text{ч}} = \frac{u_{\text{заг}}}{u_{\text{ц}}} = \frac{766,36}{40} = 19,6 \quad (2.33)$$

Згідно з ГОСТ 2144-76 (для черв'ячних передач), найближчим стандартним значенням із номінального ряду є $u_{ч} = 20$.

При $u_{ч} = 20$ загальне передавальне число дорівнює:

$$u_{заг} = 20 \cdot 40 = 800 \tag{2.34}$$

Фактична швидкість обертання валків:

$$n_{вал.ф} = \frac{574}{800} = 0,718 \text{ об/хв} \tag{2.35}$$

Відхилення швидкості обертання валків від питомої $n_{вал} = 0,749$ об/хв складає < 4%. Відхилення компенсується за допомогою зміни частоти струму.

Необхідна частота обертання двигуна для досягнення питомої швидкості обертання валків:

$$n_{дв.необх} = n_{вал} \cdot u_{заг} = 0,749 \cdot 800 = 599,2 \text{ об/хв} \tag{2.36}$$

Необхідна частота струму:

$$f_{необх} = 50 \text{ Гц} \cdot \frac{n_{дв.необх}}{n_{ном}} = 50 \cdot \frac{599,2}{1435} = 20,88 \text{ Гц} \tag{2.37}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{ном} = 9550 \cdot \frac{5,5}{1435} \approx 36,6 \text{ Нм} \tag{2.38}$$

Необхідний момент на вхідному валу черв’ячного редуктора:

$$M_{\text{вх.ч}} = \frac{M_{\text{кл}}}{(u_{\text{ч}} \cdot u_{\text{ц}}) \cdot (\eta_{\text{ч}} \cdot \eta_{\text{ц}})} = \frac{410{,}1}{(20 \cdot 40) \cdot (0{,}76 \cdot 0{,}94)} = 0{,}71 \text{ Нм} \quad (2.39)$$

де:

$\eta_{\text{ч}}$ - ККД черв’ячного редуктора;

$\eta_{\text{ц}}$ - ККД циліндричного редуктора.

Необхідний момент на вихідному валу черв’ячного редуктора:

$$M_{\text{вих.ч}} = \frac{M_{\text{кл}}}{u_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{ц}}} = \frac{410{,}1}{40 \cdot 0{,}94} = 10{,}90 \text{ Нм} \quad (2.40)$$

Для передавального числа $u_{\text{ч}} = 20$ та крутного моменту $M_{\text{вих.ч}} = 10{,}90$ Нм за ГОСТ 16162-93 підбираємо стандартний одноступінчастий черв'ячний редуктор.

Найменшим стандартним габаритом у серії є редуктор з міжосьовою відстанню $a_{\omega} = 40$мм. Редуктор: 2Ч-40-20. Номінальний крутний момент на вихідному валу редуктора $M_{\text{вих.ч.н}} = 28$ Нм:

Перевіряємо умову міцності редуктора:

$$M_{\text{вих.ч}} = 10{,}90 \text{ Нм} \leq M_{\text{вих.ч.н}} = 28 \text{ Нм} \quad (2.41)$$

Умову міцності виконано.

2.8 Розрахунок конічної шестерні

Ділильний конус [14]:

$$\delta = \frac{\Sigma}{2} = \frac{60}{2} = 30° \quad (2.42)$$

Матеріал шестерні - Сталь 40Х з гартуванням робочих поверхонь зубців. Базова межа контактної витривалості:

$$\sigma_{H\,lim} = 17 \cdot HRC + 200 = 17 \cdot 50 + 200 = 1050 \text{ МПа} \quad (2.43)$$

де:

HRC - твердість матеріалу за Роквелом.

Розрахунковий ресурс приймемо $L_H = 2000$ годин, сумарна кількість циклів навантаження за весь термін служби:

$$N = 60 \cdot n \cdot L_H = 60 \cdot 1 \cdot 2000 = 1,2 \cdot 10^5 \quad (2.44)$$

Допустиме контактне напруження:

$$[\sigma]_H = \frac{\sigma_{H\,lim} \cdot K_{H\,L}}{S_H} = \frac{1050 \cdot 1,8}{1,2} = 1575 \text{ МПа} \quad (2.45)$$

де:

$K_{H\,L}$ - коефіцієнт довговічності;

S_H - коефіцієнт безпеки.

Зовнішній ділильний діаметр колеса d_e має бути менше за:

$$d_e \geq K_d \cdot \sqrt[3]{\frac{T \cdot K_{H\beta}}{u \cdot K_{be} \cdot (1 - K_{be}) \cdot [\sigma]_H^2}} \quad (2.46)$$

де:

K_d - допоміжний коефіцієнт для сталі;

T - момент, який передається;

u - передаточне число;

K_{be} - коефіцієнт ширини зубчастого вінця;

$K_{H\beta}$ - коефіцієнт розрахункового навантаження.

$$d_e \geq 9900 \cdot \sqrt[3]{\frac{136{,}7 \cdot 1{,}5}{1 \cdot 0{,}285 \cdot 0{,}715 \cdot 1575^2}} = 9900 \cdot \sqrt[3]{\frac{205{,}05}{505245}} \approx 73{,}3 \text{ мм} \quad (2.47)$$

Для забезпечення жорсткості механізму та зручного компонування вузлів, приймаємо зовнішній ділильний діаметр $d_e = 110$ мм. Приймаємо кількість зубів як $z = 25$.

Зовнішній окружний модуль:

$$m_e = \frac{d_e}{z} = \frac{110}{25} = 4{,}4 \text{ мм} \quad (2.48)$$

Зовнішня конусна відстань:

$$R_e = \frac{d_e}{2 \cdot sin\,\delta} = \frac{110}{2 \cdot 0{,}5} = 110 \text{ мм} \quad (2.49)$$

Ширина зубчастого вінця:

$$b = 0{,}285 \cdot R_e = 0{,}285 \cdot 110 = 31{,}35 \text{ мм} \quad (2.50)$$

Середня конусна відстань:

$$R_m = R_e - 0{,}5 \cdot b = 110 - 0{,}5 \cdot 28{,}5 = 91{,}32 \text{ мм} \quad (2.51)$$

Середній модуль:

$$m_m = m_e \cdot \frac{R_m}{R_e} = 4,4 \cdot \frac{91,32}{110} = 3,65 \text{ мм} \quad (2.52)$$

