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 МАГІСТРА

На тему Дослідження експлуатаційних властивостей прокатних валків та систем їх охолодження.

Виконав: магістрант групи 8.1334

Куніцин В. О.
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма
Металургійне обладнання
(шифр і назва)

Керівник Шейко С.П.
(прізвище та ініціали) (підпис)

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

Запоріжжя – 2025 року

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра металургійного обладнання

Рівень вищої освіти магістр
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Спеціалізація
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Металургійне обладнання
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою А.О. Власов

_____

“____”_____20___ року

Завдання
до випускної кваліфікаційної роботи магістра

Куніцина Валерія Олександровича
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження експлуатаційних властивостей прокатних валків та систем їх охолодження
керівник кваліфікаційної роботи канд.техн.наук., професор Шейко С.П.,
затверджені наказом вищого навчального закладу від “19“ вересня 2025 року № 1305-с.
2. Строк подання студентом магістерської роботи 09 грудня 2025 року.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи техніко-економічні показники роботи прокатного цеху
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Огляд науково-технічних рішень підвищення роботоздатності робочих клітей та обґрунтування обраного напряму роботи; 2. Розрахункова частина; 3. Дослідно-експериментальна частина; 4. Охорона праці та техногенна безпека в галузі. Загальні висновки та рекомендації
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень): 1. Загальний вид реверсивного стану «1680» – 1А1; 2. Робоча кліть реверсивного прокатного стану 1680 – 1А1; 3. Системи охолодження валків та приклади виходу з ладу валка від перегріву – 1А1; 4. Імітаційне моделювання роботи цільнокованного прокатного валка – 1А1 5. Імітаційне моделювання роботи складеного прокатного валка із фіксацією бандажа напівбуртом – 1А1; 6. Імітаційне моделювання роботи складеного прокатного валка із фіксацією бандажа конічними втулками – 1А1.

6. Консультанти кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Шейко С.П., канд.техн.наук, професор		
2	Шейко С.П., канд.техн.наук, професор		
3	Шейко С.П., канд.техн.наук, професор		
4	Шейко С.П., канд.техн.наук, професор		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційої роботи	Примітки
1	Збір матеріалу на кваліфікаційну роботу	29.05.2025 – 25.06.2025	
2	Групування та аналіз зібраного матеріалу. Уточнення завдань кваліфікаційної роботи	01.09.2025 – 17.09.2025	
3	Виконання теоретичної частини кваліфікаційної роботи	18.09.2025 – 18.10.2025	
4	Виконання графічної частини кваліфікаційної роботи	19.10.2025 – 19.11.2025	
5	Написання та оформлення пояснювальної записки	20.11.2025 – 30.11.2025	
6	Перевірка кваліфікаційної роботи консультантами	01.12.2025 – 03.12.2025	
7	Попередній захист	09.12.2025	
8	Переплітання пояснювальної записки	Згідно з графіком	
9	Захист	Згідно з графіком	

Здобувач _____ Куніцин В.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційої роботи _____ Шейко С.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Куніцин В.О. Дослідження експлуатаційних властивостей прокатних валків та систем їх охолодження.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальність 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник С.П. Шейко. Запорізький національний університет, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра металургійного обладнання, 2025.

Проаналізовані переваги та недоліки наявних технічних рішень спрямованих на конструктивне удосконалення основного робочого інструменту прокатного стану – валків. Запропоновано варіант конструктивного удосконалення робочого валка реверсивного прокатного стану. Проведено аналіз виробничих факторів впливу на роботоздатність прокатних валків. Розроблено рекомендації щодо підвищення роботоздатності прокатних валків.

Ключові слова: ПРОКАТНИЙ СТАН, ОПОРНИЙ ВАЛОК, РОБОЧИЙ ВАЛОК, СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ

ABSTRACT

Kunitsyn V.O. Research into the Operational Properties of Rolling Rolls and their Cooling Systems.

Qualification final work for obtaining a higher education degree of a master's degree in specialty 133 - Industrial engineering, scientific adviser S.P. Sheyko. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni, Department of Metallurgical Equipment, 2025.

The advantages and disadvantages of existing technical solutions aimed at the constructive improvement of the main working tool of the rolling mill - rolls - are analyzed. A variant of the constructive improvement of the working roll of the reversing rolling mill is proposed. An analysis of production factors influencing the working capacity of rolling rolls is carried out. Recommendations for increasing the working capacity of rolling rolls are developed.

Keywords: ROLLING MILL, SUPPORT ROLL, WORKING ROLL, COOLING SYSTEM, MODELING

Зміст

Вступ 7
1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ РОБОЧИХ КЛІТЕЙ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ 9
1.1 Аналіз конструктивних особливостей робочої кліті прокатного стану 9
1.2 Загальна класифікація прокатних валків та систем їхнього охолодження 15
1.2.1 Класифікація прокатних валків за функціональним призначенням 16
1.2.2 Класифікація валків за конструкцією та матеріалу виготовлення 17
1.2.3 Технологічні особливості виготовлення валків 19
1.2.4 Класифікація за геометричними параметрами та формою профілю валків 21
1.2.5 Системи охолодження прокатних валків 22
1.3 Аналіз та обґрунтування обраного напряму досліджень 23
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА 29
2.1 Огляд і аналіз конструктивних особливостей робочої кліті реверсивного стану 1680 29
2.2 Розрахунок потужності приводу реверсивного стану 1680 31
2.3 Розрахунок робочого валка реверсивного прокатного стану на стійкість до деформацій 41
3 ДОСЛІДНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА 52
3.1 Аналіз впливу системи та методів охолодження на працездатність валків 52
3.2 Аналіз трудомісткості виготовлення складених (бандажованих) прокатних валків 59
3.3 Імітаційне моделювання практичного застосування складених валків у порівнянні з цільнокованним у системі 3D моделювання APM FEM 66
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ 83

4.1 Виявлення шкідливих факторів у листопрокатному виробництві та їхня оцінка 83
4.2 Електробезпека та заходи пожежної безпеки 87
4.3 Визначення ймовірності аварій та рекомендації щодо їхньої ліквідації 89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 94
ДОДАТКИ 103

Вступ

Прокатне виробництво є фінальним етапом технологічного ланцюга металургійної промисловості, який забезпечує виготовлення широкого асортименту металопродукції, що використовується в різних секторах економіки. Якість і продуктивність прокатного процесу значною мірою залежать від експлуатаційних властивостей прокатних валків, які є основними робочими елементами прокатних станів. Валки зазнають значних механічних, термічних і хімічних навантажень, що призводить до їх зношування, деформації та втрати ефективності. Одним із ключових факторів, що впливають на довговічність і продуктивність валків, є ефективність систем їх охолодження, які забезпечують стабільність температурного режиму та зменшують термічну деградацію матеріалу.

В умовах інтенсивної експлуатації валки піддаються значним механічним, термічним та контактним навантаженням, що зумовлює складний характер їхнього зношування. Основними факторами, які впливають на зменшення ресурсу валків, є неоднорідність матеріалу, втомні пошкодження поверхневого шару, термічні тріщини, корозійно-механічне руйнування, а також технологічні особливості процесу прокатки. У зв’язку з цим особливої актуальності набуває завдання комплексного дослідження експлуатаційних властивостей прокатних валків з метою підвищення їхньої довговічності та ефективності використання в реальних виробничих умовах.

Важливим напрямом удосконалення прокатного інструменту є застосування нових матеріалів і технологій виготовлення валків. Одним з найбільш перспективних методів в даному напрямі є розроблення нових конструкцій прокатних валків, а саме бандажованих, які поєднуть переваги відносно м’якої та пружної сердцевини-вала та зносостійкість поверхневої оболонки-бандажу. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування нових типів валків, визначення оптимальних умов їх експлуатації та створення систем технічної діагностики стану валкового інструменту.

Мета і задачі дослідження. підвищення ефективності роботи прокатних валків шляхом дослідження їх експлуатаційних властивостей, аналізу факторів, що впливають на зношування, та розроблення рекомендацій щодо підвищення довговічності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз конструктивних особливостей та матеріалів прокатних валків;
- дослідити вплив технологічних параметрів охолодження на знос і пошкодження робочої поверхні валків;
- виконати оцінку експлуатаційних характеристик валків за результатами теоретичних розрахунків;
- розробити практичні рекомендації щодо підвищення ресурсу прокатних валків.

Предмет дослідження – закономірності зміни експлуатаційних властивостей валків залежно від конструктивних, матеріальних і технологічних факторів

Об'єкт дослідження – процес взаємодії прокатних валків з металом під час прокатки, що визначає умови їхнього зношування.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідалися на: І Міжнародній науково-практичній конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні (09–10 травня 2024 року). Опубліковані тези доповіді.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи включає 110 сторінок, у тому числі 94 сторінки основного тексту, 23 рисунки, 5 таблиць, 71 найменування використаних джерел на 9 сторінках, 7 додатків.

Робота виконана на кафедрі металургійного обладнання, інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні, Запорізького національного університету.

1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ РОБОЧИХ КЛІТЕЙ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ

1.1 Аналіз конструктивних особливостей робочої кліті прокатного стану

Робоча кліть прокатного стану є ключовим елементом обладнання в металургійній промисловості, що забезпечує процес пластичної деформації металу для отримання готової продукції, такої як листи, профілі чи труби. Конструктивні особливості робочої кліті визначають ефективність прокатки, точність розмірів продукції, стійкість обладнання до навантажень та довговічність. Аналіз цих особливостей охоплює як технічні аспекти удосконалення прокатних станів, так і сучасні методи діагностики та моделювання [1].

Робочі кліті прокатних станів класифікуються за кількістю валків, їх розташуванням, режимом роботи та призначенням [2].

Згідно виконаного аналізу роботою [3], до основних типів робочих клітей можно віднести:

– двовалкові (дуо) кліті (рисунок 1.1): складаються з двох валків, розташованих один над одним. Переважно використовуються в дрібносортових та обтискних станах, таких як блюмінги та слябінги, для попередньої прокатки зливків. Переваги: простота конструкції, висока міцність. Недоліки: значний прогин валків під навантаженням, що обмежує точність прокатки тонких листів;

– тривалкові (тріо) кліті [4], до них також відносяться прокатні стани типу тріо Лаута [5]: мають три валки в горизонтальній площині, де середній валок є робочим для обох напрямків. Застосовуються в реверсивних станах для середньої прокатки та в контексті холодної прокатки забезпечують покращену стабільність перетікання технологічного процесу порівняно з дуо;

– чотиривалкові (кварто) кліті (рисунок 1.2): на сьогодні найпоширеніший тип для листових станів. Складаються з двох робочих валків меншого діаметра

та двох опорних валків більшого діаметра, розташованих у вертикальній площині. Прокатка відбувається між робочими валками, а опорні зменшують прогин, забезпечуючи високу точність. Так роботою [4], наведено приклад застосування такого типу клітей застосовуються в станах гарячої (наприклад, 2800) та холодної прокатки. При цьому наведено детальний опису введення в експлуатацію стану 2800 з кварто-кліттю, де діаметр робочих валків не перевищує 500 мм, що ускладнює індивідуальний привод, але при цьому значно підвищує жорсткість системи.

– багатовалкові кліті [6]: З шістьма, дванадцятьма чи двадцятьма валками, де більшість є опорними. Використовуються для холодної прокатки тонких листів, дозволяючи малі діаметри робочих валків (для точності) без значного прогину. Джерело 6 зазначає їх застосування в реверсивних тонколистових станах.

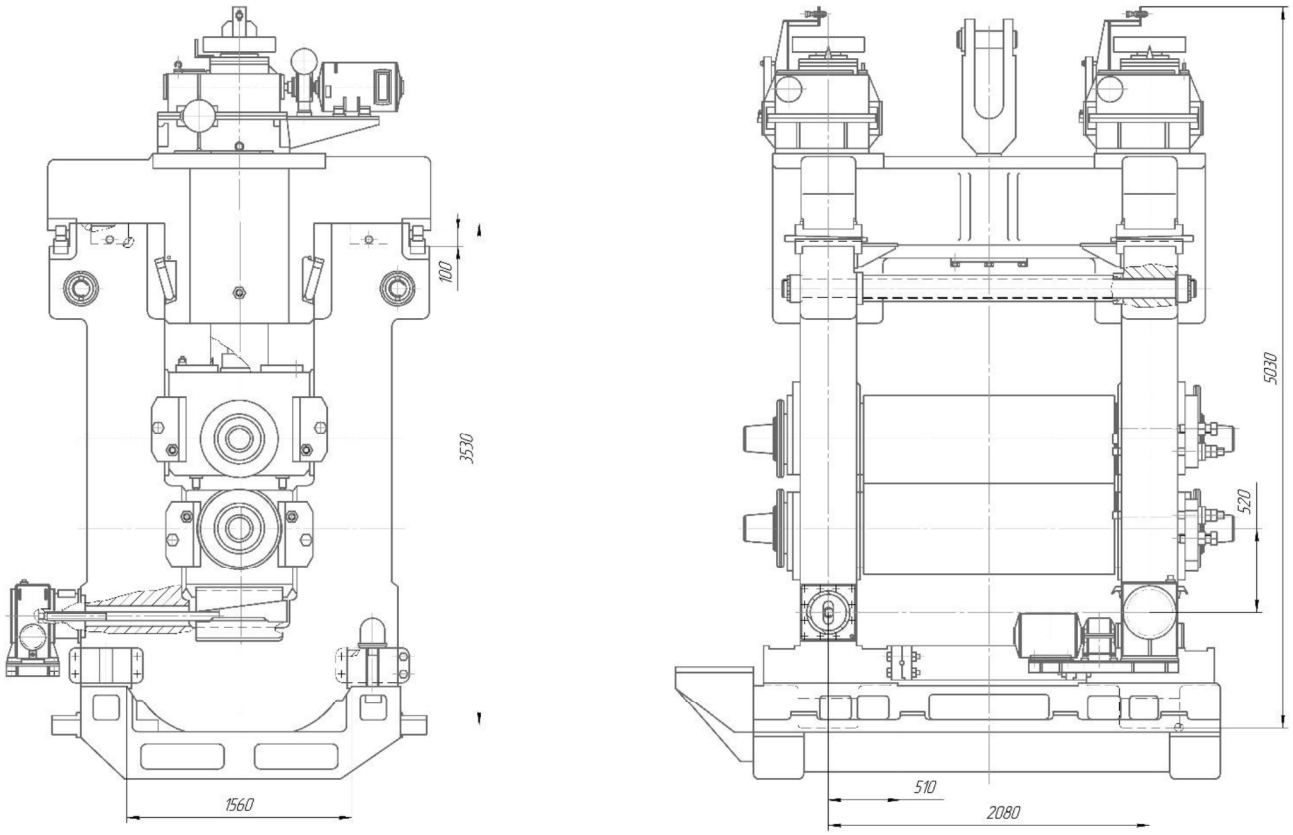


Рисунок 1.1 – Загальний вид кліті дуо прокатного стану 500

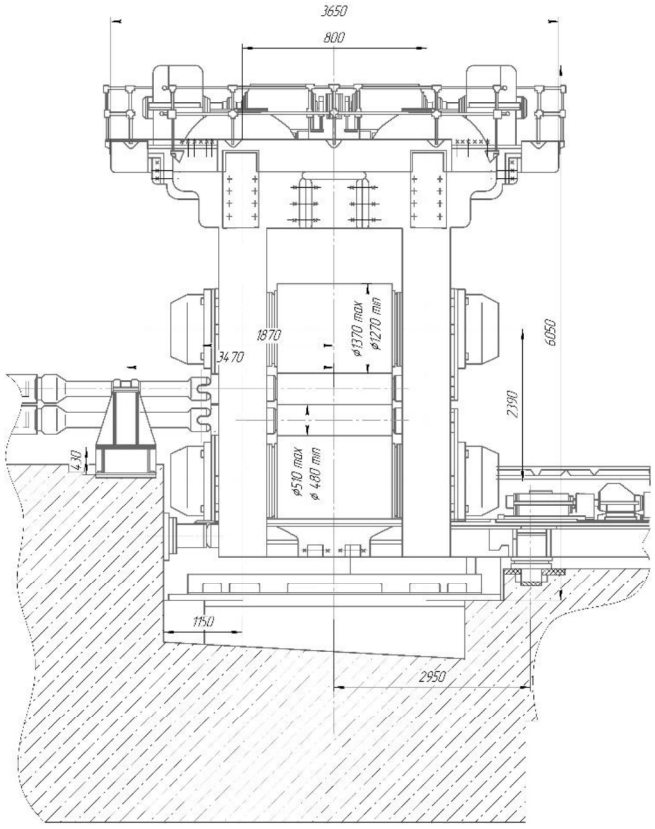


Рисунок 1.2 – Загальний вид кліті кварто прокатного стану 1680

За розташуванням робочих валків валків кліті діляться на [7]:

– горизонтальні (основні для листової прокатки);
– вертикальні (для бічного обтиснення, наприклад, у слябінгах) та універсальні.