Середній ділильний діаметр:

$$d_m = m_m \cdot z = 3,65 \cdot 25 = 91,25 \text{ мм} \quad (2.53)$$

Висота головки зуба:

$$h_a = m_e = 4,4 \text{ мм} \quad (2.54)$$

Висота ніжки зуба:

$$h_f = 1,2 \cdot m_e = 1,2 \cdot 4,4 = 5,28 \text{ мм} \quad (2.55)$$

Зовнішній діаметр вершин:

$$d_{ae} = d_e + 2 \cdot h_a \cdot cos\,\delta = 110 + 2 \cdot 4,4 \cdot cos\,30 =$$
$$= 110 + 2 \cdot 4,4 \cdot 0,866 = 117,62 \text{ мм} \quad (2.56)$$

Основні геометричні, кінематичні та силові параметри конічної передачі наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Основні параметри конічної шестерні

Параметр	Познач.	Значення	Одиниці
Зовнішній ділильний діаметр	d_e	110	мм
Кількість зубів	z	25	-

Зовнішній окружний модуль	m_e	4,4	мм
Зовнішня конусна відстань	R_e	110	мм
Ширина зубчастого вінця	b	31,35	мм
Середня конусна відстань	R_m	91,32	мм
Середній модуль	m_m	3,65	мм
Середній ділильний діаметр	d_m	91,25	мм
Висота головки зуба	h_a	4,4	мм
Висота ніжки зуба	h_f	5,28	мм
Зовнішній діаметр вершин	d_{ae}	117,62	мм

2.9 Підбір карданного валу

Для приводу ЛПК доцільно використовувати телескопічний двошарнірний карданний вал за ГОСТ 13758-89 [15].

Таблиця 2.3 - Вихідні дані для Підбіру карданного валу

Параметр	Познаення	Значення	Одиниці
Номінальний момент	$M_{\text{ном}}$	410	Нм
Довжина вала	L	1000	мм
Робочий кут зламу осей у шарнірі	α	5	°

Підбір стандартного типорозміру карданного вала виконується за розрахунковим (еквівалентним) крутним моментом:

$$M_{\text{розр}} = M_{\text{ном}} \cdot K_{\text{д}} \cdot K_{\alpha} \quad (2.57)$$

де:

$K_{\text{д}}$ - коефіцієнт динамічності навантаження, з метою забезпечення запасу надійності приймаємо як $K_{\text{д}} = 1,2$;

K_{α} - коефіцієнт що враховує робочий кут зламу шарніра, при малих кутах $\alpha \leq 10°$ приймається як $K_{\alpha} = 1,0$.

Виконуємо розрахунок:

$$M_{\text{розр}} = 410 \cdot 1,2 \cdot 1,0 = 492 \text{ Нм} \quad (2.58)$$

Згідно з ГОСТ 13758-89, підбираємо найближчий номінальний крутний момент з ряду: 160, 250, 400, 630, 1000 Нм. Основним критерієм вибору є виконання умови міцності:

$$M_{\text{ном.гост}} = 630 \geq M_{\text{розр}} = 492 \quad (2.59)$$

Згідно з ГОСТ 13758-89 обираємо карданний вал 01.063.1020, де:

01 - вал карданний телескопічний двошарнірний без захисного кожуха;

063 - номінальний крутний момент 630 Нм;

1020 - номінальна довжина вала в міліметрах у складеному стані.

3 ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ЧАСТИНА

3.1 Функції змащення

3.1.1 Зниження коефіцієнту тертя

Змащення являє собою процес введення мастильного матеріалу в зону контакту рухомих деталей з метою заміни сухого тертя їх поверхонь на значно менше - внутрішнє тертя шарів матеріалу. Оскільки сили когезії між молекулами рідини значно менші за сили адгезії та механічного зчеплення мікронерровностей металевих поверхонь, опір відносному переміщенню тіл кратно зменшується, що являє собою зменшення коефіцієнту тертя f.

Найнижчі значення коефіцієнта тертя (f = 0,001…0,01) досягаються в режимах рідинного (гідродинамічного) та еласто-гідродинамічного змащування. За таких умов поверхні деталей повністю розділені мастильною плівкою, товщина якої перевищує сумарну висоту мікронерровностей, що виключає безпосередній контакт металу з металом. Опір руху в цьому випадку зумовлений виключно властивостями мастильного матеріалу.

У випадках недостатньої товщини мастильного шару, що характерно для фаз пуску, зупинки або роботи при екстремально високих навантаженнях, реалізується режим граничного змащування. Коефіцієнт тертя при цьому значно зростає (f = 0,08…0,18), оскільки розділення поверхонь забезпечується лише тонкими молекулярними плівками, сформованими активними компонентами мастила. Проміжний стан, відомий як змішане змащування, характеризується значеннями коефіцієнта тертя в діапазоні f = 0,08…0,12, де навантаження розподіляється між гідродинамічним шаром та ділянками безпосереднього контакту мікронерровностей.

Для цілеспрямованого зниження коефіцієнта тертя, особливо в умовах граничного та змішаного тертя, до складу сучасних редукторних масел вводять специфічні антифрикційні присадки - модифікатори тертя. Ці хімічно активні речовини (зокрема дитіофосфати або дитіокарбамати молібдену) адсорбуються на металевих поверхнях, утворюючи структури з низьким опором зсуву. Крім того, значного зниження тертя в екстремальних режимах досягають шляхом

застосування твердих мастильних матеріалів, таких як дисульфід молібдену (MoS_2) або графіт. Завдяки своїй шаруватій кристалічній структурі вони забезпечують легке ковзання площин базиса паралельно напрямку тертя, що мінімізує енергетичні втрати навіть за умови руйнування основної масляної плівки.

При проектуванні систем змащування особливу увагу приділяють вибору оптимальної в'язкості мастильного матеріалу. Надмірне підвищення в'язкості, хоча і сприяє створенню стійкого розділового шару, призводить до зростання внутрішнього тертя рідини та збільшення втрат потужності на перемішування і розбризкування мастила, що знижує загальний ККД механізму.

3.1.2 Відведення тепла

Основними джерелами тепловиділення в механічних передачах є втрати на тертя в зубчастих та/або черв’ячних зачепленнях, втрати в підшипникових вузлах, а також гідродинамічний опір, зумовлений перемішуванням та розбризкуванням мастильного матеріалу. Ефективність терморегуляції безпосередньо впливає на надійність та довговічність деталей, оскільки перегрів призводить до втрати несучої здатності мастильної плівки.

При картерному змащуванні мастило абсорбує надлишкову теплоту безпосередньо в зоні контакту та транспортує її до внутрішніх поверхонь корпусу, який виконує роль природного теплообмінника, відводячи енергію в навколишнє середовище шляхом конвекції та випромінювання. Проте при окружних швидкостях, що перевищують 12,5 м/с, або при роботі важконавантажених черв’ячних передач, інтенсивність самонагріву робочої рідини різко зростає через значні втрати на перемішування. Для мінімізації нагріву в таких умовах обмежують глибину занурення коліс або використовують спеціальні розбризкувачі, що створюють масляний туман.

Розрахунок теплового режиму базується на рівнянні теплового балансу, за якого кількість теплоти, що виділяється при роботі, повинна бути еквівалентна кількості теплоти, що відводиться корпусом та мастильною системою.

Потужність теплового потоку визначається через середню передавану потужність та загальний коефіцієнт корисної дії передачі з урахуванням втрат у підшипниках та опорах. Максимально допустима робоча температура мастила для більшості промислових редукторів обмежена діапазоном 95–110 °C, оскільки подальше нагрівання спричиняє критичне зниження в'язкості та провокує заїдання або задири робочих поверхонь.

У випадках, коли природного охолодження через поверхню корпусу недостатньо, застосовують методи штучної терморегуляції: обдування ребристих стінок вентиляторами, встановлення внутрішніх змійовиків з проточною водою або впровадження циркуляційних мастильних систем з виносними теплообмінниками.

3.1.3 Очищення зон фрикційного контакту

Під час циркуляції мастильний матеріал абсорбує дрібні фракції відділеного матеріалу та продукти термічного розкладу, виносячи їх із робочої зони зачеплень та підшипникових вузлів. Це запобігає абразивному впливу твердих часток на робочі поверхні деталей, мінімізуючи ризик виникнення задирів та інтенсивного стирання металу.

Ефективність вимивання забруднень безпосередньо залежить від наявності у складі мастильного матеріалу специфічних функціональних присадок - детергентів та дисперсантів. Детергенти виконують роль миючих агентів, що перешкоджають адгезії продуктів окислення до нагрітих поверхонь деталей, запобігаючи утворенню лакових відкладень та нагару. Диспергувальні компоненти відповідають за підтримання часток забруднень у дрібнодисперсному зваженому стані, перешкоджаючи їхній агломерації (злипанню). Такий механізм дії дозволяє транспортувати забруднювачі через систему змащування до пристроїв механічної фільтрації або зон седиментації, не допускаючи їхнього осідання в критичних зазорах.

Механічне очищення робочої рідини в інженерних системах здійснюється за допомогою фільтрувальних пристроїв, які класифікуються за розміром

часток, що вловлюються: від грубого очищення (>200 мкм) до особливо тонкого (≥0,1 мкм). Пропускна здатність фільтрів визначається фізико-хімічними властивостями мастила, рівнем його забруднення та характеристиками фільтрувальних матеріалів, таких як металеві пластини, папір, повсть або капрон. Застосування паперових та матерчатих фільтрів є найбільш ефективним для затримання не лише твердих включень, а й певної частини смолистих сполук, що утворюються в процесі старіння мастила.

Для систем із великим об’ємом масляної ванни передбачається очищення шляхом гравітаційного осадження часток у резервуарах-відстійниках. Швидкість седиментації часток у спокійному стані рідини визначається законом осадження, що враховує радіус часток, різницю щільностей металу та мастила, а також кінематичну в’язкість середовища. Запас мастила в таких резервуарах має перевищувати подачу станції в 20–40 разів для забезпечення необхідної тривалості відстоювання. Поступове накопичення механічних домішок, води та зміна кислотного числа свідчать про вичерпання ресурсу мастильного матеріалу, що потребує його повної заміни через спеціальні зливні отвори для відновлення працездатності механізму

3.1.4 Захист від корозії

Механізм захисної дії полягає в ізоляції металевих поверхонь від агресивного впливу зовнішнього середовища, атмосферної вологи та продуктів окислення самого мастила. Без належного змащування деталі піддаються корозійно-механічному зношуванню, що призводить до передчасної деградації елементів зачеплення та підшипникових вузлів.

Для реалізації цієї функції до складу сучасних мастильних матеріалів вводять специфічні пакети функціональних добавок — інгібітори корозії та протикорозійні присадки. Ці речовини здатні адсорбуватися на металевих поверхнях, формуючи міцні захисні плівки, які перешкоджають контакту металу з водою та розчинами кислот, що утворюються в процесі роботи.

Ефективність протикорозійного захисту тісно пов'язана зі стабільністю фізико-хімічних властивостей мастила під час експлуатації. Накопичення продуктів окиснення (пероксидів) та проникнення вологи значно посилюють корозійну агресивність середовища, особливо щодо вузлів, виготовлених із кольорових металів та їхніх сплавів. Контроль за станом мастильного матеріалу здійснюється шляхом моніторингу кислотного числа, зростання якого свідчить про окислення масел та вичерпання ресурсу лужних присадок. Своєчасна заміна мастила та використання високоякісних мастильних матеріалів із відповідними захисними властивостями дозволяють запобігти виникненню корозійних пошкоджень і забезпечити надійну роботу промислового обладнання.

3.2 Вибір схеми мащення редуктора Ц2-350-У2

Об’єм масляної ванни редуктора Ц2-350-У2 дорівнює 7 л [17]. Оберти на швидкохідному валу:

$$n_1 \approx 30 \text{ об/хв.} \tag{3.1}$$

Тихохідному:

$$n_2 = 0,749 \text{ об/хв.} \tag{3.2}$$

Окружна швидкість на тихохідному колесі редуктора:

$$u = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_2}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 200 \cdot 0,749}{60 \cdot 1000} = 0,007 \text{ м/с} \tag{3.4}$$

де:

d_1 - ділильний діаметр колеса.

Для забезпечення надійного підведення мастила до зон контакту за швидкостей $u < 1$ м/с обов’язковим є застосування методу занурення (картерного змащування). За таких умов тихохідне колесо занурюється на глибину приблизно до 1/3 його радіуса, а швидкохідне колесо - на глибину до двох висот зубів, але не менше ніж на 10 мм. Таке конструктивне рішення гарантує безперервне перенесення мастильного матеріалу в зачеплення, попри низьку інтенсивність динамічних процесів у картері.