За режимом роботи [8]:

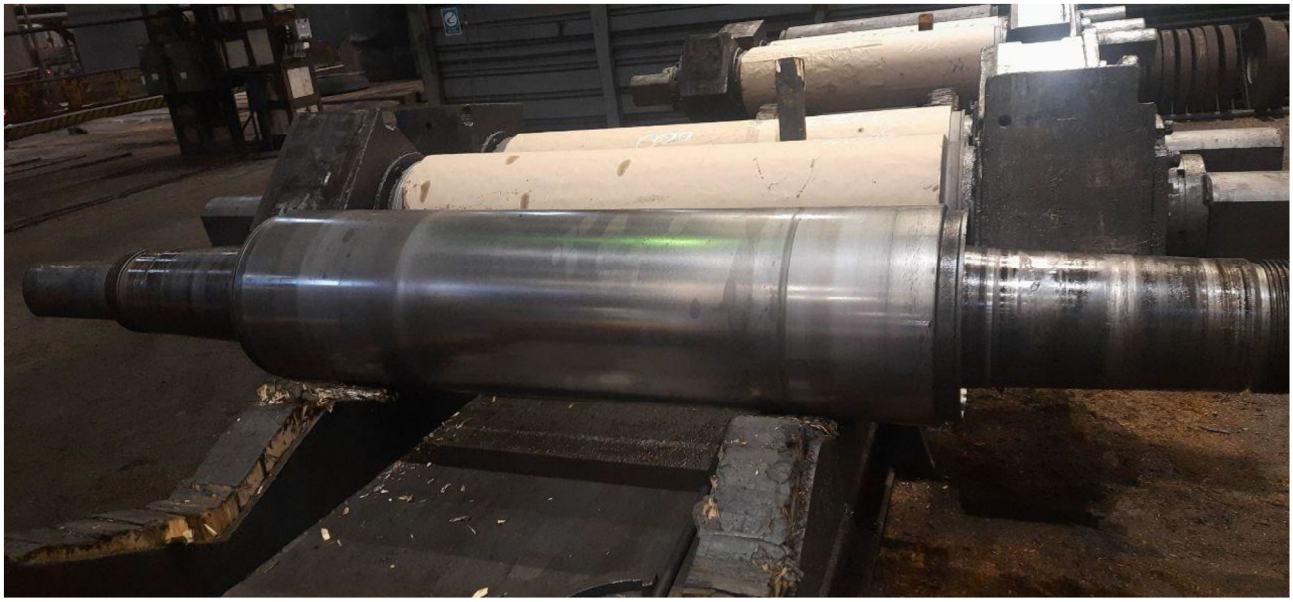
– реверсивні (зворотний рух) та нереверсивні;
– безперервні чи напівбезперервні.

Типова конструкція будь якої робочої кліті прокатного стану включає станину, валки, подушки, натискний пристрій, привід та допоміжне обладнання [8-10].

Станина (корпус кліті) – основна несуча конструкція, що утримує елементи та витримує зусилля до кількох тисяч тонн. Згідно з [10], станина складається з двох вертикальних стійок, з'єднаних поперечинами. Матеріал – чавун або сталь високої міцності. У кварто-клітях станина забезпечує жорсткість для зменшення

вібрацій. Роботою [9] станини класифікуються як ключовий елемент у каталозі машин, з акцентом на модульність для ремонту.

Основним виконавчим елементом прокатної кліті є робочі валкі, які безпосередньо контактують з металом, а для забезпечення їхньої жорсткості використовуються опорні валки. У кварто-клітях робочі валки мають діаметр 300-500 мм, опорні – 800-1500 мм (рис.1.3). Матеріали: легована сталь з хромом для зносостійкості.



а



б

Рисунок 1.3 – Загальний вигляд робочого (а) та опорного (б) валків прокатноїкліті стану 1680

Підшипникові вузли, що утримують валки в станині при одночасному їхньому обертанні, називають подушками дозволяючи обертання. Підшипникові вузли можуть базуватися як на підшипниках кочення так і на гідродинамічних підшипниках. Подушки розміщують у вікнах станини, з можливістю вертикального переміщення для регулювання зазору [10]. Варто відзначити, що подушки є критичними для діагностики, оскільки вібрації в них вказують на знос [11, 12].

Для регулювання зазору між валками слугує такий пристрій як натискний механізм. Може бути гвинтовим (електромеханічним) або гідравлічним. Від роботоздатності і конструктивного виконання натискного механізму залежить продуктивність проктаного стану в цілому, так у станах 2800 завдяки їхній оптимізації забезпечується обтиснення до 50 мм товщини листа [4].

Привод кліті можливий як груповий (через шестеренну кліть) так і індивідуальний індивідуальний. Потужність двигунів – до кількох МВт для гарячої прокатки. Джерело 6 вказує на використання шпинделів з шарнірами Для компенсації переміщень використовують шпинделів з шарнірами, так звані – універсальні шпинделі [10].

До допоміжного обладання відносять: рольганги, маніпулятори, кантувачі, ножиці [11]. Допоміжне обладнання перетворює прокатний цех на складноінтегрований та автоматизований комплекс. Воно забезпечує ритмічність виробництва, точність і якість кінцевої продукції, безпеку персоналу та загальну економічну ефективність процесу. Без нього сучасне масове прокатне виробництво неможливе.

Як вже було сказано вище, найбільш розповсюджена конструкція прокатних клітей – чотиривалкова, яка зменшує деформацію валків, дозволяючи прокатку тонких листів [14]. До суттєвих переваг варто віднести – зниження прогину робочих валків опорними, висока точність прокатки (±0,1 мм). Недоліки: складність регулювання, чутливість до асиметрії. Так в дослідженні [15] вказується, що співвідношення жорсткостей $\zeta_k = k1/k2$, яке викликає асиметрію циклу, впливає на стабільність, оптимальним є співвідношення $\zeta_k =$

1,247, яке максимізує критичну швидкість прокатки. У разі перевищення цього покеазника асиметрія викликає вібрації, а саме для малих відхилень – зворотного напрямку (друга модальна частота ~124,8 Гц), для великих – однакового напрямку (перша модальна частота ~92,7 Гц). Це призводить до самозбуджених вібрацій, погіршуючи якість продукції, а в деяких випадках і до резонансних явищ, що викликає аварійний вихід з ладу обладнання [16].

Історичний розвиток прокатних клітей можна умовно поділити на два етапи. У перший, до 1960-х років, основну увагу приділяли підвищенню міцності станини та покращенню балансування валків. Роботи [4, 14] заклали основу для створення багатороликових схем і запровадження швидкозмінних валкових систем. Роботи в цьому напрямі не зупиняються та мають своє логічне продовження в дослідженнях практиків прокатчиків [17].

Другий етап, який отримав бурхливий розвиток починаючт 90-х років минулого століття, характеризується впровадженням цифрових систем моніторингу та адаптивного керування, що дозволяють регулювати положення валків у реальному часі залежно від вимірюваних зусиль, вібрацій та температури. За результатами досліджень [11, 12, 18, 19], сучасні методи діагностики дозволяють виявляти дисбаланси або зазори на ранніх етапах експлуатації, що суттєво знижує ризик аварій. Зокрема в роботі [18] запропоновано методи діагностики в перехідних режимах, моніторячи вібрації для виявлення асиметрії в подушках та станині.

Не менш важливим критичним елементом будь якого прокатного стану є робочий валок, який безпосередньо контактує з металом і здійснює деформацію. Його конструкція (включаючи матеріал, геометрію, розміри, міцність та жорсткість) напряму визначає:

– точність прокатки – жорсткість валка – здатність протистояти вигину під дією значних робочих навантажень і визначає, наскільки рівномірною буде товщина готового листа чи профілю;
– якість поверхні – матеріал, твердість та стан робочої поверхні валка безпосередньо впливають на поверхню готової продукції;

– енергосилові параметри – діаметр валка є одним з головних чинників, що впливають на силу прокатки, момент та необхідну потужність приводу;
– стійкість та довговічність – конструкція валка та правильний вибір матеріалу забезпечують його зносостійкість, опір термічним ударам (при гарячій прокатці) та запобігають руйнуванню.

Таким чином постає актуальне питання дослідження експлуатаційних властивостей прокатних валків, які є вирішальними факторами при формуванні готової продукції на прокатному стані.

1.2 Загальна класифікація прокатних валків та систем їхнього охолодження

Прокатні валки є одним із найвідповідальніших елементів конструкції прокатного стану, оскільки саме вони безпосередньо контактують із металом, що деформується, і визначають якість, точність та геометрію готового прокату. Валки сприймають значні навантаження — як статичні, так і динамічні, що виникають у процесі пластичної деформації металу при змінних температурах і тисках. Від надійності, конструкції та стану поверхні валків залежить не лише стабільність процесу прокатки, а й ресурс усієї кліті прокатного стану [20-22].

У сучасних прокатних агрегатах валки виконують декілька функцій одночасно: передають деформуюче зусилля на метал, формують профіль штаби, забезпечують необхідну товщину та якість поверхні прокату, а також беруть участь у регулюванні розподілу напружень і температурного поля у зоні деформації [20, 23]. Тому до них висуваються високі вимоги щодо міцності, зносостійкості, термостійкості, стійкості до термічних тріщин та втомного руйнування [24, 25].

Еволюція конструкцій валків безпосередньо пов’язана з розвитком теорії прокатки металів і підвищенням продуктивності станів. Зі збільшенням швидкостей прокатки та навантажень зростає потреба у використанні нових матеріалів, удосконалених профілів поверхні та оптимізованих систем

охолодження [21, 25, 26]. Таким чином, вивчення класифікації валків, їх матеріалів і способів охолодження є визначальним для розуміння ефективності роботи сучасних прокатних ліній.

1.2.1 Класифікація прокатних валків за функціональним призначенням

Класифікація прокатних валків здійснюється за кількома ознаками, серед яких основною є функціональне призначення в кліті прокатного стану. За цією ознакою валки поділяють на робочі, опорні (рис.1.2), проміжні, а також спеціальні або допоміжні [22, 27, 28].

Робочі валки безпосередньо контактують з металом у процесі деформації. Вони визначають якість поверхні готової продукції та розподіл тиску в осередку деформації. Для гарячої прокатки використовують валки з великою термостійкістю, а для холодної – з підвищеною твердістю робочого шару [20, 29]. Сучасні дослідження показують, що твердість робочої поверхні повинна поєднуватися з достатньою в’язкістю серцевини, аби уникнути тріщиноутворення під дією циклічних термічних напружень [24, 30, 31].

Опорні валки призначені для сприйняття реактивних навантажень, що передаються від робочих валків, і забезпечення стабільності їх положення. Такі валки зазвичай мають великі діаметри й виготовляються з в’язкіших матеріалів. Вони не контактують безпосередньо з металом, проте їхня поверхня піддається втомному зносу та деформаціям через багаторазові цикли навантажень [25, 32]. Як зазначено в роботі [25], навіть опорні валки схильні до процесів наклепу, що впливають на стабільність параметрів прокатки.

Проміжні валки використовуються у багатовалкових схемах (наприклад, у шестивалкових або кластерних клітях) для зменшення прогину робочих валків і підвищення точності прокатки [33, 34]. Залежно від схеми стану, валки можуть мати додаткові пристрої регулювання профілю, такі як CVC (Continuous Variable Crown) (рис.1.4) або системи зміщення осей [34-38].

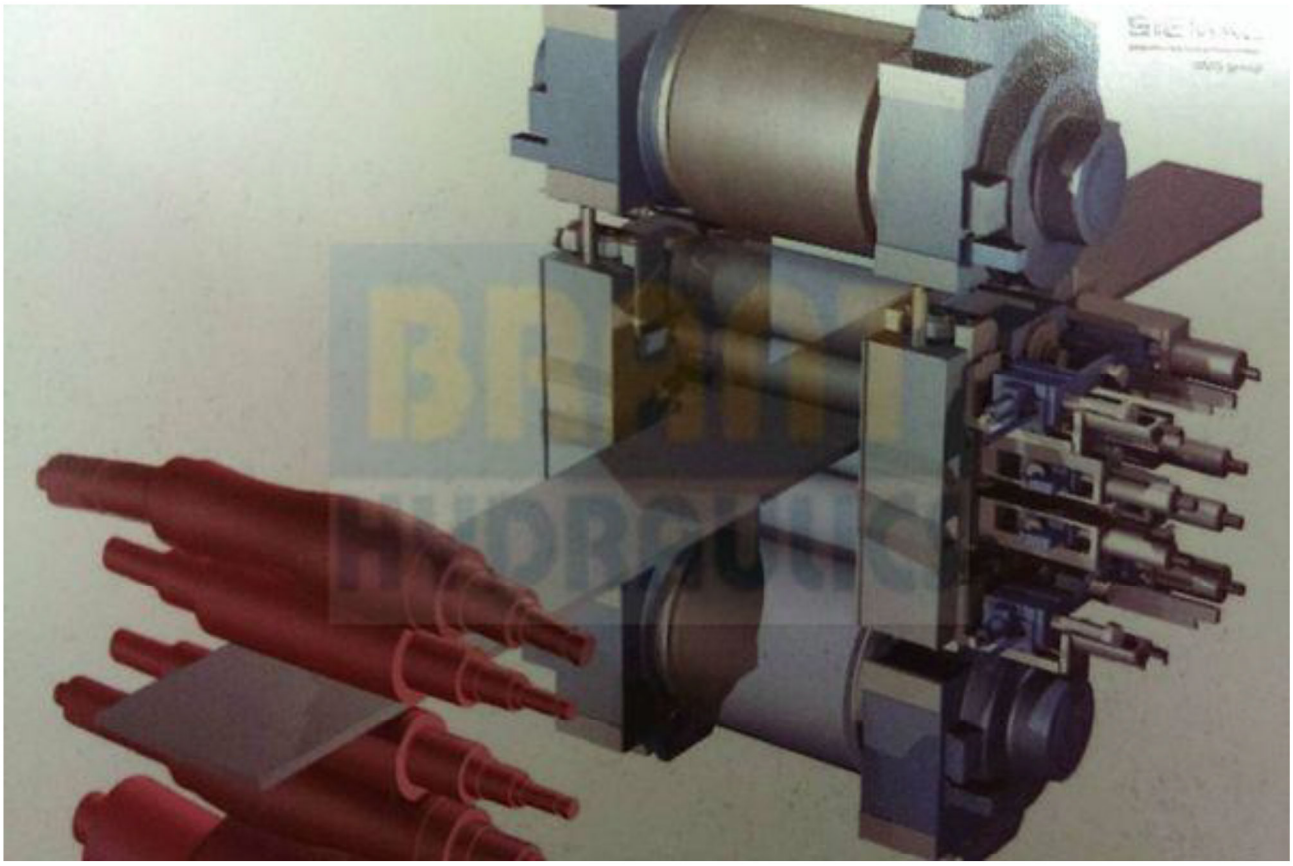


Рисунок 1.4 – Блок згинання та зсуву системи безперервно змінного вінця фірми BRANT HYDRAULICS [34]

Окремо виділяють валки спеціального призначення, які застосовуються у калібрувальних, формувальних або обтискних клітях для профільного прокату, а також у станах для дрібносортного та фасонного металу [28]. Їх геометрія суттєво відрізняється від валків для листового прокату і потребує високої точності виготовлення.

1.2.2 Класифікація валків за конструкцією та матеріалу виготовлення

За конструкцією прокатні валки поділяються на суцільні (монолітні), складені (композитні) та біметалеві. Така класифікація визначається технологією виготовлення і способом поєднання робочої поверхні з тілом валка [29, 39, 40].

Суцільні валки виготовляють із цільного литого або кованого матеріалу

переважно із легованої сталі чи високоміцного чавуну. Вони простіші у виробництві, проте мають обмеження за поєднанням властивостей: висока твердість призводить до крихкості, а підвищена в'язкість – до швидшого зносу [20, 23].

Складені валки характеризуються тим, що робоча оболонка (гільза) і сердечник виконані з різних матеріалів. Це дозволяє поєднати у виробі високу зносостійкість поверхневого шару з в'язкістю і міцністю основи [24, 39]. Типовими є комбінації «високолегований чавун + сталь» або «вискошвидкісна сталь (HSS) + ковкий чавун» [40]. Сучасні методи, такі як електрошлакове наплавлення або наплавлення порошковими дротами, забезпечують міцне з'єднання між шарами [30, 40].

Біметалеві валки отримали широке застосування внаслідок розвитку технологій комбінування різнорідних матеріалів. Роботами [40, 41] акцентується увага на тому, що ефективним методом є вибухове зварювання, яке дозволяє утворити надійне зчеплення між основним металом (наприклад, сталлю) та покриттям з міді або алюмінієвих сплавів. Такі біметалеві конструкції використовують не лише для прокатних валків, але і для інших елементів, що працюють у складних умовах термомеханічного навантаження.

Отже залежно від матеріалу виготовлення, валки поділяють на такі основні групи [29]:

- чавунні валки – з перлітного, бейнітного, мартенситного або сфероїдального чавуну; застосовуються переважно в чорнових клітях гарячої прокатки;
- стальні валки – з вуглецевої, легованої або інструментальної сталі; мають більшу міцність і теплостійкість, використовуються у чистових клітях;
- вискошвидкісносталеві (HSS) валки – характеризуються високою твердістю (60–65 HRC) та стійкістю до термозношування; застосовуються в умовах високих швидкостей прокатки [20];
- комбіновані (композитні) валки – мають робочу поверхню з HSS або легованого чавуну та сталевий сердечник, що забезпечує оптимальне

співвідношення властивостей.

Підбір матеріалу валків здійснюється з урахуванням типу стану, температурного режиму, величини деформації та вимог до поверхні готової продукції [29, 42, 43]. Згідно з рекомендаціями [29], вибір матеріалу також залежить від швидкості охолодження, твердості поверхні, мікроструктури (графіт, карбіди, мартенсит) та типу обробки після лиття або наплавлення. Матеріали, які використовуються для виготовлення прокатних валків, з їхніми недоліками та перевагами наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні матеріали для виготовлення прокатних валків

Матеріал	Твердість, (по Шору)	Застосування	Переваги
Сірий чавун	30–50	Чистові валки	Стійкість до тріщин
Білий чавун	55–75	Гаряча прокатка штаби	Баланс зносу та міцності
Кована сталь (60CrMnMo)	24–100	Чорнові та опорні	Висока міцність
HSS	60–90	Чистові валки	Висока зносостійкість
Вольфрам-карбід	80–95	Спеціальні	Точність прокатки

1.2.3 Технологічні особливості виготовлення валків

Технологія виготовлення прокатних валків суттєво впливає на їх експлуатаційні характеристики, довговічність і стійкість до зношування. Основними методами є лиття, ковальське формування, електрошлакове

переплавлення та наплавлення, а також технології з’єднання шарів різнорідних матеріалів [22, 30, 40].

Литі валки залишаються найбільш поширеними завдяки можливості отримання складних профілів та високої точності розподілу легувальних елементів. При литті у форми використовують як чавуни (перлітні, бейнітні, мартенситні), так і сталі з різним ступенем легування. Подальша термообробка дозволяє регулювати мікроструктуру, утворюючи оптимальне співвідношення твердості й в’язкості.

Ковані валки характеризуються більшою щільністю та меншим вмістом дефектів порівняно з литими. Їх отримують із заготовок, підданих інтенсивному пластичному деформуванню. Такі валки мають підвищену міцність і використовуються переважно в чистових клітях гарячої та холодної прокатки [20, 22].

Сучасним напрямом є біметалеве виготовлення валків, при якому поєднуються два або більше матеріалів, що забезпечують оптимальні властивості. Метод електрошлакового наплавлення (ESR cladding) дозволяє формувати робочий шар з високошвидкісної сталі або легованого чавуну на сталевому осерді. Це значно підвищує ресурс валка, зменшуючи ризик відшарування [40].

Альтернативним методом є зварювання вибухом, яке використовується для з’єднання матеріалів із різними коефіцієнтами теплового розширення. Згідно з дослідженнями [41], зварювання вибухом забезпечує надійне з’єднання між шарами сталі й алюмінієвих або мідних сплавів без утворення значних зон термічного впливу. Це відкриває можливості створення легких біметалевих валків із високою теплопровідністю.

Вітчизняними дослідниками розроблено технології наплавлення заготовок робочих і опорних валків, що поєднують високу зносостійкість наплавленого шару з в’язкістю сталевого сердечника [30]. Застосування легованих порошкових матеріалів та плазмових джерел тепла дозволяє створювати робочі

шари з контрольованим розподілом твердих фаз (карбідів, боридів, оксидів), що підвищують стійкість валків до абразивного та термічного зносу.

Загалом, вибір технології виготовлення залежить від призначення валка, типу прокатного стану, температурних умов роботи та вимог до поверхні прокату [40, 42, 43].

1.2.4 Класифікація за геометричними параметрами та формою профілю валків

Одним із ключових аспектів проєктування валків є визначення їх геометричної форми – зокрема профілю робочої поверхні, який впливає на розподіл тиску, товщину та рівномірність смуги. Відхилення у формі призводять до виникнення дефектів типу «корона» або «крайова потовщеність» [31, 35].

Для компенсації цих ефектів застосовують спеціальні профілі робочої поверхні, такі як CVC (Continuous Variable Crown), Parabolic Crown, Concave-Convex тощо [33, 35, 36]. Сутність технології CVC (рис.1.4-1.5) полягає у створенні профілю валка у вигляді кривої третього порядку, що дозволяє регулювати розподіл тиску між валками шляхом осьового зміщення. Це забезпечує динамічне керування формою штаби під час прокатки [26, 33, 38].

Роботою [33] запропоновано систему автоматизованого керування осьовим зміщенням валків кластерного типу на основі принципу CVC. Така система дозволяє стабілізувати товщину прокату та зменшити вплив еластичних деформацій на якість продукції. Роботою [35] встановили залежність між радіусом кривизни профілю CVC та оптимальним значенням «корони» валка для різної товщини штаби.

Роботами [37, 38] запропоновано асинхронну стратегію осьового зміщення валків, яка передбачає незалежне регулювання положення верхнього та нижнього робочого валка. Це дозволяє ефективніше усувати асиметрію навантаження при гарячій прокатці та зменшити ймовірність утворення хвильових дефектів на поверхні штаби.

Розробки в роботі [32] довели, що оптимальне поєднання контурів опорних і робочих валків забезпечує рівномірний контакт і знижує градієнти контактних напружень. Таким чином, геометричні параметри валків є одним із ключових інструментів управління якістю прокату, зниження зношування та подовження їхнього терміну служби.

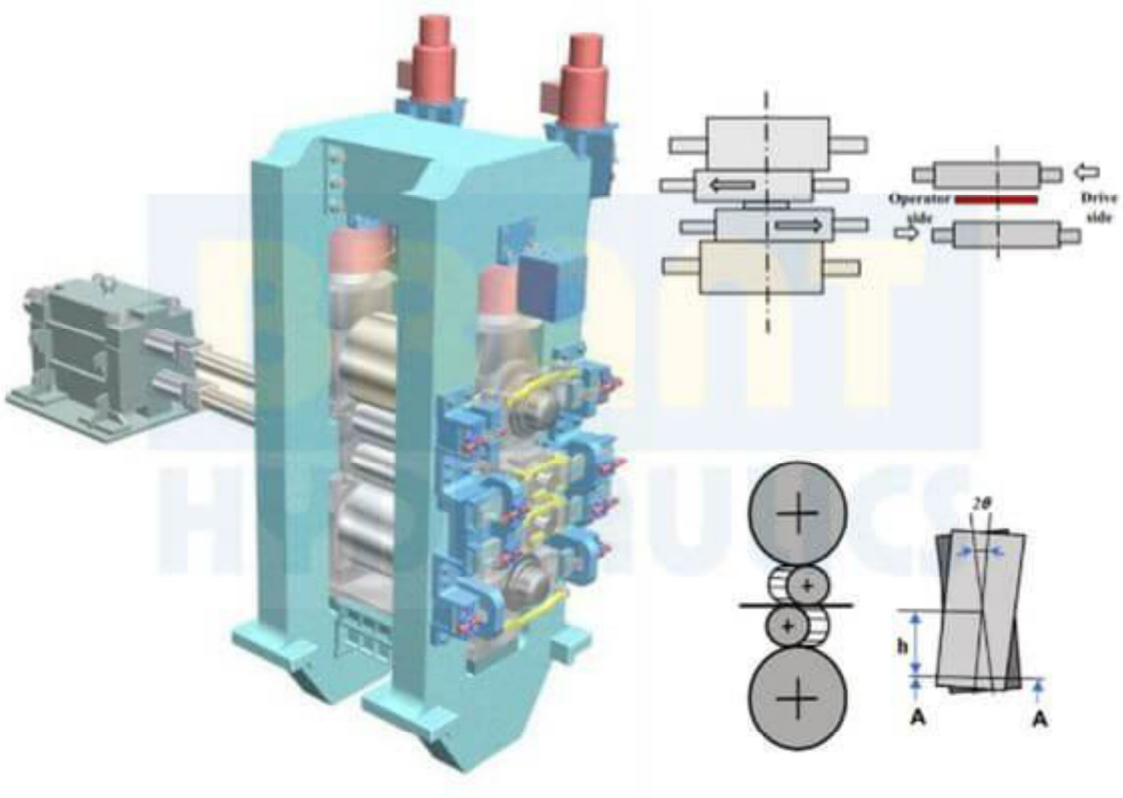


Рисунок 1.5 – Система гідравлічного зсуву робочих роликів WR (Work Roller) фірми BRANT HYDRAULICS [44]

1.2.5 Системи охолодження прокатних валків

Система охолодження валків виконує надзвичайно важливу функцію – підтримує температуру робочої поверхні в межах, що забезпечують стабільність мікроструктури, запобігають утворенню термічних тріщин і знижують рівень термонапружень [20, 21, 29].

Охолодження валків здійснюється шляхом подачі води або водоповітряної суміші через форсунки, розташовані у спеціальних колекторах над робочою

поверхнею валків. Система зазвичай складається з верхнього та нижнього колекторів, регулюючих клапанів, фільтраційних блоків і зворотних каналів відведення теплоносія [45].

Основними типами охолодження є:

- безперервне водяне охолодження, яке використовується у станах гарячої прокатки для відведення тепла, що виділяється під час контакту з розігрітим металом;
- пульсуюче охолодження, що застосовується у випадках, коли потрібно зменшити температурні градієнти між робочою зоною та шийками валка;
- диференційоване охолодження, при якому інтенсивність подачі води регулюється залежно від положення по довжині валка для компенсації нерівномірного нагрівання [29, 45].

Ефективність охолодження визначається параметрами струменів (тиск, кут розпилу, відстань до поверхні), швидкістю обертання валка та властивостями матеріалу робочого шару. Згідно з рекомендаціями LMM Rolls [29], інтенсивність охолодження повинна забезпечувати температуру поверхні не вище 120÷150 °C для HSS-валків і 90÷100 °C для чавунних валків, щоб уникнути термічного шокування.

У новітніх системах охолодження використовуються адаптивні схеми з автоматичним регулюванням витрати води, що базуються на даних термодатчиків і математичних моделей теплового стану валків [36]. Такий підхід дозволяє знизити витрати води, запобігти гідроерозії та забезпечити рівномірне охолодження по всій довжині контакту з металом.

1.3 Аналіз та обґрунтування обраного напряму досліджень

Валки – основний робочий інструмент прокатних станів, витрати на експлуатацію яких складають до 20 % від вартості переділу [46]. Будучи невід'ємною частиною клітей прокатних станів, валки приймають на себе зусилля прокатки, забезпечуючи необхідну якість прокату, продуктивність і

економічність прокатного стану.

Застосування методу бандажування істотно підвищує ефективність використання матеріалу валка, оскільки в балансі витрати бере участь, в основному, матеріал бандажа, а вісь валка використовується багаторазово. При трьох-п'яти кратному використанні осі видатковий коефіцієнт для бандажованного валка в 2-5 разів нижче, ніж цільнокований.

Складені (бандажовані) валки представляють собою конструкцію зі сталевого вала і бандажа. Основна перевага складених прокатних валків - можливість застосування для бандажів матеріалів високої зносостійкості.

Кована, і особливо високовуглецева лита структура, змінюється за рахунок термічної обробки і великої кількості легуючих елементів, забезпечує високу і рівномірну твердість і зносостійкість.

За вітчизняним і зарубіжним даними стійкість таких валків в 2-3 рази перевищує стійкість цільнокованих [47,48].

Також з точки зору організації охолодження валків складена конструкція є також досить перспективною, адже дозволяє в повній мірі організувати охолодження бандажу з внутрішньої сторони, таким чином омивання бандажу із зовнішньої та внутрішньої сторін дозволяє більш ефективно виконувати його охолодження.

Для конкретного прокатного стану важливий вибір раціонального способу з'єднання бандажа з валом з метою забезпечення надійності інструменту і швидкої зміні бандажа. За ступенем трудомісткості зміни бандажа різні способи з'єднань можна класифікувати наступним чином:

- нерозбірна фіксація бандажа на валу за рахунок лиття (двошарові валки);
- фіксація бандажа на валу за рахунок гарантованого натягу (пресові з'єднання, гаряча і холодна посадки за рахунок зміни розмірів бандажа або вала). Сюди відносяться також посадки зі збільшенням обсягу однієї з деталей, за рахунок фазових перетворень, а також шляхом деформації полого валу за рахунок тиску рідини в осьовому каналі;

- з'єднання бандажа з валом за допомогою клею, адгезійних матеріалів і гальванічних покриттів, що збільшують жорсткість стикового сполучення і його окремих ділянок при посадці бандажа з гарантованим натягом або зазором;
- фіксація бандажа на вал з гарантованим зазором за рахунок зварювання спеціальних кріпильних з'єднань і при застосуванні кріплення типу шпонок, шліцьових з'єднань, конусних втулок, клинових, фрикційних та інших замкових з'єднань;
- з'єднання бандажа з валом за рахунок спеціальної форми вала, що забезпечує передачу крутного моменту і згинаючих зусиль;
- з'єднання бандажа з валом з гарантованим зазором, що забезпечує передачу крутного моменту і згинаючих зусиль за рахунок виникнення при цьому сил тертя, що забезпечують нероз'ємного з'єднання в робочому стані при експлуатації.

З метою підвищення коефіцієнта надійності посадкової поверхні на зсув у зоні контакту між бандажем і гільзою, авторським колективом Новокраматорського машинобудівного заводу було розроблено конструкцію складеного прокатного валка, що має бандаж із циліндричною посадковою поверхнею, який охоплює гільзу зі зовнішніми циліндричною та криволінійною посадковими поверхнями (рис. 1.6) [49].

Відмінною рисою запропонованої конструкції є особливий характер з'єднань між елементами. Гільза з'єднується з бандажем посадкою з натягом величиною $\Delta_1 = 0{,}0009d$ на циліндричній ділянці, при цьому на криволінійних ділянках натяг поступово зменшується. Внутрішня циліндрична поверхня гільзи посаджена на вісь зі змінним натягом: у середній частині він становить $\Delta_2 = 0{,}0012d$, тоді як у зоні, наближеній до торця гільзи, збільшується до $0{,}0015d$. Тут d позначає посадковий діаметр бандажа.

Конструкція передбачає, що довжина циліндричних посадкових ділянок у з'єднанні бандаж–гільза має бути не меншою ніж $0{,}7L$, а у з'єднанні гільза-вісь – не меншою ніж $0{,}5L$, де L – загальна довжина бандажа. Посадкові поверхні

гільзи виконані таким чином, щоб забезпечити контрольовану зміну натягу на криволінійних ділянках: у з'єднанні бандаж-гільза інтенсивність зміни натягу становить $0{,}006\Delta_1$ поблизу зовнішньої циліндричної ділянки та $0{,}18\Delta_1$ – у зоні поблизу торця гільзи. Для з'єднання гільза-вісь ці показники дорівнюють відповідно $0{,}01\Delta_2$ біля внутрішньої циліндричної поверхні та $0{,}25\Delta_2$ поблизу торця.

При цьому допускається, щоб відхилення тисків на криволінійних ділянках гільзи та бандажа в областях, прилеглих до циліндричних поверхонь, не перевищувало $0{,}2q_б$ відносно тиску $q_б$ на циліндричних ділянках. Аналогічно, у зоні контакту гільзи з віссю поблизу торця гільзи допустиме відхилення тиску не повинне перевищувати $2q_г$ відносно тиску $q_г$ на відповідних ділянках [49].

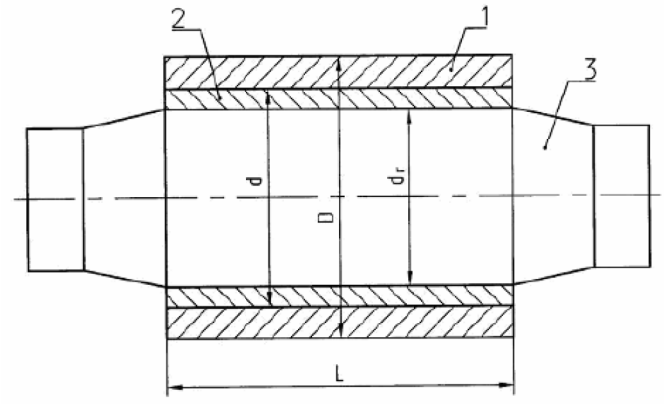


Рисунок 1.6 – Складений прокатний валок гільза з криволінійною посадочною поверхнею [49]: 1 – бандаж із циліндричною посадочною поверхнею; 2 – гільза з криволінійною посадочною поверхнею; 3 – вал.

З усього вище викладеного видно, що запропоноване рішення складеного прокатного валка відповідно до формули корисної моделі збільшує довжини циліндричних ділянок з'єднаних з натягом й оптимізує сили зчеплення між елементами валка, вирівнюванням тисків на посадочних поверхнях. При цьому така конструкція не є досконалою адже з часом експлуатації виникає порушення посадок, що значно впливає на точність прокатки.

Колективом кафедри металургійного обладанння розроблено власні

конструкції складених валків, які мають значно покращувати експлуатаційні характеристики [50, 51]. Так на рисунках 1.7 та 1.8 наведені конструкції бандажованих валків відповідно із закріплення бандажа напівбуртом та конічними втулками.