Вибір мастильного матеріалу за окружних швидкостей $u \ll 0,5$ м/с обумовлений неможливістю формування стійкого рідинного (гідродинамічного) шару, який би повністю розділяв поверхні тертя [16]. За таких умов механізм функціонує в режимі граничного або змішаного змащування, де захист деталей забезпечується виключно тонкими адсорбційними плівками мастила. Відповідно до інженерних нормативів, для швидкостей $u \ll 0,5$ м/с рекомендується обирати масла з в'язкістю в межах $\nu_{40} = 600 - 750$ мм^2/с при температурі 40°С.

Згідно з параметрів було обрано індустріальне редукторне мастило високої в'язкості з присадками, що поліпшують змащувальні, антикислотні, антикорозійні, протизношувальні та протизадирні властивості: MOBIL MOBILGEAR 600 XP 680 об’ємом 7 літрів, яке відповідає стандарту ISO VG 680 (CLP).

Враховуючи, що за швидкостей $u \ll 0,5$ м/с стандартне картерне змащування розбризкуванням стає малоефективним [16] для змащування підшипників, для них доцільно використати антифрикційні мастила на літієвій або кальцієвій основі, які мають високу адгезію до поверхонь і не витікають із робочих зон при низьких динамічних навантаженнях.

В якості мастила для підшипникових вузлів редуктора Ц2-350-У2 обрано Літол-24.

Перша заміна (після обкатки) мастила в картері редуктора здійснюється після 100 годин роботи, далі - один раз на рік. Повне оновлення пластичного мастила Літол-24 здійснювати один раз на рік.

3.3 Вибір схеми мащення редуктора 2Ч-40-20

Об’єм масляної ванни редуктора 2Ч-40-20 дорівнює 0,14-0,3 л [18]. Оберти на швидкохідному валу:

$$n_1 \approx 600 \text{ об/хв} \tag{3.5}$$

На тихохідному:

$$n_2 \approx 30 \text{ об/хв} \tag{3.6}$$

Окружна швидкість черв’яка:

$$u_1 = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_2}{60 \cdot 1000} = \frac{3{,}14 \cdot 18 \cdot 600}{60 \cdot 1000} = 0{,}565 \text{ м/с} \tag{3.7}$$

де:

d_1 - ділильний діаметр черв’яка.

На відміну від циліндричних зубчастих передач, для черв'ячного редуктора критично важливим параметром є швидкість ковзання u_s, оскільки вона зумовлює інтенсивне тертя ковзання в зоні контакту та ризик виникнення заїдань:

$$u_s = \frac{u_1}{\cos \gamma} = \frac{0{,}565}{\cos 75} = \frac{0{,}565}{0{,}258} = 2{,}189 \text{ м/с} \tag{3.8}$$

де:

γ - кут підйому витка черв’яка на ділильному циліндрі.

При нижньому розташуванні черв’як занурений в мастило на повну висоту витка. Рівень масляної ванни при цьому проходить через центр нижнього тіла кочення підшипників черв'ячного вала. Таке обмеження рівня обумовлене необхідністю мінімізації гідродинамічного опору та втрат потужності на перемішування і розбризкування масла, які суттєво зростають із підвищенням частоти обертання. За цієї компоновки черв'як безпосередньо контактує з масляною ванною, що гарантує безперервне подавання мастильного матеріалу в зону зачеплення та до підшипникових вузлів вала черв'яка.

Для швидкостей ковзання $u_s > 2$ м/с рекомендована в’язкість мастила $\nu_{100} = 20 - 25$ мм^2/с при температурі 100°С.

Згідно з параметрів обрано індустріальне редукторне мастило підвищеної в'язкості з присадками, що поліпшують змащувальні, антикислотні, антикорозійні, протизношувальні та протизадирні властивості: ИРп-150 об’ємом 0,3 літра, яке відповідає стандарту ISO VG 220 (CLP).

Через недостатню для створення потрібної кількості масляного туману всередині корпуса редуктора окружну швидкість колеса u_1 < 1 м/с, прийнято рішення використовувати для змащення його підшипників Літол-24.

Перша заміна (після обкатки) мастила в картері редуктора здійснюється після 50 годин роботи, далі - через кожні 6 місяців. Повне оновлення пластичного мастила Літол-24 здійснювати один раз на рік.

ВИСНОВОК: в рамках експлуатаційної частини проекту обґрунтовано застосування картерної системи мащення для обох редукторів та, на основі кінематичних і трибологічних розрахунків, підібрано оптимальні мастильні матеріали:

Для редуктора Ц2-350-У2 це мастило MOBIL MOBILGEAR 600 XP 680 об'ємом 7 літрів у поєднанні з автономним змащуванням підшипників пластичним мастилом Літол-24.

Для редуктора 2Ч-40-20 це мастило ИРп-150 об'ємом 0,3 літра у поєднанні з автономним змащуванням підшипників колеса пластичним мастилом Літол-24.

Запропонований регламент заміни ПММ для кожного з редукторів, мінімізує знос зачеплень, забезпечує стабільний ККД приводу та гарантує максимальний міжремонтний ресурс обладнання в умовах закритого приміщення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Експлуатація установки валкової розливки-прокатки супроводжується комплексом специфічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Це зумовлено одночасним поєднанням у межах одного агрегату високих температур розплаву сталі (понад 1500°C), значних механічних зусиль деформації, наявності електроприводу та допоміжного обладнання.

Метою даного розділу є комплексна оцінка умов праці під час роботи установки, ідентифікація потенційних ризиків для здоров’я операторів та розробка ефективних інженерно-технічних рішень для їх нейтралізації [19].

У розділі вирішуються такі завдання:

1) Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації установки;

2) Виконання розрахунку контуру заземлення установки;

3) Розробка заходів щодо пожежної безпеки, враховуючи специфіку взаємодії розплавленого металу з горючими елементами систем мащення;

4) Визначення порядку дій персоналу в умовах надзвичайних ситуацій.

4.1 Потенційно шкідливі фактори при експлуатації установки ВРП

Експлуатація установки валкової розливки-прокатки пов’язана з впливом термічних, механічних, електричних та хімічних чинників.