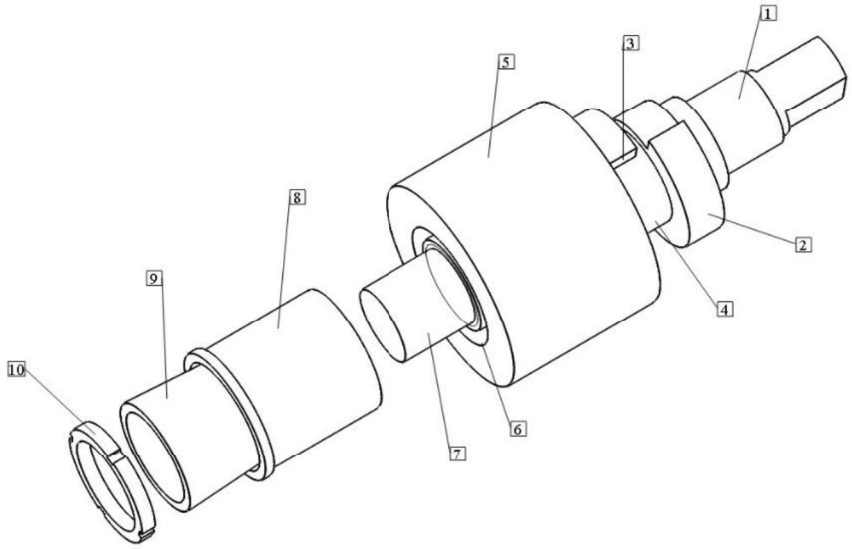


Рисунок 1.7 – Конструкція бандажованого валка з напівбуртом [50]: 1 – вісь; 2, 3 – напівбурти (сполучні ділянки); 4, 6 – посадочні поверхні; 5 – бандаж; 7 – різьбова ділянка; 8, 9 – розпірні втулки; 10 – настановний елемент

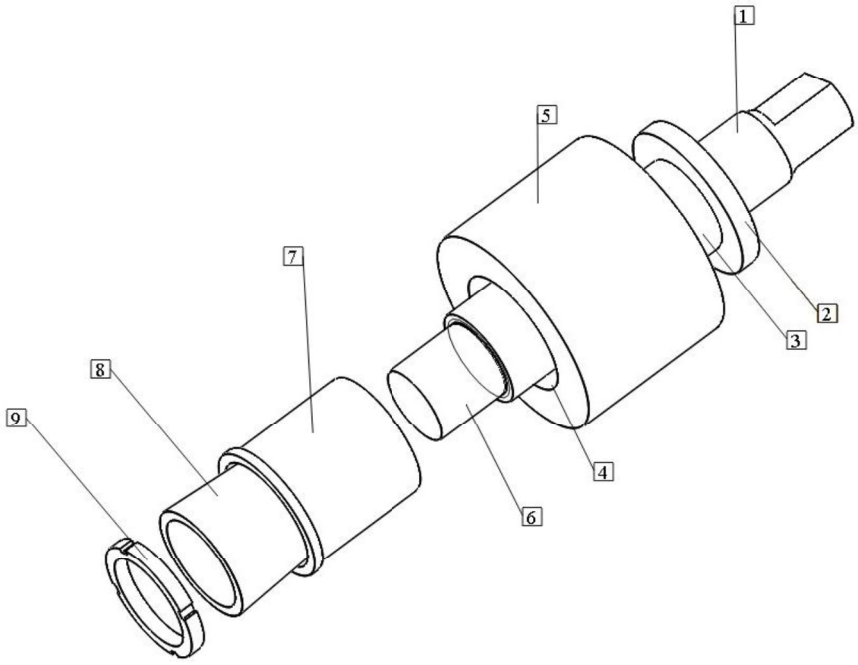


Рисунок 1.8 – Конструкція бандажованого приз’єднанні конічними втулками [51]: 1 – вісь; 2 – сполучна ділянка; 3 – центруюча ділянка; 4, 6 – посадочні поверхні; 5 – бандаж; 7, 8 – розпірні втулки; 9 – настановний елемент

Запропоновані конструкції є досить перспективними і не мають обмежень по використанню матеріалів для їхнього виготовлення.

Так зовнішня частина (бандаж) може бути виготовлена з високолегованого зносостійкого матеріалу (HSS, твердий чавун, карбідний сплав), а внутрішня частина (серцевина, вісь) — із більш в'язкого та пластичного матеріалу (ковкий чавун, сталь). Таке поєднання матеріалів дозволяє оптимізувати властивості валка під різні робочі навантаження.

Завдяки різниці у теплопровідності між бандажем і осердям знижується ризик термічних тріщин і викривлень. Так роботами [47, 48] відзначається, що під час гарячої прокатки температура поверхні бандажа може досягати 500÷600 °С, і композитна структура забезпечує зменшення термонапружень до 25–30 %. З іншого боку завдяки більш в'язкій серцевині валок краще поглинає ударні навантаження та коливання тиску металу у калібрі. Це знижує ймовірність виникнення підповерхневих тріщин і відшарування шару.

З точки зору економічної ефективності така конструкція дозволяє комбінувати різні сплави бандажу під конкретний технологічний процес, наприклад, для чорнової прокатки – зносостійкий чавун, а для для чистової – HSS або карбіди. Таким чином можливість локальної заміни матеріалів дає високу адаптивність до умов прокатки. Бандаж можна перевстановити або замінити, не виготовляючи новий корпус валка, що знасно скорочує час простоїв і витрати на обслуговування.

Варто враховувати, що впровадження у виробництво новиого конструктивного виконання прокатних валків є досить вартісною операцією, адже виготовлення експериментальної конструкції може коштувати декілька мілйонів гривень, при цьому не гарантуючи значний економічний ефект. Тому в таких випадках стає в нагоді для конструкторів-механіків методи імітаційного моделювання в спеціалізованих програмах, що як правило побудовані на принципах розрахунку методами скінчених елементів. Перевірка технологічності запропонованих конструкцій бандажованих валків цими методами і є основним напрямом даної кваліфікаційнї роботи.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Огляд і аналіз конструктивних особливостей робочої кліті реверсивного стану 1680

Робоча кліть реверсивного стана 1680 (рис. 1.2) призначена для прокатування та дресирування гарячекатаних штаб із легованих, якісних конструкційних і низьковуглецевих сталей.

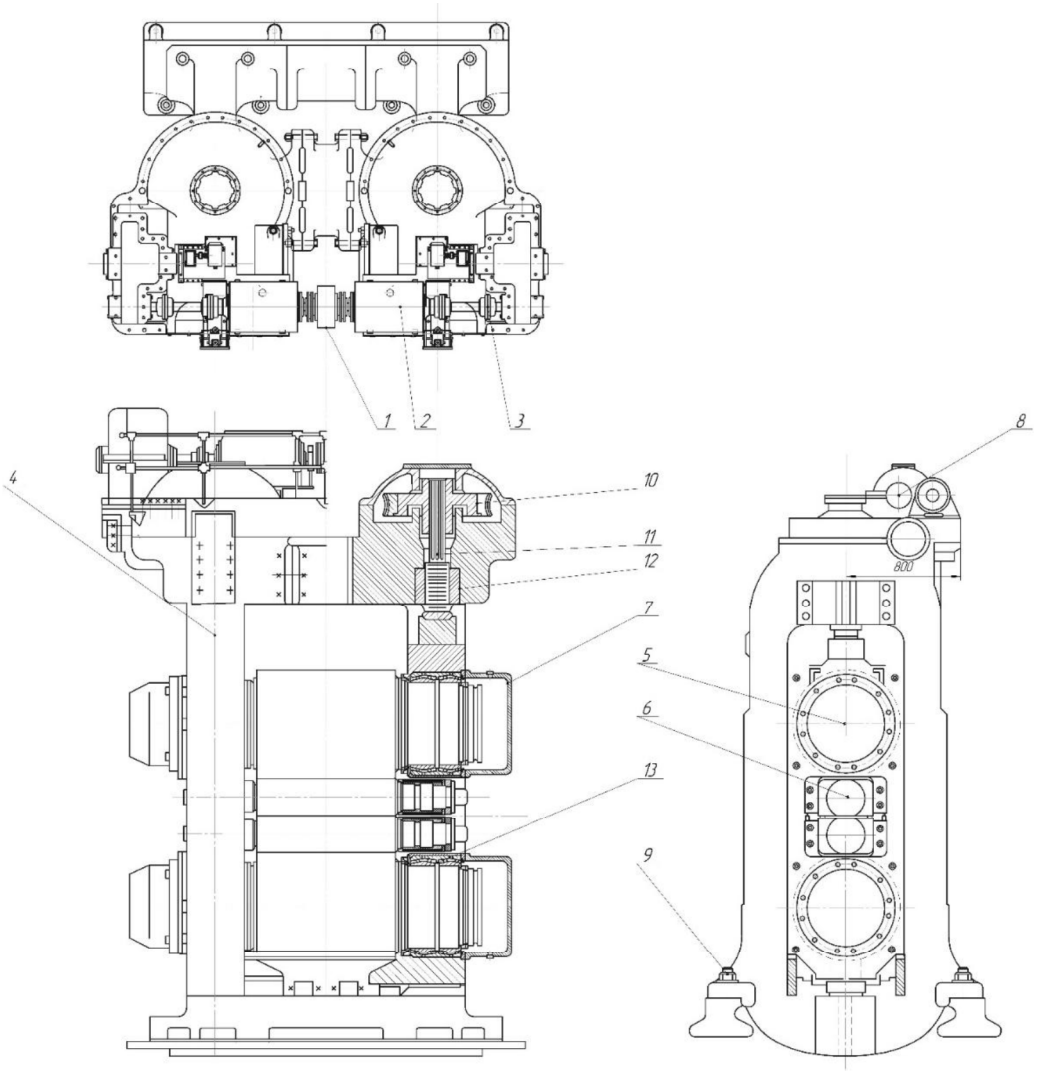


Рисунок 2.1 – Конструкція робочої кліті реверсивного стану 1680: 1 – електромагнітна муфта, 2 – електродвигун постійного струму, 3 – зубчаста муфта, 4 – станина, 5 – валок опорний, 6 – валок робочий; 7 – кришка, 8 – редуктор черв'ячний, 9 – анкерний болт, 10 – зубчасте колесо, 11 – натискний гвинт, 12 – гайка, 13 – роликові вальниці

Кліть закритого типу являє собою міцну конструкцію, що складається з двох литих станин, установлених на масивній плитовині та закріплених до фундаменту за допомогою анкерних болтів. Станини виготовлені з ливарної сталі марки Ст35Л і спроєктовані таким чином, щоб під час складання утворювати проміжні вікна шириною 1720 мм. Через ці вікна за допомогою спеціального перевалочного механізму здійснюється заведення комплекту опорних валків.

Опорні валки встановлюються в подушках із вальницями рідинного тертя, що забезпечує їх плавне обертання та зменшення втрат на тертя. Між опорними валками розміщуються робочі валки, змонтовані у власних подушках на чотирирядних конічних вальницях кочення, які гарантують високу точність центрування та стійкість під час навантаження.

Верхню частину кліті утворює підмоторна рама, на якій розміщені натискні механізми з гвинтовими передавальними елементами. Їх основне призначення – створення регульованого зусилля на валки, за допомогою якого забезпечується необхідний ступінь обтискання металу відповідно до заданого технологічного режиму [9].

Основними перевагами конструкції реверсивного прокатного стана є:

– підвищена жорсткість та стабільність геометрії – литі станини, закріплені на масивній плитовині, утворюють замкнену просторову систему, що мінімізує деформації під час прокатки й забезпечує сталість розмірів штаби [52];
– зменшення вібрацій і динамічних навантажень – завдяки підвищеній масивності та симетричності конструкції, кліть ефективно гасить коливання, що позитивно впливає на якість поверхні прокату та довговічність елементів [52];
– зручність монтажу й обслуговування – наявність проміжних вікон полегшує заведення та заміну валків за допомогою перевалочного механізму, що скорочує час простою обладнання [7];
– покращені умови роботи вальниць – використання вальниць рідинного

тертя для опорних валків і чотирирядних конічних вальниць кочення для робочих валків знижує втрати на тертя, підвищує надійність та точність позиціонування валків [53];

– регульованість процесу прокатки – натискні механізми з гвинтовими передачами дозволяють точно дозувати зусилля обтискання, забезпечуючи стабільний технологічний режим [54];
– висока зносостійкість і довговічність – використання сталі марки Ст35Л для литих станин гарантує достатній запас міцності й стійкість до втомних навантажень [55];
– можливість роботи з різними типами сталей – завдяки міцності та точності кліті забезпечується прокатка легованих, конструкційних і низьковуглецевих сталей без погіршення якості готового продукту [55].

З огляду на важливість робочого інструменту – валків – для стабільності технологічного процесу прокатки, та для подальшого їхнього дослідження методом скінчених елементів в програмах твердотільного моделювання виконаємо розрахунок енергосилових параметрів робочої кліті. Розрахунковий розділ виконаємо за загальновідомими методиками наведеними в спеціальній технічній та учбовій літературі [9, 54-56].

2.2 Розрахунок потужності приводу реверсивного стану 1680

Вихідні дані:

Для розрахунку приймаємо прокатку штаби 0,5х1000 мм. із штаби 2х1000мм за 7 проходів.

Сталь 08КП

Матеріал штаби	Сталь 08КП
Межа плинності	$\sigma_т = 175 Н/мм^2 (МПа)$
Діаметр робочих валків	$Д_Р = 510 мм.$
Діаметр опорних валків	$Д_{доп} = 1370 мм.$

Маса рулону	$m = 15т.$
Прискорення при прокатці:	
розгоні	$\alpha_р = 1{,}5м/с^2$
гальмуванні	$\alpha_Т = 1{,}5м/с^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0{,}87$
Цикл прокатки рулону	$t_ц = 900...5000\,с$
Час допоміжних операцій	$t_в = 60с$
Натягнення штаби:	
Переднє	$Т_1 = 260кН$
Заднє	$Т_2 = 260кН$
Схема прокатки	табл. 2.1
Кінематична схема приводу прокатного стану	рис. 2.2

Таблиця 2.1 – Прийнята схема прокатки

Ширина штаби	Початкова і кінцева товщина штаби, мм	Номер проходу	Товщина штаби, мм		Середня товщина	Обтискання штаби за пропуск		Швидкість прокатки, м/с
			До прокатки	Після прокатки		мм	%	
1000	2,0…0,5	1	2	1,6	1,8	0,4	20	1,268
		2	1,6	1,3	1,45	0,3	18,75	1,268
		3	1,3	1,06	1,18	0,24	18,5	1,535
		4	1,06	0,87	0,965	0,19	17,9	1,735
		5	0,87	0,72	0,795	0,15	17,2	2,002
		6	0,72	0,6	0,66	0,12	16,7	2,255
		7	0,6	0,5	0,55	0,10	16,7	2,255

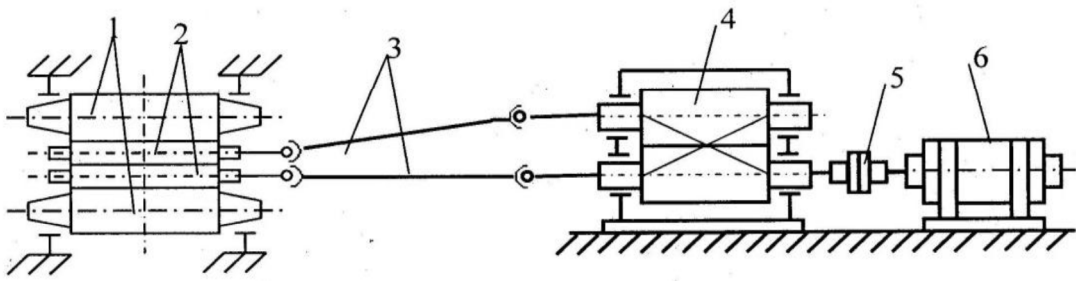


Рисунок 2.2 − Кінематична схема привода: 1 – опорні валки; 2 – робочі валки; 3 – універсальні шпінделі; 4 – шестерінчата кліть; 5 – моторна муфта; 6 – двигун.

Розрахунок потужності електродвигуна здійснимо для гірших умов, тобто по першому проходу, оскільки величина обтискання за перший прохід складає 0,6 мм (20%).

Абсолютне обтискання визначаємо по формулі [9]:

$$\Delta h = h_0 - h_1, \tag{2.1}$$

де h_0 – товщина штаби на вході в кліть, мм;

h_1 – товщина штаби на виході з кліті, мм.

Підставивши числові значення в (2.1), одержимо

$$\Delta h = 2 - 1{,}6 = 0{,}4 \text{мм}$$

Відносне обтискання визначаємо по формулі:

$$E = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\%, \tag{2.2}$$

де Δh – абсолютне обтискання, мм;

h_0 – товщина прокату на вході в кліть, мм.

Підставивши числові значення в (2.2), одержимо

$$E = \frac{0,4}{2} \cdot 100\%, = 20\%$$

Середня товщина штаби:

$$h_{ср} = \frac{h_0 + h_1}{2}, \qquad (2.3)$$

де h_0 – товщина штаби на вході в кліть, мм;

h_1 – товщина штаби на виході з кліті, мм.