Термічний вплив характеризується виділенням значної кількості променистої енергії, інтенсивність якої на робочих місцях може досягати 3,5–7,0 кВт/м². Надмірне виділення тепла при розплавленні металу становить близько 3000 МДж на тонну продукції, що призводить до нагрівання навколишнього обладнання, яке стає вторинним джерелом інфрачервоного випромінювання. Для мінімізації негативного впливу теплового випромінювання на персонал обов'язковим є впровадження технічних рішень щодо екранування джерел тепла та робочих місць. Застосовуються екрани трьох типів: відбиття, поглинання та тепловідводу, при цьому встановлення екранів на

певній відстані від стінок агрегатів сприяє природній аерації та додатковому охолодженню поверхонь. Температура нагрітих поверхонь обладнання та огороджень на робочих місцях не повинна перевищувати 45 °С, а для агрегатів з внутрішньою температурою до 100 °С цей показник обмежений 35 °С. У випадках, коли інтенсивність опромінення перевищує 1,25 МДж/(м²·год), на постійних робочих місцях передбачається встановлення повітряних душів для забезпечення нормованих параметрів мікроклімату.

Небезпека прямого термічного впливу пов'язана з викидами та бризками розплавленого металу, що виникають під час плавлення, транспортування у ковшах та заливання в установку. Причинами таких викидів часто є порушення технологічного режиму, наявність вологи на поверхнях або інструменті, а також кипіння розплаву. Особливу увагу слід приділяти запобіганню контакту розплаву з водою, оскільки миттєве пароутворення під шаром металу призводить до потужних вибухів із розбризкуванням рідкої маси на значні відстані. Технічним заходом безпеки у цьому контексті є обов'язкова ретельна просушка ковшів, валків, корпусу установки та заготовок (брухту) перед їх контактом із розплавленим металом.

Захист персоналу від термічних опіків та теплового удару реалізується через використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), що відповідають вимогам НПАОП 27.0-3.01-08. Спеціальний одяг для експлуатантів виготовляється з вогнестійких, повітропроникних та гігроскопічних матеріалів. Для захисту органів зору від інфрачервоного випромінювання використовуються окуляри або щитки зі спеціальними світлофільтрами (марки СС4, СС11, СС14 залежно від температури розплаву). Захист ніг забезпечується спеціальним взуттям на підошві хромового дублення з додатковими теплоізоляційними прокладками та козирками для захисту від бризок.

Механічний вплив являє собою травмування, яке відбувається внаслідок безпосереднього контакту персоналу з рухомими елементами установки через випадкове проникнення в небезпечну зону, положення та розміри якої можуть змінюватися залежно від режиму роботи обладнання. Основними джерелами

небезпеки є рухомі частини установки: карданні вали, валки, муфти, передачі що обертаються, а також обладнання та матеріали, які переміщуються під час технологічного циклу: ковші, шихтові матеріали, кінцева заготовка.

Захист персоналу від травмування рухомими частинами машин, механізмів та матеріалами, що переміщуються під час технологічного циклу, забезпечується впровадженням систем колективного захисту (ЗКЗ). Основу ЗКЗ становлять огороджувальні пристрої (кожухи, бар'єри, щити, екрани), які ізолюють небезпечні зони та блокуються з пусковими пристроями агрегатів: у разі зняття або відкриття захисту обладнання автоматично вимикається. Для своєчасного попередження працівників про пуск механізмів або виникнення аварійних ситуацій застосовуються пристрої автоматичного контролю та світлозвукової сигналізації, а також сигнальні кольори та знаки безпеки згідно з ДСТУ.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) застосовуються так як технічні засоби колективного захисту та архітектурно-планувальні рішення не забезпечують повну безпеку робіт.

Електричний вплив на організм людини в при експлуатації установки виробництва призводить до виникнення електротравм, що визначаються як порушення анатомічних співвідношень і функцій тканин та органів, викликані дією електричного струму або електричної дуги. Характер патологічних змін обумовлений чотирма видами дії струму: термічною, електролітичною, механічною та біологічною. Термічна дія спричиняє опіки окремих ділянок тіла та нагрів внутрішніх тканин до критичних температур, що викликає функціональні розлади. Електролітична дія полягає у розкладанні органічних рідин, зокрема крові, із суттєвим порушенням їх фізико-хімічного складу. Механічна дія призводить до розривів тканин, сухожиль та переломів кісток унаслідок мимовільних судомних скорочень м’язів. Біологічна дія проявляється у збудженні живих тканин та порушенні внутрішніх біоелектричних процесів, що може спричинити зупинку серця або дихання.

Технічні заходи забезпечення електробезпеки передбачають надійну ізоляцію струмоведучих елементів, заземлення металевих корпусів агрегатів, встановлення пристроїв захисного відключення (ПЗВ) та автоматичних вимикачів. Організаційні заходи включають нарядну систему допуску до робіт, суворе дотримання жетонної (биркової) системи при ремонті та регулярне навчання персоналу методам безпечної експлуатації електроустановок. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) - діелектричні рукавички, калоші, боти та килими - повинні проходити періодичні випробування на електричну міцність згідно з встановленими графіками.

Хімічний вплив у зонах розміщення розплавленого металу та шлаку обумовлений інтенсивним забрудненням повітряного середовища токсичними газами та дрібнодисперсними аерозолями, що утворюються під час плавки, випуску та розливання продукції. Основним механізмом надходження шкідливих речовин у робочу зону є фізико-хімічні процеси конденсації парів металу та хімічні реакції між компонентами шихти, футерування і навколишнім повітрям. Аерозолі конденсації характеризуються високим ступенем дисперсності (понад 90 % часток мають швидкість витання менше 0,1 м/с), що дозволяє їм тривалий час перебувати у зваженому стані та проникати глибоко у дихальні шляхи персоналу.

Технічні заходи мінімізації хімічного впливу базуються на впровадженні систем локальної апірації та місцевої витяжної вентиляції безпосередньо біля джерел виділення шкідливостей. Для очищення повітря від пилу та газоподібних домішок перед викидом в атмосферу застосовуються скрубери, циклони з водяним зрошенням та мокрі фільтри, виготовлені з кислототривких матеріалів.

Захист персоналу від хімічного впливу, який неможливо усунути технічними засобами, реалізується через використання засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) — фільтрувальних та ізолювальних респіраторів.

4.2 Розрахунок контуру заземлення установки ВРП

Технічне забезпечення електробезпеки металургійних агрегатів базується на влаштуванні захисного заземлення - навмисного електричного з’єднання з землею або її еквівалентом металевих неструмоведучих частин обладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції [20]. Виконання заземлення регламентується вимогами ПУЕ, ГОСТ 12.1.019–79 та спеціалізованих нормативно-правових актів з охорони праці, зокрема НПАОП 40.1-1.01-97 та НПАОП 40.1-1.21-98. Основним призначенням цього заходу є зниження напруги дотику до безпечного значення при замиканні на корпус агрегату. Відповідно до вимог ПУЕ, гранично допустимий опір заземлювального пристрою в будь-яку пору року не повинен перевищувати $R_{\text{доп}} = 4$ Ом [21].