Підставивши числові значення в (2.3), одержимо

$$h_{ср} = \frac{2 + 1,6}{2} = 1,8мм$$

Межа плинності при лінійному розтягуванні після прокатки:

$$\sigma_{T1} = \sigma_T + 5,7 \cdot E_{\sum 0,57}, \qquad (2.4)$$

де σ_T – межа плинності матеріалу, МПа;

$E_{\sum 0,57}$ – вимірювальне обтискання, $E_{\sum 0,57}$=20

Підставивши числові значення в (2.4), одержимо

$$\sigma_{T1} = 175 + 5,7 \cdot 20^{0,57} = 206 Н / мм^2 (МПа)$$

Межа плинності при лінійному розтягуванні до прокатки:

$$\sigma_{T0} = \sigma_T, \qquad (2.5)$$

Підставивши числові значення в (2.5), одержимо

$$\sigma_{T0} = 175 МПа.$$

Коефіцієнт наклепування:

$$K_H = \frac{\sigma_{T0} + \sigma_{T1}}{2 \cdot \sigma_T}, \quad (2.6)$$

Підставивши числові значення в (2.6), одержимо

$$K_H = \frac{175 + 206}{2 \cdot 175} = 1{,}08.$$

Межа плинності металу після прокатки:

$$K = 0{,}57 \cdot K_H \cdot \sigma_{T1}, \quad (2.7)$$

Підставивши числові значення в (2.7), одержимо

$$K = 0{,}57 \cdot 1{,}08 \cdot 206 = 127 МПа.$$

Межа плинності до і після деформації:

$$K_0 = 0{,}57 \cdot \sigma_{T0}, \quad (2.8)$$

$$K_1 = 0{,}57 \cdot \sigma_{T1}, \quad (2.9)$$

Підставивши числові значення в (2.8, 2.9), одержимо

$$K_0 = 0{,}57 \cdot 175 = 99{,}7 МПа.$$

$$K_1 = 0{,}57 \cdot 206 = 117{,}4 МПа.$$

Питоме натягнення штаби при вході і виході з валків:

$$\sigma_0 = \frac{T_1}{b \cdot h_0}, \tag{2.10}$$

$$\sigma_1 = \frac{T_2}{b \cdot h_1}, \tag{2.11}$$

де T_1, T_2 – натягнення штаби переднє і заднє;

b – ширина штаби;

h_0, h_1 – товщина штаби до прокатки і після прокатки.

Підставивши числові значення в (2.10, 2.11), одержимо

$$\sigma_0 = \frac{260000}{1400 \cdot 2} = 127 МПа.$$

$$\sigma_1 = \frac{260000}{1400 \cdot 1{,}6}{}^{2} = 159 МПа.$$

Коефіцієнт δ:

$$\delta = f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Д_Р}{\Delta h}}, \tag{2.12}$$

де $f = 0{,}1$ – коефіцієнт тертя;

$Д_р$ – діаметр робочих валків;

Δh – абсолютне обтискання.

Підставивши числові значення в (2.12), одержимо

$$\delta = 0{,}1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}510}{0{,}004}} = 1{,}596$$

Коефіцієнти ξ_0 і ξ_1:

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{2 \cdot K}, \tag{2.13}$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{2 \cdot K}, \tag{2.14}$$

Підставивши числові значення в (2.13, 2.14), одержимо

$$\xi_0 = 1 - \frac{127}{2 \cdot 127} = 0{,}5.$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{159}{2 \cdot 127} = 0{,}37.$$

Висота прокатуваного листа в критичному перерізі:

$$h_K = \sqrt[2 \cdot \delta]{\left(\frac{K_0}{K_1} \cdot h_0^{\delta - 1} \cdot h_1^{\delta + 1}\right)}, \tag{2.15}$$

Підставивши числові значення в (2.15), одержимо

$$h_K = \sqrt[2 \cdot 1{,}596]{\left(\frac{99{,}7}{117{,}4} \cdot 2^{1{,}596 - 1} \cdot 1{,}6^{1{,}596 + 1}\right)} = 1{,}88 мм$$

Середній питомий тиск металу на валки по формулі Целікова:

$$P_{CP} = \frac{1}{\Delta h}\left\{\xi_0 \cdot 2 \cdot K_0 \cdot \frac{h_0}{\delta - 2}\left[\left(\frac{h_0}{h_K}\right)^{\delta - 2} - 1\right] + \xi_1 \cdot 2 \cdot K_1 \cdot \frac{h_1}{\delta + 2}\left[\left(\frac{h_K}{h_1}\right)^{\delta + 1} - 1\right]\right\}, \tag{2.16}$$

Підставивши числові значення в (2.16), одержимо

$$P_{СР} = \frac{1}{0,4}\left\{0,5 \cdot 2 \cdot 99,7 \cdot \frac{2}{1,596-2}\left[\left(\frac{2}{1,88}\right)^{1,596-2} - 1\right] + 0,37 \cdot 2 \cdot 117,4 \cdot \frac{1,6}{1,596+2}\left[\left(\frac{1,88}{1,6}\right)^{1,596+1} - 1\right]\right\} = 746,8 Н / мм^2$$

Довжина дуги захоплення з урахуванням пружного сплющування валків:

$$l_3 = \sqrt{R \cdot \Delta h + x_1^2} + x_1, \tag{2.17}$$

Радіус робочого валка:

$$R = \frac{Д_P}{2}, \tag{2.18}$$

де $Д_p$ – діаметр робочих валків.

$$x_1 = \frac{1,08 \cdot R \cdot R_P}{10^5}, \tag{2.19}$$

Підставивши числові значення в (2.18, 2.19, 2.17), одержимо

$$R = \frac{1000}{2} = 500 мм.$$

$$x_1 = \frac{1,08 \cdot 500 \cdot 746,8}{10^5} = 4,032 мм.$$

$$l_3 = \sqrt{500 \cdot 0,4 + 4,032^2} + 4,032 = 18,73 мм.$$

Коефіцієнт, що враховує відношення довжини дуги захвату до середньої товщини штаби:

$$m = l_3 / h_{ср}, \tag{2.20}$$

Підставивши числові значення в (2.20), одержимо

$$m = 18{,}73/1{,}8 = 10{,}4$$

Коефіцієнт додатку рівнодійної сили прокатки:

$$\varphi = \frac{1}{2-\varepsilon}\left[1-\varepsilon\cdot\left(\frac{l^m}{l^m-1}-\frac{1}{m}\right)\right], \qquad (2.21)$$

де $l = 2{,}78$ – основа натурального логарифма.

Підставивши числові значення в (2.21), одержимо

$$\varphi = \frac{1}{2-0{,}2}\left[1-0{,}2\cdot\left(\frac{2{,}78^{10{,}4}}{2{,}78^{10.4}-1}-\frac{1}{10{,}4}\right)\right] = 0{,}4\,.$$

Зусилля прокатки:

$$F = P_{CP}\cdot l_3\cdot b, \qquad (2.22)$$

Підставивши числові значення в (2.22), одержимо

$$F = 746{,}8\cdot 10{,}4\cdot 1400 = 19582 кН.$$

Момент від сил тертя у вальницях опорних валків, приведених до осі обертання приводних робочих валків:

$$M_{TP} = \frac{F\cdot\eta_П\cdot d_П\cdot Д_P}{Д_{ДОП}}, \qquad (2.23)$$

де $\mu_П$ – коефіцієнт тертя у вальницях опорних валків;

$d_П$ – діаметр тертя у вальницях опорних валків.

Підставивши числові значення в (2.23), одержимо

$$M_{TP} = \frac{19582 \cdot 0{,}003 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}51}{1{,}37} = 7{,}87 кН \cdot м.$$

Момент прокатки, що передається двома валками:

$$M_{ПР} = 2 \cdot F \cdot \varphi \cdot l_3, \qquad (2.24)$$

Підставивши числові значення в (2.24), одержимо

$$M_{ПР} = 2 \cdot 7922 \cdot 0{,}4 \cdot 10{,}4 = 66 кН \cdot м.$$

Загальний момент при прокатці з постійною швидкістю:

$$M = M_{ПР} + M_{TP}, \qquad (2.25)$$

Підставивши числові значення в (2.25), одержимо

$$M = 66 + 7{,}87 = 73{,}87 кН \cdot м.$$

Кутова швидкість обертання валків при $n = 125 хв^{-1}$

$$\omega = \frac{\mathrm{n}}{9{,}55}, \qquad (2.26)$$

Підставивши числові значення в (2.26), одержимо

$$\omega = \frac{125}{9{,}55} = 13{,}1 \mathrm{рад/с}.$$

Потужність електродвигуна, необхідна для приводу робочих валків:

$$P = \frac{M \cdot \omega}{\eta_{max}}, \qquad (2.27)$$

Підставивши числові значення в (2.27), одержимо

$$P = \frac{74 \cdot 13{,}1}{0{,}87} = 1114\text{кВт}. \qquad (2.28)$$

Так як розрахунок виконували для прокатки штаби з початкової 2 мм на 0,5 мм, а асортимент випускаємої продукції значно ширше остаточно обираємо електродвигун з наступними характеристиками [19]:

Тип ДП 3000/250;

Потужність P=3000 кВт;

Частота обертання n=125/250 хв$^{-1}$.

2.3 Розрахунок робочого валка реверсивного прокатного стану на стійкість до деформацій

З аналізу розділу 1 можна зробити висновок, що основним робочим інструментом, що виконує деформацію (обтиснення) металу з метою додання йому необхідної форми поперечного переріза є робочі валки. Конструктивно робочий валок можна розділити на наступні елементи (рисунок 2.3): бочка, яка виступає робочою частиною валка, шийки – для встановлення у вальниці і хвостова частина. Залежно від геометрії робочої поверхні, валки поділяють на два типи: листові та сортові. Листові валки застосовуються у клітях листопрокатних станів і характеризуються циліндричною формою бочки, що забезпечує рівномірне обтиснення штаби по всій ширині.

Оскільки ефективність прокатного процесу значною мірою визначається якістю виготовлення та надійністю роботи валків, саме ці параметри

безпосередньо впливають на точність геометричних розмірів, чистоту поверхні й загальну продуктивність стана. Це викликає потребу у практичних розрахунках листопрокатних валків, орієнтованих на середній типорозмір прокатуваної штаби, з урахуванням навантажень, умов контакту та особливостей матеріалу.

Початковіі дані для виконання розрахунку валка на міцність:

Питомий тиск на валки (середній) $P_{ср}$=746,8 Н/мм^2;

Максимальна величина обтиснення Δh=0,4 мм;

Ширина штаби b=1000 мм;

Мінімальна товщина штаби h=0,5 мм;

Межа міцності матеріалу валка $\sigma_B = 600$ МПа;

Діаметр робочої частини валка обираємо з умови прокатки штаби мінімальнозаданої товщини:

$$D \le (1500....2000)h_{\min}, \qquad (2.29)$$

$$D \le (1500...2000) \cdot 0{,}5 = 750...1000\text{мм},$$

приймаємо $D = 1000\text{мм},$

Довжина робочої частини валка

$$L = в + (100...400), \text{мм} \qquad (2.30)$$

$$L=1000+400=1400\text{мм}$$

Таким чином приймаємо універсальну ширину робочої частини валка для реверсивного стану, яка дорівнює 1680 мм.

Діаметр посадочних місць обирають залежно від типу вальниць:

$$d = (0{,}55...0{,}75)D\,, \qquad (2.31)$$

де D − діаметр робочої частини валка, мм;

$$\mathrm{d} = (0{,}55...0{,}75)\cdot 1000 = 550...750\text{мм}$$

З конструктивних міркувань приймаємо $\mathrm{d} = 800\text{мм}$,

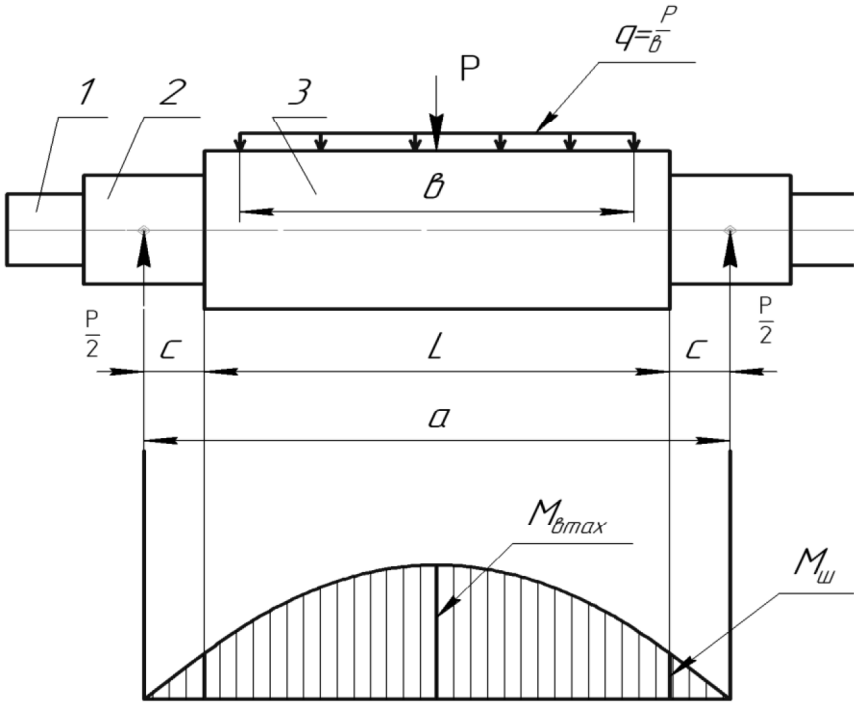


Рисунок 2.3 − Основні елементи робочого валка: 1 – хвостова частина валка; 2 – шийки валка; 3 – «бочка» валка;

Довжину посадочних місць приймаємо рівними діаметру:

$$\mathrm{l} = \mathrm{d} = 800\text{мм}$$

Діаметр хвостової частини приймаємо:

$$d_1 = d - 10, \tag{2.32}$$

$$\mathrm{d}_1 = \mathrm{d} - 10 = 800 - 10 = 790\,\text{мм}.$$

З конструктивних міркувань довжину хвостової частини приймаємо рівною: $l_1 = 800$ мм.

Відстань між центрами посадкових місць валка:

$$a = L + l\text{, мм;} \tag{2.33}$$

де L – довжина робочої частини валка, мм; L = 1680;

l – довжина посадкових місць, мм; l = 800;

$$\mathrm{a} = 1680 + 800 = 2480\,\text{мм}$$

Під час перевірки міцності прокатного валка його окремі елементи розглядаються з урахуванням характеру сприйманих навантажень: бочка аналізується лише на вигин, шийка – на комбіновану дію вигину та крутіння, тоді як кінцева частина валка розраховується переважно на крутний момент, що передається від приводу.

Тоді для робочої частини (бочки).

Зусилля прокатування:

$$\mathrm{P} = \mathrm{P}_{\text{ср}} \cdot \text{в} \cdot \sqrt{\Delta\mathrm{h} \cdot \mathrm{R}},\ \text{Н} \tag{2.34}$$

де $P_{ср}$ – питомий тиск (середній), Н/мм^2;

b – ширина штаби, що катається, мм;

R – радіус робочої поверхні валка, мм;

Δh – максимальна величина обтиснення, мм

$$P = 746{,}8 \cdot 1400\sqrt{0{,}4 \cdot 500} = 14{,}8 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

Згинаючий момент:

$$M_{зг} = P \cdot \left(\frac{a}{4} - \frac{b}{8}\right), \text{ Н·м} \qquad (2.35)$$

де b – ширина штаби, що катається, мм;

a – відстань між посадковими місцями валка; a=2480 мм;

$$M_{зг} = 14{,}8 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{2480}{4} - \frac{1400}{8}\right) = 6{,}6 \cdot 10^9 \text{ Н·мм}$$

Тоді напруження вигину буде визначатися як:

$$\sigma_В = \frac{M_{зг}}{0{,}1 \cdot D^3} \le [\sigma_В] = \frac{\sigma_м}{5}, \text{ МПа} \qquad (2.36)$$

де $\sigma_м$ – межа міцності матеріалу валка; $\sigma_м$=600 МПа;

$$\sigma_Б = \frac{6{,}6 \cdot 10^9}{0{,}1 \cdot 1000^3} = 66 \le [\sigma] = \frac{600}{5} = 120$$

Умова виконується.

Момент на шпінделі:

$$M = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}}, \text{ Н·мм;} \qquad (2.37)$$

де ψ – коефіцієнт розподілу крутного моменту з шестеренної кліті ;

P – зусилля прокатування;

$$M = 2 \cdot 14{,}8 \cdot 10^6 \cdot 0{,}5 \cdot \sqrt{\frac{0{,}4 \cdot 1000}{2}} = 209{,}3 \cdot 10^6 \text{ Н·мм}$$

Момент на посадкових місцях валка:

$$M_ш = \frac{P \cdot c}{2}, \text{ Н·мм;} \qquad (2.38)$$

де P – зусилля прокатування;

c – центр посадкових місць валка;

$$M_ш = \frac{14{,}8 \cdot 10^6 \cdot 400}{2} = 2{,}96 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Напруження на шийках валка:

$$\sigma_{шв} = \frac{M_ш}{0{,}1 \quad d^3}, \text{МПа} \qquad (2.39)$$

де d – діаметр шийок;

$$\sigma_{шв} = \frac{2{,}96 \cdot 10^9}{0{,}1 \cdot \quad 800^3} = 57{,}8 \text{МПа}$$

Крутний момент, що передається шпінделем:

$$M_{кмш} = 0{,}7 \cdot M, \text{ Н·м;} \qquad (2.40)$$

де М – момент на шпінделі;

$$M_{кмш} = 0,7 \cdot 209,3 \cdot 10^6 = 146,51 \cdot 10^6 \text{ Н·мм}$$

Дотичне напруження для хвостової частини валка (циліндричної):

$$\tau = \frac{M_{кмш}}{0,2 \cdot d^3}, \text{ МПа} \qquad (2.41)$$

де $M_{кмш}$ – крутний момент, що передається шпінделем;

d – діаметр посадкових місць;

$$\tau = \frac{146,51 \cdot 10^6}{0,2 \cdot 800^3} = 1,43 \text{ МПа}$$

Тоді міцність в перерізі посадкових місць:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_ш^2 + 3 \cdot \tau^2}, \text{ МПа} \qquad (2.42)$$

де $\sigma_ш$ – напруження на посадкових місцях валка

τ – дотичне напруження для циліндричної хвостової частини валка;

$$\sigma = \sqrt{57,8^2 + 3 \cdot 1,43^2} = 57,85, \text{ МПа}$$

Тоді умова забезпечення міцності:

$$\sigma = 57,85 \le [\sigma] = 120$$

Умову міцності забезпечено, можна виконувати розрахунок хвостової частини.

Дотичне напруження для хвостової частини:

$$\tau_1 = \frac{M_{кмш}}{0,2 \cdot d_1^3}, \text{ МПа}, \qquad (2.43)$$

де $M_{кмш}$ – крутний момент, що передається шпінделем;

d – діаметр хвостової частини;

$$\tau = \frac{146,51 \cdot 10^6}{0,2 \cdot 790^3} = 1,49 \text{ МПа}$$

Допустимі дотичні напруження:

$$[\tau] = 0,6 \cdot [\sigma], \text{ МПа} \qquad (2.44)$$

$$[\tau] = 0,6 \cdot 120 = 72 \text{ МПа}$$

Умова забезпечення міцності:

$$\tau = 1,49 \text{МПа} \le [\tau] = 72 \text{ МПа}$$

Міцність забезпечується.

Розрахунок робочих валків на деформацію виконується з метою визначення величини їх прогину під дією зусиль прокатки та оцінки відповідності отриманих значень допустимим нормам. Такий аналіз дозволяє

встановити ступінь пружного відхилення осі валка, що впливає на рівномірність обтиснення металу по ширині штаби.

Схематичне відображення розрахункової моделі представлено на рис. 2.4.

Момент інерції поперечного перерізу шийки валка визначається за стандартною формулою:

$$I_1 = \frac{\pi \cdot d^4}{64}, \text{ м}^4 \qquad (2.45)$$

де d − діаметр посадкових місць;

$$I_1 = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}8^4}{64} = 0{,}02 \text{ м}^4$$

Момент інерції робочої частини валка:

$$I_2 = \frac{\pi \cdot D^4}{64}, \text{ м}^4 \qquad (2.46)$$

де D − діаметр робочої частини;

$$I_2 = \frac{3{,}14 \cdot 1^4}{64} = 0{,}05 \text{ м}^4$$

Площа перетину посадкових місць під вальниці:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2 \qquad (2.47)$$

$$F_1 = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}8^2}{4} = 0{,}5, \text{ м}^2$$

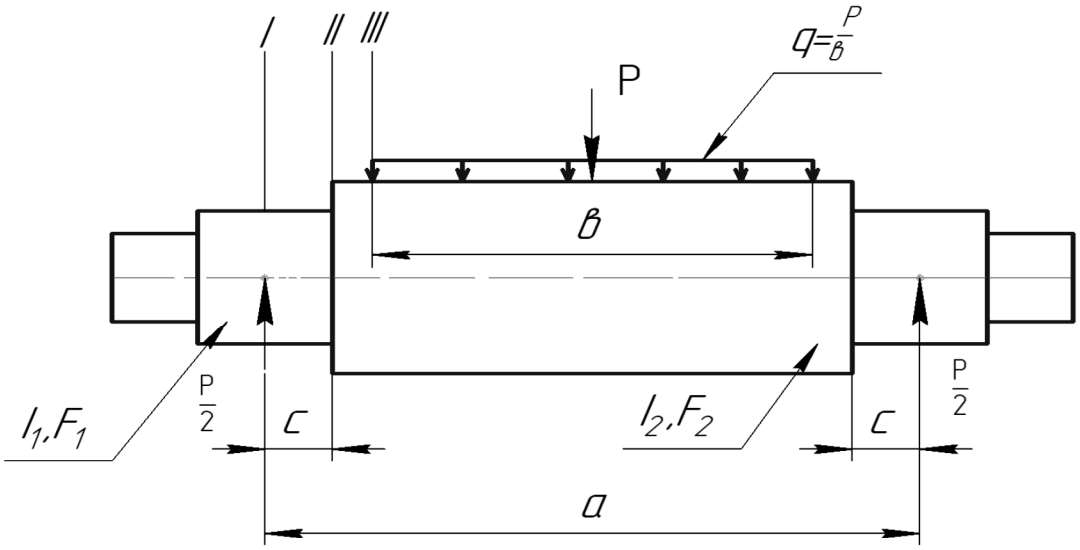


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема на деформацію робочих валків

Площа перетину робочої частини валка:

$$F_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^2 \qquad (2.48)$$

$$F_1 = \frac{3{,}14 \cdot 1^2}{4} = 0{,}785 \text{ м}^2$$

Визначаємо прогини валка в перетині посадкових місць та робочої частини відповідно:

$$f_1 = \frac{P}{384 \cdot E \cdot F_1} \cdot \left[8 \cdot a^3 - 4 \cdot a \cdot b^2 + b^3 + 64 \cdot c^3 \cdot \left(\frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right], \text{ мм} \qquad (2.49)$$

де E – модуль пружності для матеріалу валків; E =210 МПа;

P – зусилля прокатування;

I_1 – момент інерції перетину посадкових місць під вальниці валка;

$$f_1 = \frac{14{,}8 \cdot 10^6}{384 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 0{,}5 \cdot 10^6}\left[8 \cdot 2{,}48^3 - 4 \cdot 2{,}48 \cdot 1{,}4^2 + 1{,}4^3 + 64 \cdot 0{,}4^3\left(\frac{0{,}02}{0{,}05} - 1\right)\right] = 0{,}008 \text{мм}.$$

$$f_2 = \frac{P}{4 \cdot G \cdot F_2} \cdot \left[a - \frac{b}{2} + 2 \cdot c \cdot \left(\frac{F_2}{F_1} - 1\right)\right], \text{ мм} \qquad (2.50)$$

де G – модуль зрушення; G =75 МПа;

F_2 – площа перетину робочої частини валка;

$$f_2 = \frac{14{,}8 \cdot 10^6}{4 \cdot 75 \cdot 10^6 \cdot 0{,}785 \cdot 10^6}\left[2{,}48 - \frac{1{,}4}{2} + 2 \cdot 0{,}4 \cdot \left(\frac{0{,}785}{0{,}5} - 1\right)\right] = 0{,}001 \text{мм}.$$

Загальний прогин робочого валка

$$f=f_1+f_2, \text{ мм} \qquad (2.51)$$

$$f=0{,}008+0{,}001=0{,}009 \text{ мм}$$

$$f=0{,}009 \leq [f]=0{,}3 \ldots 1$$

Умова по допускаємому сумарному прогину виконується.

З огляду на те, що перспективним напрямом конструктивного розвитку робочих валків прокатних станів є розробка, створення та впровадження бандажованого валка, виникає потреба в дослідженні такого технологічного виконання на міцність та деформацію. Бандажований прокатний валок представляє собою складену конструкцію, прорахунок якої на деформацію «вручну» є доволі складною операцією, тому доцільно під час таких досліджень використовувати систему твердотільного аналізу на міцність методами скінченних елементів APM FEM, що встановлена на комр'ютерах лабораторій кафедри металургійного обладнанння.

3 ДОСЛІДНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз впливу системи та методів охолодження на працездатність валків

У процесі гарячої та холодної прокатки валки піддаються інтенсивним тепловим навантаженням, спричиненим передачею тепла від металу, що прокатується, через контактну поверхню. Зростання температури призводить до появи значних термічних напружень, викривлення бочки валка та зміни форми калібру, що безпосередньо впливає на геометричну точність прокату та довговічність валків [57-59].

Працездатність прокатних валків є ключовим фактором ефективності металургійного виробництва, оскільки валки піддаються інтенсивним термічним, механічним та абразивним навантаженням під час прокатки. Системи та методи охолодження відіграють вирішальну роль у підтриманні оптимального теплового режиму, запобігаючи перегріву, термічним деформаціям та передчасному зносу. Аналіз літературних джерел показує, що ефективне охолодження може подовжити термін служби валків на 10–50%, зменшити енергоспоживання та покращити якість продукції [57, 58]

Системи охолодження прокатних валків поділяються на водяні (рис.3.1), повітряні та комбіновані, з методами, що включають зовнішнє розпилення, внутрішнє циркулювання та селективне охолодження. Водяне охолодження є найпоширенішим завдяки високій ефективності теплообміну [57, 58, 60].

Охолодження безпосередньо впливає на працездатність валків, зменшуючи знос, термічні тріщини та сколи (рис.3.2). Циклічні термічні стреси від нерівномірного охолодження призводять до втоми та скорочення життя [57, 61]. Рівномірне охолодження мінімізує стреси, подовжуючи кампанію валків [57]. У гарячій прокатці ефективне охолодження діє як тепловий потік, контролюючи температуру стрічки та зменшуючи термічні удари на валках [59]. Оптимізовані схеми підвищують стійкість на 10%, стабілізуючи механічні

властивості продукції [62].

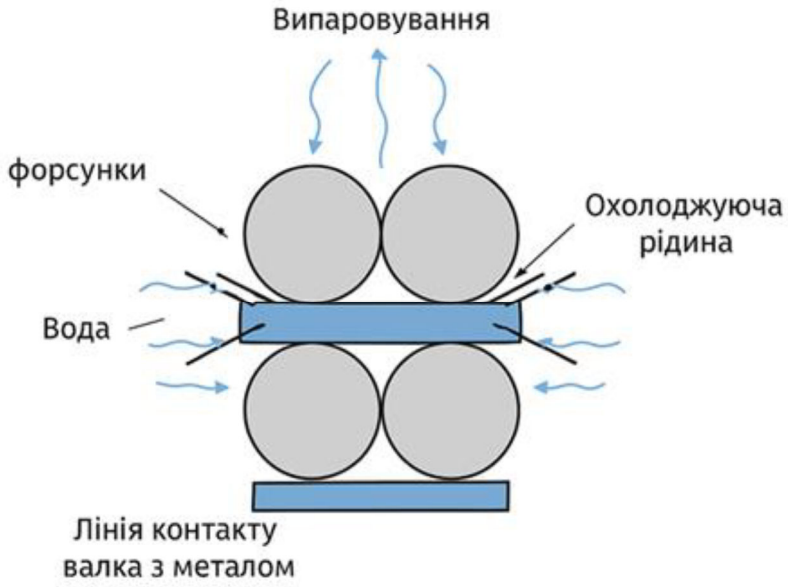


Рисунок 3.1 – Класична система охолодження в кліті ДУО

У холодній прокатці охолодження зменшує деформації, покращуючи пласкість та зменшуючи навантаження [63, 64]. Термічні пошкодження, такі як тріщини, є основною причиною непередбачуваних аварійних зупинок, і охолодження є ключовим для їхнього запобігання [61]. Енергозберігаючі системи зберігають ефективність, зменшуючи знос від перегріву [60].



Рисунок 3.2 – Сколювання робочого валка внаслідок термічних напружень

Симуляції показують, що оптимізоване охолодження зменшує температурні градієнти, знижуючи ризик сколу [65, 66]. Загалом, правильне охолодження подовжує життя валків на 10÷50 %, зменшує енергоспоживання та покращує якість [57, 62, 60, 66].

Типова система охолодження прокатного стану складається з ряду форсунок, розташованих у верхній і нижній зонах кліті (рис.3.3). Основним завданням є забезпечення рівномірного розподілу потоку охолоджувальної рідини по поверхні валка.

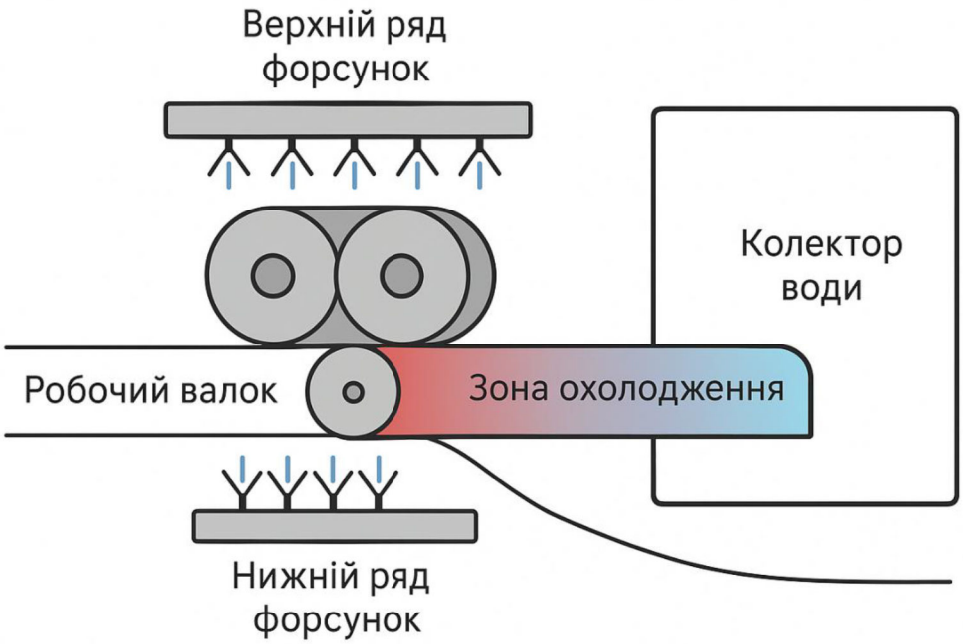


Рисунок 3.3 – Типова система охолодження робочої кліті прокатного стану

В роботі [62] описано метод оптимізації схеми охолодження за допомогою чисельного моделювання, враховуючи стохастичні фактори – невизначеність у характеристиках охолоджуючої рідини, витраті рідини та геометрії форсунок. Результати дослідження показали, що оптимізація розташування і кута нахилу форсунок дозволяє знизити термічну нерівномірність на 12÷18 %, що позитивно впливає на зносостійкість валків.

Сучасні системи (рис.3.4) можуть включати адаптивне регулювання витрати й тиску охолоджувача в залежності від температурного профілю валка [63, 67].

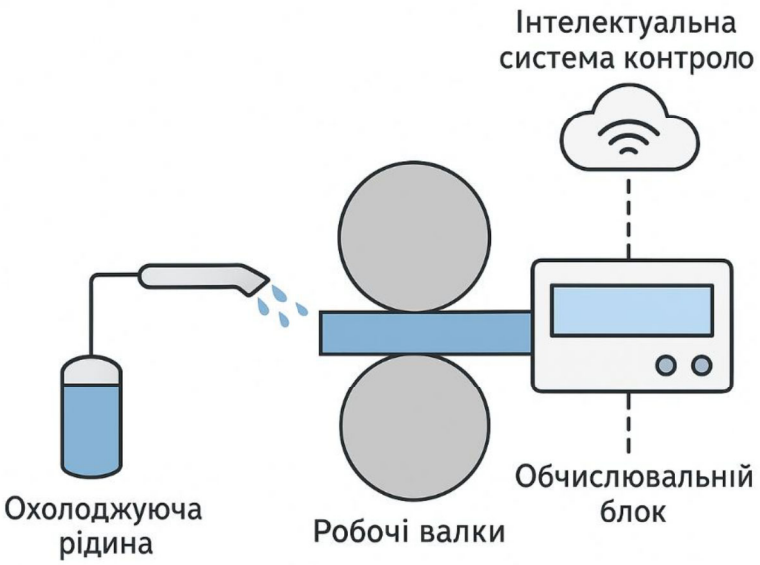


Рисунок 3.4 – Сучасна (інтелектуальна) система охолодження робочих валків прокатної кліті

Виконуючи дослідження різних схем охолодження автори в роботі [65] підтвердили, що зміна схеми розташування форсунок може забезпечити суттєве поліпшення охолоджувальної ефективності (рис.3.5). Найкращі результати отримано при комбінації верхнього та бокового охолодження, що створює більш рівномірний розподіл температури по колу валка.

Вітчизняні дослідники Тришевський, Сальтавець та Кондращенко на основі математичного моделювання процесів теплообміну валка з металевою смугою обґрунтовано вибір оптимальних схем охолодження [62]. Автори показали, що симетричне розташування форсунок із регульованою подачею дозволяє мінімізувати перепад температур між серединою та краями валка, що знижує ризик виникнення термічних напружень.

До методів підвищення ефективності охолодження шляхом вдосконалення обладнання також можна віднести використання різних типів форсунок (плоскоструменевих, конічних, комбінованих), а для покращень технологічного характеру використання імпульсних режимів подачі рідини, зміни кута атаки потоку та розробку нових охолоджуючих середовищ. Роботою [59] відзначається, що застосування багатоструменевих форсунок із вузьким кутом

розпилення забезпечує кращу глибину проникнення охолоджувача в зону контакту, підвищуючи коефіцієнт теплопередачі до 15 %.