Через неможливість монтажу електродів безпосередньо в приміщенні, проектом передбачено виносний контур. Обладнання в кабінеті з'єднується з магістраллю, яка виводиться крізь отвір у зовнішній стіні на вулицю, де на відстані понад 1 м від фундаменту прокладається заземлювальний пристрій у траншеї.

Заземлювальний пристрій являє собою штучний заземлювач контурного типу, що складається з вертикальних стрижнів (кругла сталь), заглиблених у землю і з’єднаних між собою горизонтальною сталевою смугою по прямокутному замкненому контуру на відстані $a = 2,5$ м один від одного методом зварювання.

Вихідні дані для розрахунку:

Тип грунту: чорнозем, базовий питомий опір $p = 50$ Ом $\cdot$ м;

Вертикальні електроди: сталеві стрижні круглого перерізу діаметром $d = 12$ мм $(0,012$ м$)$ та довжиною $l = 0,7$ м; Верхній кінець стрижнів заглиблюється в землю від поверхні на $h_0 = 0,7$ м.

Горизонтальний електрод: сталева з'єднувальна смуга шириною $b = 40$ мм $(0,04$ м$)$ що укладається на глибині $h_0 = 0,7$ м.

Кліматичні зона: III (третя). Коефіцієнт сезонності для вертикальних електродів $\psi_{в} = 1,15$, горизонтальних $\psi_{г} = 1,45$.

Враховуючи сезонні зміни вологості та температури ґрунту для III кліматичної зони, обчислюємо розрахункові значення питомого опору для чорнозему.

Для вертикальних електродів:

$$p_{\text{розр.в}} = p \cdot \psi_{в} = 50 \cdot 1,15 = 57,5 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (4.1)$$

Для горизонтальних електродів:

$$p_{\text{розр.г}} = p \cdot \psi_{г} = 50 \cdot 1,45 = 72,5 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (4.2)$$

Визначаємо опір розтіканню струму одного вертикального електрода. Глибина закладання середини вертикального стрижня від поверхні землі становить:

$$h = h_0 + \frac{l}{2} = 0,7 + \frac{2,5}{2} = 1,95 \text{ м} \quad (4.3)$$

Опір одиночного вертикального електрода:

$$R_{в} = \frac{p_{\text{розр.в}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(ln\frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot ln\frac{4 \cdot h + l}{4 \cdot h - l}\right) =$$

$$= \frac{57,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left(ln\frac{2 \cdot 2,5}{0,012} + \frac{1}{2} \cdot ln\frac{4 \cdot 1,95 + 2,5}{4 \cdot 1,95 - 2,5}\right) =$$

$$= 3,66 \cdot \left(ln(416,67) + \frac{1}{2} \cdot ln\frac{10,3}{5,3}\right) =$$

$$= 3,66 \cdot \left(6,03 + \frac{1}{2} \cdot 0,664\right) = 3,66 \cdot (6,03 + 0,332) = 23,29 \text{ Ом} \quad (4.4)$$

Визначаємо необхідну кількість вертикальних електродів без урахування їх взаємного екранування:

$$n_0 = \frac{R_в}{R_{доп}} = \frac{23,29}{4} = 5,8 \text{ шт} \quad (4.5)$$

Оскільки електроди монтуються в землю по замкненому контуру (прямокутником) на фіксованій відстані $a = 2,5$ м один від одного (відношення кроку до довжини становить $a/l = 1$), струми розтікання в ґрунті будуть частково перекриватися. Для врахування цього ефекту використовується коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів ($\eta_в$). Для контуру з передбачуваної кількості електордів ($n = 8...12$) за довідковими таблицями ПУЕ приймаємо $\eta_в = 0,78$.

Уточнюємо кількість вертикальних електродів з урахуванням екранування:

$$n_1 = \frac{R_в}{R_{доп} \cdot \eta_в} = \frac{23,29}{4 \cdot 0,78} = \frac{23.29}{3.12} = 7,46 \text{ шт} \quad (4.6)$$

Отримане значення $n_1 = 7,46$ округляємо у більшу сторону до найближчого числа яке забезпечує запас, симетрію та зручність монтажу по периметру прямокутного вуличного майданчика. Приймаємо як $n = 10$.

Фактичний сумарний опір 10 вертикальних електродів у контурі дорівнюватиме:

$$R_{в.сум} = \frac{R_в}{\eta \cdot \eta_в} = \frac{23,29}{10 \cdot 0,78} = 2,99 \text{ Ом} \quad (4.7)$$

Довжина сталевої смуги, що об'єднує 10 стрижнів, розміщених по замкненому контуру з кроком $a = 2,5$ м та враховуючи 5-метрову магістраль виводу з приміщення:

$$L = n \cdot a \cdot L_{\text{виводу}} = 10 \cdot 2,5 + 5 = 30 \text{ м} \quad (4.8)$$

де:

$L_{\text{виводу}}$ - довжина магістралі виводу з приміщення.

Опір розтіканню струму для горизонтальної смуги в чорноземі:

$$R_{\text{г}} = \frac{p_{\text{розг.г}}}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot ln\frac{2 \cdot L^2}{b \cdot h_0} =$$

$$= \frac{72,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 30} \cdot ln\frac{2 \cdot 30^2}{0,04 \cdot 0,7} = 0,385 \cdot ln\frac{1800}{0,028} =$$

$$= 0,385 \cdot ln(64285,7) = 0,385 \cdot 11,07 = 4,26 \text{ Ом} \quad (4.9)$$

Враховуємо коефіцієнт використання горизонтальної смуги в замкненому контурі з 10 стрижнів $\eta_{\text{г}} = 0,46$:

$$R_{\text{г.роб}} = \frac{R_{\text{г}}}{\eta_{\text{г}}} = 9,26 \text{ Ом} \quad (4.10)$$

Оскільки вуличний блок вертикальних електродів та горизонтальна смуга працюють паралельно, підсумковий опір заземлення $R_{\text{заг}}$ дорівнює:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_{\text{в.сум}} \cdot R_{\text{г.роб}}}{R_{\text{в.сум}} + R_{\text{г.роб}}} = \frac{2,99 \cdot 9,26}{2,99 + 9,26} = \frac{27,69}{12,25} = 2,26 \text{ Ом} \quad (4.11)$$

Перевіряємо дотримання умови ПУЕ:

$$R_{\text{заг}} = 2,26\ \text{Ом} \leq R_{\text{доп}} = 4\ \text{Ом} \quad (4.12)$$

Визначаємо коефіцієнт запасу безпеки:

$$K_{\text{зап}} = \frac{R_{\text{доп}}}{R_{\text{заг}}} = \frac{4}{2,26} \approx 1,77 \quad (4.13)$$

Розрахований контур заземлення має 77% запасу за провідністю та повністю задовольняє вимогам ПУЕ.

4.3 Пожежна безпека

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2015, приміщення лабораторії, де розміщено установку ВРП, за вибухопожежною та пожежною небезпекою належить до категорії Г [22]. Це обумовлено наявністю негорючих речовин і матеріалів у гарячому, розжареному або розплавленому стані (рідка сталь, нагріта заготовка), процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор та полум'я.

Основними джерелами пожежної небезпеки є:

Розплавлений метал: температура сталі становить понад 1500°С. При випадкових сплесках або порушенні герметичності промковша існує ризик контакту металу з горючими матеріалами.

Електрообладнання: електродвигуни приводу валків та системи керування є потенційними джерелами загоряння при коротких замиканнях або перевантаженнях.

Мастило в редукторах: в картерах редукторів використовуються мінеральні масла (діапазон спалаху парів 180…230°С). У разі розгерметизації корпусу редуктора та утворення масляного туману (течії) можливе його миттєве займання від розплаву (іскор).

Вода в зоні розплаву: порушення герметичності сорочки водяного охолодження робочих валків може призвести до потрапляння води на дзеркало

розплаву, що викликає миттєве пароутворення, вибух та викид металу, який здатний підпалити навколишні конструкції.

Приміщення лабораторії комплектується засобами пожежогасіння відповідно до «Правил пожежної безпеки в Україні»:

Заборона на використання води: гасіння пожеж у зоні ливарно-прокатної кліті водою або піною суворо заборонено через ризик вибуху при контакті з гарячим металом.

Комплектація поста: для локалізації пожеж класу Е (електроустановки) та класу В (рідкі речовини) приміщення оснащується вуглекислотними вогнегасниками типу ВВ-5 (ОУ-5) або порошковими ВП-5 (ОП-5), а також ящиками з сухим піском (об'ємом 0,5 $м^3$).

Евакуація: евакуаційні шляхи та виходи проектуються вільними, напрямок руху до виходів позначається світловими покажчиками з автономним живленням згідно з ДСТУ ISO 23601:2019. Ширина дверей лабораторного кабінету забезпечує безперешкодну евакуацію персоналу за час, що не перевищує нормативні 1.5 хвилини.

4.4 Дії персоналу та забезпечення живучості обладнання в умовах надзвичайних ситуацій

4.4.1 Алгоритм дій при оголошенні сигналу «Повітряна тривога»

Враховуючи специфіку роботи з розплавленим металом, персонал не може миттєво залишити робочі місця. Потрібно виконати процедуру екстреної зупинки агрегату, щоб запобігти аварії техногенного характеру під час відсутності людей у кабінеті.

Порядок дій оператора:

1) Негайно перекрити стопорний механізм (або шиберний затвор) ковша, припинивши подачу рідкої сталі в міжвалковий зазор;

2) Якщо в ковші залишається метал, за допомогою поворотного механізму злити його в аварійну ємність (суху футеровану чашу), розташовану під установкою;

3) Прокатати залишок металу, що вже знаходиться між валками, і зупинити головний привід кліті (вимкнути електродвигун);

4) Знеструмити пульт керування (натиснути кнопку «Аварійна зупинка»), взяти особисті речі, документи та швидко залишити приміщення, прямуючи до найближчого облаштованого укриття будівлі.

4.4.2 Алгоритм дій при раптовому знеструмленні

Раптове зникнення напруги в мережі є однією з найнебезпечніших аварійних ситуацій для установки. Зупинка валків при наявності гарячого металу між ними призводить до їхнього термічного пошкодження, а зупинка насосів охолодження - до закипання води в сорочці валків і можливого вибуху.

Порядок дій персоналу:

1) Оскільки електропривод перекриття ковша не працює, оператор за допомогою ручного механічного дублера перекриває подачу сталі;

2) Перейти на резервне живлення насосу охолодження валків;

3) Перевірити, чи запустився аварійний насос охолодження валків. Циркуляція води повинна тривати до повного охолодження робочої зони кліті до безпечної температури (< 100°C);

4) Якщо в ковші залишається метал, за допомогою поворотного механізму злити його в аварійну ємність (суху футеровану чашу), розташовану під установкою;

5) Після стабілізації теплового стану обладнання персонал повинен вийти на безпечну відстань від установки та очікувати ввімкнення світла.

4.4.3 Алгоритм дій при виникненні пожежі

1) Негайно перекрити шиберний затвор промковша, зупинивши рух рідкої сталі в міжвалковий зазор;

2) Натиснути кнопку аварійного вимкнення «Аварійна зупинка» на пульті керування або вибити головний автомат на силовому щиті для виключення ризику подальшого замикання;

3) Якщо пожежа не зачепила магістралі водопостачання, перевести насос охолодження на аварійне живлення та переконатися в успішному запуску насосу;

4) Задіяти кнопку ручного сповіщення про пожежу;

5) Якщо пожежа ще на початковій стадії - застосувати вогнегасник ВВ-5. Якщо вогонь не вдалося локалізувати за перші 1–2 хвилини, або з’явився густий токсичний дим від ізоляції та масла — негайно припинити гасіння;

6) Повідомити за телефоном 101 про пожежу;

7) Організовано залишити кабінет через евакуаційний вихід, щільно зачинивши за собою двері (але не замикаючи на замок), щоб обмежити доступ кисню до зони горіння;

8) При евакуації з задимленого приміщення пересуватися навприсядки або повзком (ближче до підлоги повітря чистіше), захистивши органи дихання тканиною (бажано зволоженою).

9) По приїзду пожежної бригади треба чітко попередити пожежних, що в лабораторії знаходиться установка із гарячим металлом і залишками масла, і що **застосовувати воду для гасіння лабораторії не можна**. Показати найкоротший шлях до осередку та електрощитової корпусу.