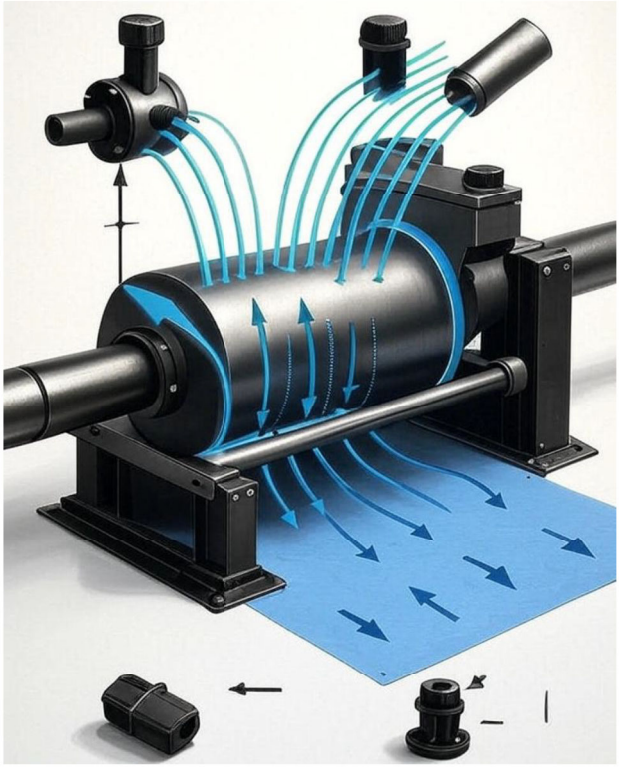


Рисунок 3.5 – Комібнована схема охолодження для рівномірного розподілу температурного градієнту по об’єму прокатного валка

На користь використання ефективних систем охолодження роботою [66] доведено, що зниження температури валка навіть на 20 °С призводить до збільшення його ресурсу на 8÷10 %, що підтверджує важливість оптимального вибору параметрів охолодження.

У роботі [60] описано промислове впровадження інноваційної системи Power Work Roll Cooling, яка дозволила скоротити споживання води на 25 % та зменшити температуру поверхні валка на 40 °С без зниження якості прокату.

В умовах глобальної діджалітизації моделювання процесів теплообміну у валках стало важливим інструментом проєктування. В роботі [63] застосовано метод кінцевих елементів для моделювання деформації шестивалкової кліті з системою CVC, враховуючи нерівномірний розподіл температур. Виявлено, що

несиметричне охолодження може спричинити додаткову еластичну деформацію бочки валка, що призводить до зміни товщини прокату.

Бурхливий розвиток нейромереж дозволяє використовувати прогресивні технології контролю за процесом охолодження валків. Так в роботі [64] запропоновано метод машинного навчання з використанням елементів компютерного зору для селективного керування охолодженням валків. Система автоматично змінює інтенсивність охолодження в реальному часі залежно від температурного профілю, забезпечуючи стабільність плоскої форми стрічки. Такий підхід є перспективним напрямом розвитку «розумних» систем керування прокатними станами.

Нерівномірне охолодження призводить до циклічних теплових деформацій, що зумовлює появу мікротріщин, сколювання робочої поверхні та передчасне виведення валка з експлуатації. Автори в роботі [61] акцентують увагу на тому, що термічні напруження мають синергетичний ефект із механічними навантаженнями, і навіть невеликі перепади температур (близько 30 °C) здатні скоротити термін служби валка удвічі. В роботі [68] доведено, що контрольована термопрофільна система охолодження дозволяє не лише зменшити знос, а й стабілізувати мікроструктуру поверхні валків, що особливо важливо при прокатці термомеханічно зміцнених сталей.

Останні тенденції у розвитку систем охолодження спрямовані на скорочення водоспоживання, підвищення точності подачі рідини та автоматизацію контролю параметрів. Використання закритих контурів рециркуляції охолоджувача знижує екологічне навантаження та витрати на водопідготовку.

Новітні дослідження [60, 64] демонструють потенціал поєднання технологій машинного навчання, сенсорного моніторингу та цифрових двійників для створення «адаптивних» систем охолодження, які автоматично підлаштовуються до умов процесу прокатки. Такі рішення дозволяють не лише стабілізувати тепловий стан валка, а й прогнозувати його залишковий ресурс, що є основою для впровадження концепції Smart Rolling Mill. Основні переваги та

недоліки сучаних систем охолодження робочих валків прокатного стану наведено в таблиці

Таблиця 3.1 – Переваги та недоліки різних систем охолодження робочих валків прокатного стану

Тип системи охолодження	Метод охолодження	Застосування	Переваги	Недоліки
Зовнішнє водяне охолодження	Форсунки з водою/емульсією	Гаряча прокатка	Простота, доступність	Нерівномірність, ризик термічного шоку
Внутрішнє охолодження	Канали всередині валка	Порожнисті валки	Ефективне охолодження	Складність конструкції
Комбіноване охолодження	Зовнішнє + внутрішнє	Високоточні прокатні стани	Максимальна ефективність	Висока вартість
Сегментоване охолодження	Зональне охолодження	CVC-системи, зміщення валків	Точне регулювання температури	Складність керування
Інтелектуальні системи охолодження	Алгоритми на основі даних	Автоматизовані стани	Адаптивність, оптимізація в реальному часі	Потреба в сенсорах та програмному забезпеченні

Підсумовуючи все вищесказане можна зробити висновок, що системи охолодження є визначальним чинником працездатності валків, а саме:

- основний вплив на знос і довговічність валків має рівномірність розподілу температури по поверхні;
- оптимізація геометрії, кута нахилу та тиску подачі форсунок забезпечує зниження термічної нерівномірності до 20 %;
- інноваційні методи, зокрема керування охолодженням на основі машинного навчання, дають можливість підтримувати стабільність форми прокату та прогнозувати стан валків;
- перехід до енергоефективних і цифрових технологій охолодження є перспективним напрямом модернізації прокатних станів.

3.2 Аналіз трудоміскості виготовлення складених (бандажованих) прокатних валків

З аналізу розділу 1 можна зробити висновок, що найбільш перспективним напрямом створення нових конструкцій прокатних валків є розробка та удосконалення валків складеного типу. В цих валках основа – вісь – призначена для багаторазового використання, а оболонка (бандаж), яка безпосередньо контактує з оброблюваним металом – змінна, що дозволяє після вичерпання ресурсу валка після запланованих перешліфовок економити на виготовленні валка, за рахунок зміни тільки бандажа. Всі основні принципи наукового обгрунтування та практичного впровадження у виробництво складених (бандажованих) прокатних валків були закладені ще у 60-70 хх роках минулого сторіччя такими відомими вітчизняними вченими-дослідниками у сфері удосконалення металургійного обладнання Груд'євим О.П., Чекмарьовим О. П. Полухіним В.П. Значний внесок у дослідження впровадження складених валків також внесено співробітником Запорізької інженерної академії Ніколаєвим О.В. Всі дослідження виконанні цими вченим є дещо розрізненими та невпорядкованим, тому постає важливе питання їхньої систематизації та узагальнення, що і зроблено в даному розділі кваліфікаційної роботи.

Процес виготовлення литих бандажів із заевтектоїдних марок сталі складається з:

- виплавки стали;
- розливання у форми;
- термічної й механічної обробки.

Виливок внутрішньої й зовнішньої поверхні- бандажа рекомендується здійснювати у форму з низьким тепловим опором. Більшою перевагою складених опорних валків з литими бандажами зі сталі 150ХНМ перед цельнокованими є рівномірна твердість по всій глибині активного шару.Відповідно до цього зносостійкість валків не залежить від переточувань і становить 30-40 тис. т/мм [69].

Технологія виробництва бандажованих валків у тому числі і їх остаточна термічна обробка, належить до трудомістких і тривалих операцій. По-перше, необхідно мати на увазі, що при гарячій посадці бандажа на вісь бандаж не можна обробити до твердості більш високої, ніж це забезпечується температурою посадки. По-друге, проведення остаточної термічної обробки посадженого на вісь бандажа при нагріванні приведе до порушення щільності посадки, а при охолодженні – до розтріскувань бандажа. Точно визначити величину необхідного натягу завжди важко, а можливі відхилення від заданих розмірів при виготовленні можуть привести до розтріскування бандажа в процесі посадки або експлуатації валка (надмірні напруження посадки).

По існуючому технологічному режиму бандажі валків з температури відпущення 400-410 °С охолоджуються повільно в печі до 100 °С по 20 °С/год. При такому режиму відпущення залишкові стискаючі напруження на внутрішній і зовнішній поверхнях не перевищують у середньому 7-10 кгс/мм^2 і тим самим не в змозі компенсувати розтягувальні напруження від натягу, що сприяє розтріскуванню бандажа. Після попередньої механічної обробки бандажів із припуском на сторону в 1,5-2,5 мм вони зазнають остаточної термічної обробки – загартуванню з відпущенням при температурі, що залежить від необхідної твердості поверхні (рис. 3.6).

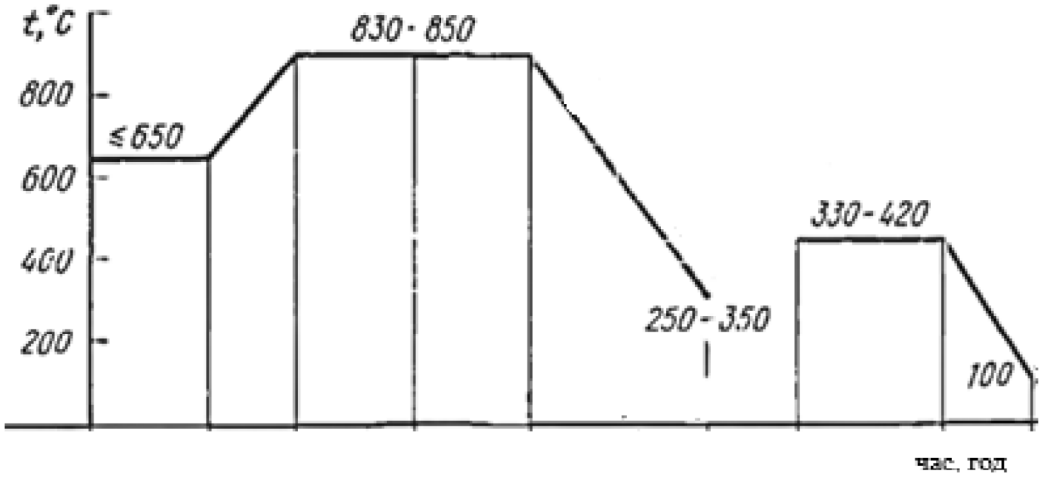


Рисунок 3.6 – Остаточна термічна обробка кованих бандажів (загартування через воду в масло), що виготовляються зі сталі 9Х и 9ХФ

Як видно із графіка, бандажі завантажують у попередньо прогріту піч (t=650°C) і після повного прогріву нагрівають до гартівної температури (830-850°C). При цьому забезпечується виправлення можливого перегріву, що залишився після відпалу, розчинення залишків карбідної сітки, одержання однорідного, високостійкого до переохолодження аустенітного зерна. Бандажі гартують через воду в масло з певною витримкою у воді щоб уникнути розтріскування. Бандажі нагрівають у печах і завантажують у гартівні ванни у вертикальному положенні. Іноді для попередження тріщиноутворення роблять їхню теплоізоляцію з торців. Тривалість витримки в гартівних середовищах визначається перетином стінки бандажа. Вона різна в умовах різних заводів. Нижче наведені тривалості охолодження бандажів у різних середовищах при загартуванні, установлені в результаті досвіду виробництва великих складених валків:

Товщина стінки бандажа, мм:	150-200	201-250	251-300
Тривалість охолодження, хв: .			
у воді	 5	5-6	6-7
в мастилі	50	60-70	70-60

При одночасному загартуванні декількох бандажів тривалість витримки в мастилі збільшують до 30%. Завершення процесу загартування контролюють по температурі поверхні бандажа, яка повинна перебувати в межах 150–200°C. Відпущення здійснюють у попередньо прогрітих термічних печах. При твердості HR 60–75 температура відпущення бандажів зі сталі 9ХФ рівна 380–420°C, а при більш високій твердості (HR 70–85) її знижують до 380–330°C. Тривалість відпущення визначають залежно від необхідності максимально можливої стабілізації розмірів, що важливо при наступній посадці бандажа на вісь. Тому тривалість відпущення висока й становить 60–75 год.

Проведені експерименти показали, що при охолодженні бандажів з температури відпущення у воді в поверхневих шарах виникають відносно високі залишкові напруження, що перевищують розтягувальні напруження від натягу. Насадка бандажів, замочених у воді з температури відпущення, дозволяє

одержувати на робочій поверхні складених валків стискаючі залишкові напруження, які перевищують залишкові (при охолодженні без замочування) на 20 кгс/мм^2. Придатні по твердості бандажі піддають остаточному шліфуванню. При цьому внутрішній діаметр бандажа виготовляють менше зовнішнього діаметра осі на величину натягу. Посадку бандажа на вісь або навпаки здійснюють при температурі 200-250°С. На заводах, що освоїли процес бандажування, є спеціальні соленоїдні електропечі з розрахунку одночасного підігріву до посадкової температури бандажа самої більшої довжини (із усієї номенклатури постійних замовлень). Температурний перепад по висоті не повинен перевищувати 30°С. Нагрівання до 100°С та охолодження до температури посадки здійснюють із мінімальною швидкістю 10-15°С/год (рис.3.7).

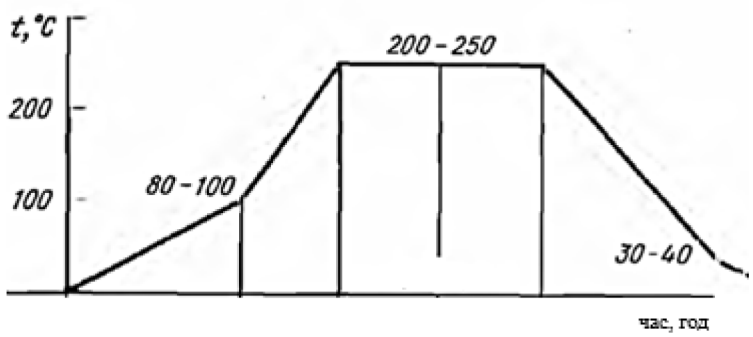


Рисунок 3.7 – Температурний режим посадження бандажа (сталь 9Х та 9ХФ) на вісь

Перехід через проміжні температури (від 100 до 200-250°С) здійснюють із більшою швидкістю (25-30 °С/год). Швидкість нагрівання й охолодження регулюють, включаючи й виключаючи нагрівання. У процесі нагрівання й після витримки контролюють внутрішній діаметр і при відповідності розмірів посадження осі в бандаж. Охолодження на повітрі виконують з мінімальною швидкістю до моменту схоплювання бандажа й осі. Потім при досягненні 40-30°С валок видається із соленоїда для подальшого повільного охолодження в повітряній ванні. Процес банадажування становить 2-5 доби. В умовах іншого заводу технологія остаточної термічної обробки відрізняється від описаної вище.

Механічно оброблені із припуском бандажі піддають більш складній термічній обробці – загартуванню з відпалом, сполученим з остаточним загартуванням і середньотемпературним відпущенням (рис. 3.8). Як випливає із графіка, бандажі завантажують у піч, прогріту до 300-350°С, і разом з піччю нагрівають до температури загартування (870-890°С). У процесі нагрівання для зниження рівня теплових напружень передбачена температурна зупинка (670-690°С).

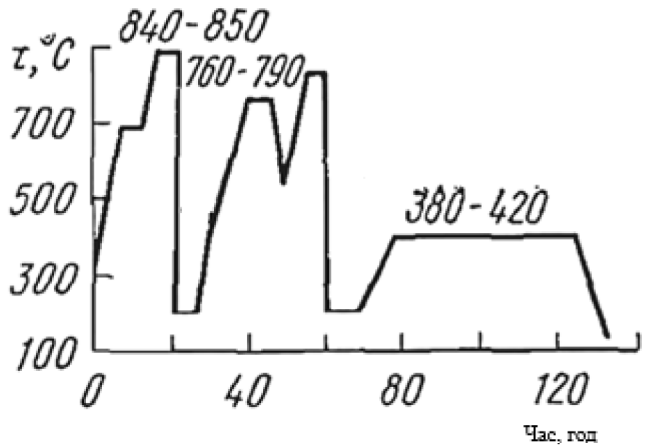


Рисунок 3.8 – Режим остаточної термічної обробки (подвійне загартування із проміжним відпалом) бандажів складених опорних валків, виготовлених зі сталі 9Х, 9Х2 і 9ХФ

Загартування здійснюють у мастилі у вертикальному положенні й до температури поверхні 250-150 °С. Застосування наступного відпалення (780-790 °С) забезпечує по всьому перетину структуру – неоднорідного аустеніту з великою кількістю вторинних карбідів, що слугують готовими центрами перетворення при охолодженні на повітрі (до 500°С) і прискорюючих (процес перетворення). Наступне загартування з 840-850°С роблять через воду в мастило, строго дотримуючи тривалість витримки в кожному з охолоджуючого середовища. В іншому технологія термічної й механічної обробок, а також посадки бандажа на вісь аналогічна застосовуваної на багатьох заводах. Слід зазначити, що до розробки теорії й науково обґрунтованої практики бандажування валків випадки їх провертання, осьового зсуву, поздовжнього

розтріскування як при транспортуванні, зберіганні, так і в процесі експлуатації будуть періодично повторюватися.