ВИСНОВОК: в рамках розділу виконано аналіз шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації установки, розраховано контур заземлення установки ВРП на відповідність ПУЕ, розроблено заходи щодо пожежної безпеки та алгоритмі дій персоналу при надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

1. На основі порівняльного аналізу традиційних машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) та комплексів ливарно-прокатних клітей (ЛПК), обґрунтовано доцільність застосування тривалкового модуля ЛПК для круглої заготовки як ефективної альтернативи. Використання цього модуля дозволяє суттєво скоротити кількість технологічних операцій та знизити питомі енерговитрати виробництва. Завдяки одночасній кристалізації та деформації металу в замкненому тривалковому контурі формується однорідна рівновісна структура заготовки, що є особливо важливим для подальшого трубопрокатного переділу.
2. Для проведення фізичного моделювання гарячої прокатки сталей обґрунтовано підібрано матеріал-імітатор — відпалений алюміній марки АД1, що має високу механічну подібність за напруженням (коефіцієнт подібності близько 0,88). На основі 3D-моделювання осередку деформації в CAD SolidWorks розраховано енергосилові параметри процесу: довжину дуги контакту (8,98 мм), середній питомий тиск (48,45 МПа), повне зусилля прокатки на кліть (56,4 кН) та сумарний крутний момент (410 Нм). Виходячи з наявності електродвигуна АИР112М4У2 (5,5 кВт) та циліндричного редуктора Ц2-350-У2 (u=40), спроектовано комбіновану кінематичну схему із додаванням черв'ячного редуктора 2Ч-40-20 (u=20), що забезпечило загальне передавальне число u=800 для стабільної технологічної швидкості 0,5 м/хв при частоті струму 20,88 Гц, яка забезпечує належне охолодження двигуна самовентиляцією, а за еквівалентним моментом підібрано стандартний телескопічний карданний вал типу 01.063.1020.
3. З метою підвищення довговічності деталей трансмісії розроблено триботехнічний регламент, що передбачає картерну систему змащування редукторів із використанням масел MOBIL MOBILGEAR 600 XP 680 і ИРП-150, а також пластичного мастила Літол-24 для підшипникових

вузлів. Для гарантування безпеки праці ідентифіковано ключові виробничі фактори - термічні ризики розплаву сталі (понад 1500 °С), небезпеку від обертових частин приводу та токсичних аерозолів, для захисту від яких передбачено екранування, аспірацію, ЗІЗ. У частині цивільного захисту регламентовано чіткі інструкції та алгоритми дій операторів у разі виникнення локальної пожежі, аварійного знеструмлення агрегату ВРП або при оголошенні сигналу «Повітряна тривога».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Смирнов О. М., Куберський С. В., Верьовкін О. В. Безперервне розливання сталі : навч. посіб. Донецьк : ДонНТУ, 2011. 418 с.
2. Розвиток чорної металургії України: сучасні виклики та перспективи : монографія / за ред. О. В. Грищенка. Дніпро : Пороги, 2022. 284 с.
3. Steel Statistical Yearbook 2024 / World Steel Association. Brussels : worldsteel, 2024. 124 p.
4. Ghosh A. Secondary Steelmaking: Principles and Applications. Boca Raton : CRC Press, 2019. 314 p.
5. Cramb A. W. The twin roll casting of steel: an historical perspective. *Iron & Steelmaker*. 1999. Vol. 26, No. 2. P. 45–53.
6. Campbell P., Mahapatra R., Blejde W. The Castrip technology: Commercial production of ultra-thin cast strip (UCS) steel. *Iron and Steelmaker*. 2002. Vol. 29, No. 3. P. 43–49.
7. Twin-Roll Casting of Steels : Principles and Technologies / ed. by Ch. Ji, M. Zhu. Cham : Springer, 2022. 245 p.
8. Pater Z. Analysis of the Three-Roll Rolling Process for Manufacturing Cross-Wedge Rolled Parts. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 24. Article 7620. P. 1–15.
9. Lenard J. G. Primer on Flat Rolling. 2nd ed. Oxford : Elsevier, 2014. 382 p.
10. ДСТУ 4722:2007. Алюміній і алюмінієві сплави деформівні. Марки. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 18 с.

11. Максименко О. П. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія процесів ОМТ». Частина ІІ. Елементи теорії прокатного виробництва. Кам'янське : ДДТУ, 2016. URL: https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/26/5-26-kl64.pdf (дата звернення: 29.04.2026).

12. Ткаченко Е. А., Мороз Б. С. Дослідження контактного тертя при гарячій прокатці алюмінієвих сплавів. *Збірник наукових праць Донбаської державної машинобудівної академії*. 2015. № 2 (35). URL: http://www.dgma.donetsk.ua/science/zbornik.html (дата звернення: 29.04.2026).

13. Маліновський А. О. Загальна електротехніка : підручник. Львів : Бескид Біт, 2011. 320 с.

14. Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник. Львів : Афіша, 2008. 560 с.

15. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин : підручник. Київ : Наукова думка, 2002. 662 с.

16. Bhushan B. Introduction to Tribology. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. 744 p.

17. Редуктор Ц2-350 : технічні характеристики, габаритні та приєднувальні розміри. *АИР.УА : інтернет-каталог промислового обладнання*. URL: https://аир.com.ua/uk/reduktory/ts2-350/ (дата звернення: 04.05.2026).

18. Редуктор 2Ч-40 : технічні характеристики, габаритні та приєднувальні розміри. *АИР.УА : інтернет-каталог промислового обладнання*. URL: https://аир.com.ua/reduktory/2ch-40/ (дата звернення: 29.06.2026).

19. Охорона праці в галузі : підручник / за ред. А. П. Огурцова. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 357 с.

20. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. — 3-тє вид., переробл. і доповн. — Львів : Афіша, 2006. — 352 с.

21. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 7-е вид. / М-во енергетики та вугільної промисловості України. Харків : Форт, 2017. 755 с.

22. ДСТУ Б В.1.1-36:2015. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Київ : Мінрегіон України, 2015. 66 с.

ПЕРЕЛІК ВИКОНАНИХ КРЕСЛЕНЬ

№ з/п	Найменування	Кіл. лис-тів	Фор-мат
1	Вид загальний установки ВРП	1	А2
2	Ливарно прокатна кліть	1	А1
3	Вісь робочого валка	2	А3
4	Шестерня конічна	1	А3
5	Бандаж Д50	1	А3

ДОДАТКИ