При визначенні раціональних областей застосування складеного інструмента в прокатних станах у кожному конкретному випадку насамперед необхідно орієнтуватися на техніко-економічну ефективність його використання, технологічність виготовлення й надійність при експлуатації.

У ряді випадків зрозуміле прагнення розвантажити діючі потужності машинобудівних підприємств за рахунок застосування складених валків, вісь яких використовується багаторазово. У такий спосіб використовуються, наприклад, осі великих опорних валків. Застосування твердих сплавів для виготовлення суцільних робочих валків у більшості випадків утруднене, тому що ці матеріали не здатні сприймати великі згинаючі навантаження й крутні моменти. Нарешті, при виготовленні великих опорних валків масою в 200 т і більш часто не представляється можливим виконати їх цільнокованими або суцільнолитими.

Литі валки є конкурентоспроможними цільнокованим, але вони уступають їм по міцності шийок. По цьому перспективним є застосування складених валків з бандажами з литих сплавів і кованою сталевою віссю.Досить перспективним є застосування складених опорних валків на широкоштабових тонколистових і товстолистових станах холодної й гарячої прокатки. Як за вітчизняним даними, так і по закордонним, стійкість складених опорних валків в 2-3 рази більше, ніж цільнокованих. У цей час у ряді країн спостерігається інтенсивний розвиток виробництва бандажованих валків. Досвід експлуатації великих складених опорних валків листових станів за кордоном показує, що багаторазове використання осі є вигідним заходом.

Застосування складених конструкцій відкриває широкі перспективи в створенні унікальних, великогабаритних валків, потреба в яких назріла у зв'язку зі зрослою потребою в широкому товстому листі. Будівництво станів типу 3000-5000 вимагає створення надійних конструкцій складених валків, маса яких доходить до 250 т. Слід зазначити, що при виготовленні й експлуатації великогабаритних конструкцій особливу роль здобуває масштабний фактор. Як

відомо, при великогабаритних виливках (зливках) і куваннях ураженість їх дефектами металургійного виробництва, а також виниклими в результаті наступних технологічних операцій зростає зі збільшенням розважування заготовок.

Вплив масштабного фактора позначається й в іншім відношенні. Виявляється, чому більший обсяг деталі є під впливом того самого рівня напруг, тим більше ймовірність виникнення тріщин в області деталі з високим рівнем напруг. Тому ймовірність виникнення руйнування підвищується зі збільшенням габаритів деталей, виготовлених з тих самих матеріалів. У зв'язку з відзначеним вище доцільність виготовлення великогабаритних валків у складенім виконанні очевидна.

Широке застосування складові валки одержали при виробництві стрічки й а плющильних станах. На цих станах використовують робочі валки діаметром від 50 до 200 мм. Бандажі виготовляють із твердих сплавів, що збільшує твердість валкової системи й забезпечує підвищення точності розмірів і поліпшення якості поверхні прокату. Твердість поверхні бандажів із твердих сплавів становить HRC 88-92; модуль пружності їх більш ніж в 2, 5 рази перевищує модуль пружності звичайних валкових сталей. Стійкість таких валків в 10-50 раз вище, чим сталевих загартованих.

Використання складених валків досить перспективно на сортопрокатних станах, призначених для прокатки малотоннажних партій (300-400 профіле-розмірів). З обліком багатосортаментноъ продукції при достатный кылькосты профілерозмірів комплекти валків зберігаються багато років і за одну установку в кліть зношуються незначно. Сума втрат при такому використанні валків залежить від величини їх запасу й часу знаходження валків у запасі. Розрахунки показують, що сума додаткових втрат у результаті «заморожування», недовикористання й наступної ліквідації недовикористаних валків при виробництві кожного профілю досить значна. Використання ж складених валків виключає втрати при довгочасному складуванні й при так званому недовикористанні металу валків, коли неможливо організувати нарізку нових калібрів.

3.3 Імітаційне моделювання практичного застосування складених валків у порівнянні з цільнокованним у системі 3D моделювання APM FEM

За результатами досліджень в розділі 1.3 запропоновано до впровадження складених валків з двома принципово різними методами фіксації бандажу на осі. Для перевірки адекватності запропонованих рішень скористаємося 3D моделюванням заснованим на принципах використання розрахунку методом скінченних елементів. Для порівнювального аналізу створимо 3D модель цільнокованного прокатного валка та запропонованих бандажованих із фіксацією бандажу напівбуртом та конічними втулками, конструктивні особливості яких описані в роділі 1.3.

Модель цільнокованного валка з прикладенними до нього зусиллями попередньо розрахованими в розділах в 2.1-2.2 наведено на рисунку 3.9

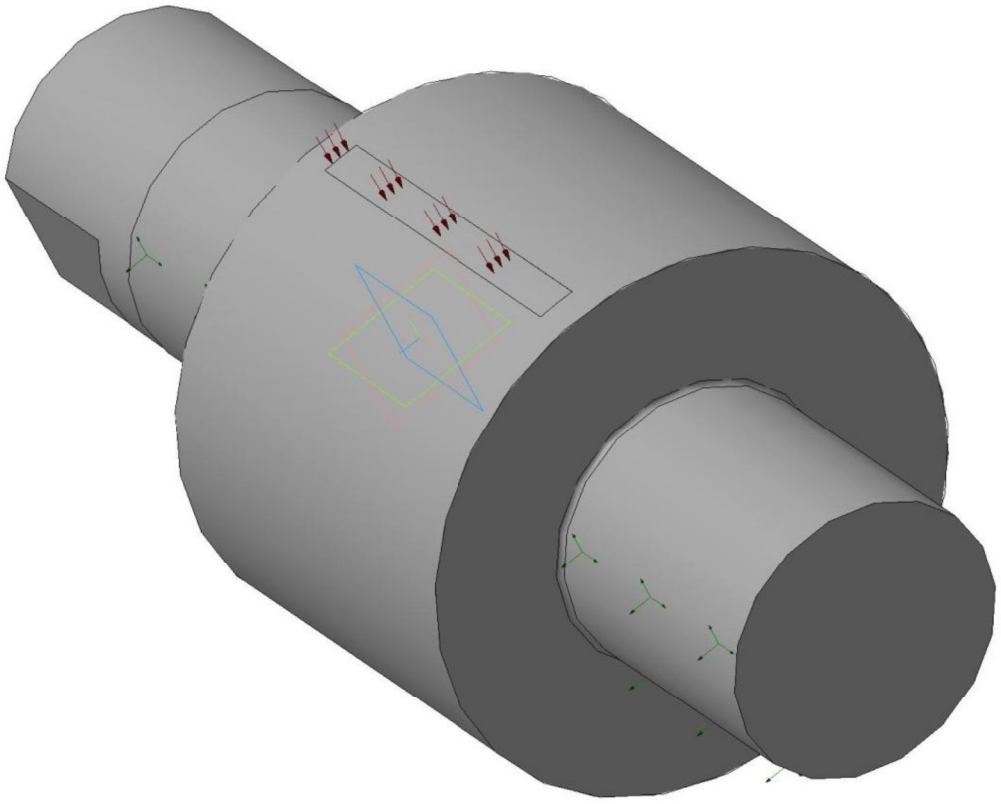


Рисунок 3.9 – 3D модель цільнокованного валка з прикладенними до нього зусиллям прокатки

2) Інформація про матеріали

N	Ім'я деталі	Матеріал
1	Валок цільнокованний	Сталь 50ХН

Назва матеріала: **Сталь 50ХН**

Межа плинності [МПа]	1520
Модуль пружності нормальний [МПа]	210000
Коефіцієнт Пуассона	0.3
Щільність [кг/м^3]	7860
Температурний коефіцієнт лінійного розширення [1/C]	0.000012
Теплопровідність [Вт/(м*C)]	44
Межа міцності при стиску [МПа]	1080
Межа витривалості при розтягуванні [МПа]	477
Межа витривалості при крученні [МПа]	270

3) Інформація про навантаження

Найменування	Обрані об’єкти	Параметри навантаження
Тиск: Тиск:1	Грані: 1	Величина: 74.7 Н/мм^2

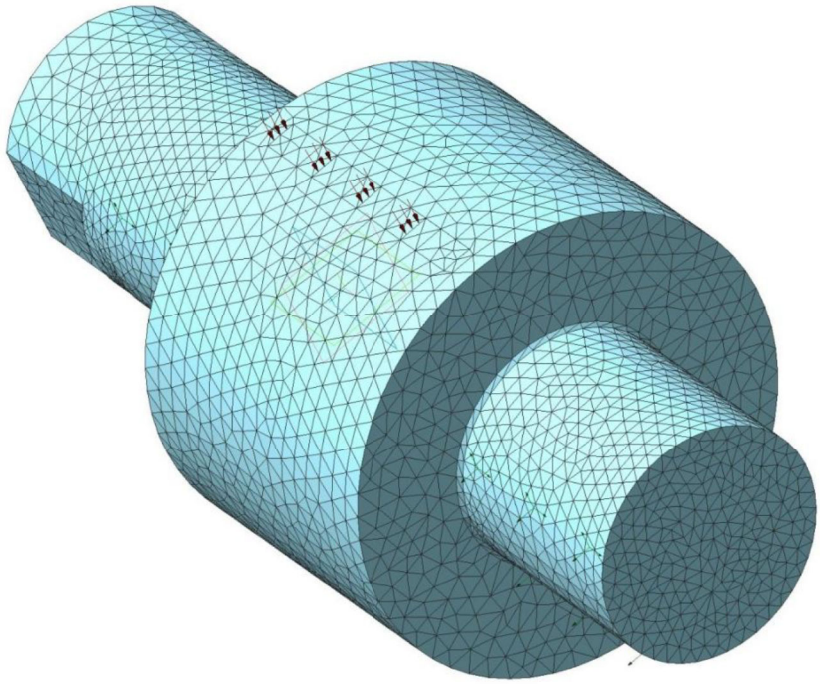
4) Інформація про закріплення

Найменування	Обрані об’єкти	X [мм]	Y [мм]	Z [мм]	Rot. X [град]	Rot. Y [град]	Rot. Z [град]
Закріпленння: Закріпленння:1	Грані: 2	Заборон.	Заборон.	Заборон.	-	-	-

5) Кінцевоо-елементна сітка

Параметри та результати розбивання

Найменування	Значення
Максимальна довжина сторони елемента [мм]	12
Максимальний коефіцієнт згущення на поверхні	6
Коефициент розрідження в об’ємі	1.5
Кількість кінцевихх елементів	21107
Кількість вузлів	5580



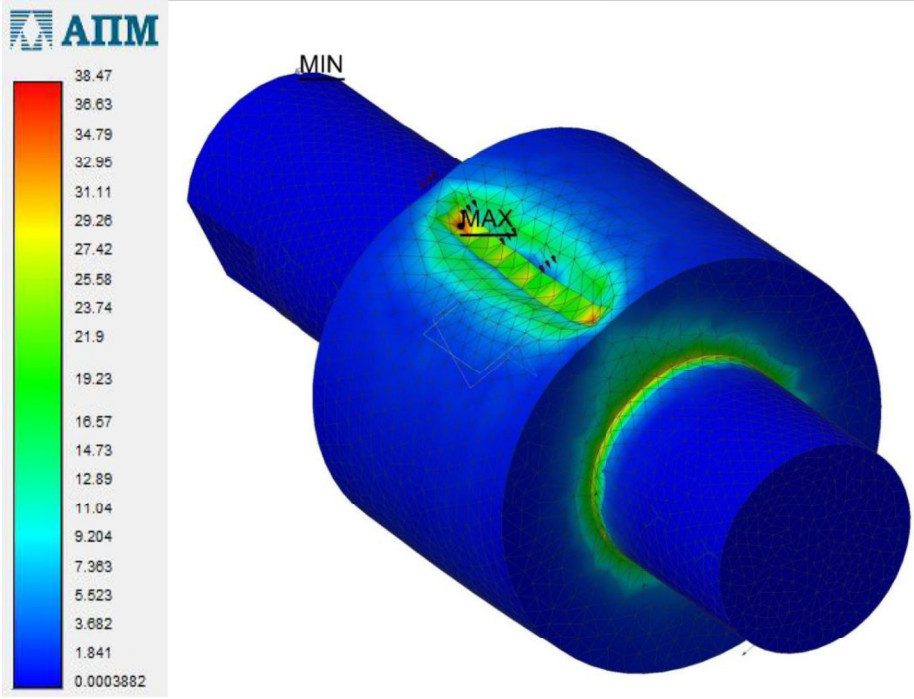
6) Результати

Інерційні характеристики моделі

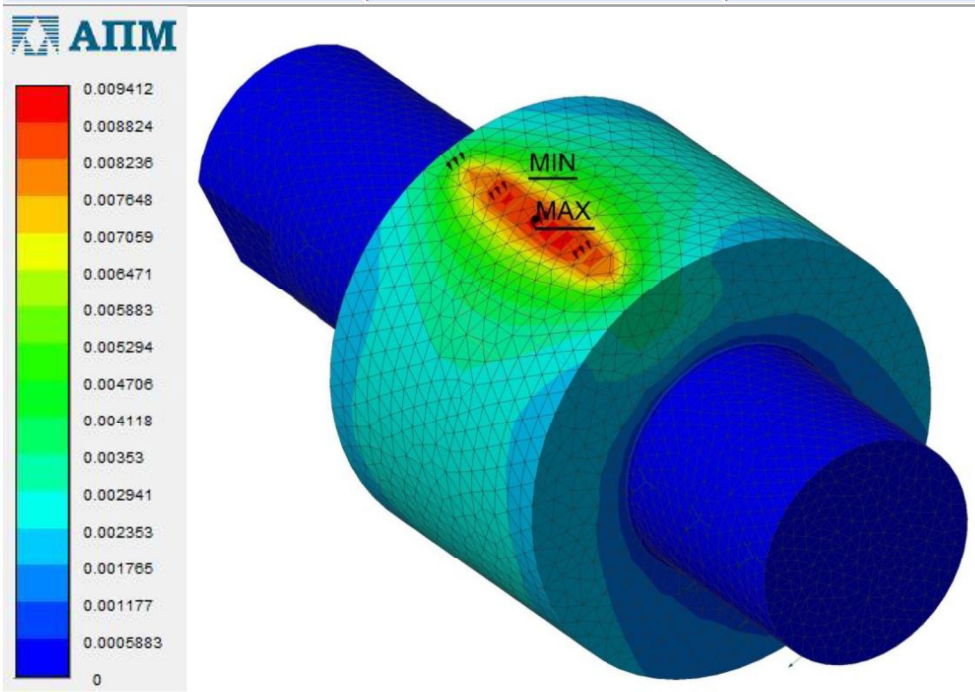
Найменування	Значення
Маса моделі [кг]	73.276997
Центр тяжкості моделі [м]	(0.073278 ; 0.000001 ; -0.000001)
Моменти інерції моделі відносно центра мас [кг*м^2]	(1.170676 ; 0.170853 ; 0.170516)
Реактивний момент відносно центра мас [Н*м]	(-0.190732 ; -18.839136 ; 2759.850919)
Сумарна реакція опор [Н]	(2.034484 ; 149967.495983 ; 26.606633)
Абсолютне значення реакції [Н]	149967.498357
Абсолютне значення момента [Н*м]	2759.915224

Результати статичного розрахунку

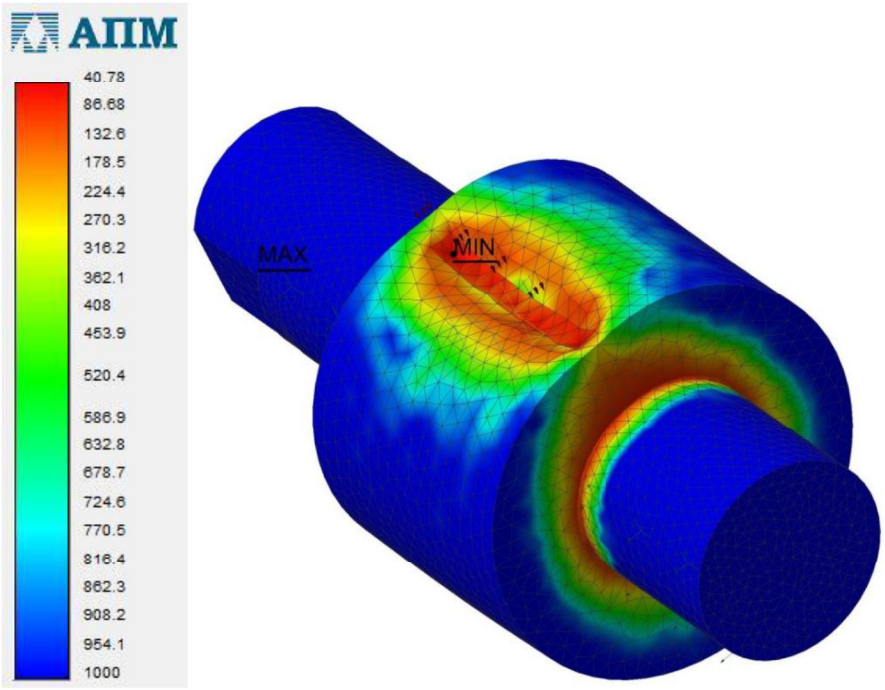
Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Еквівалентне напруження по Мізесу	SVM [МПа]	0.000388	38.468552



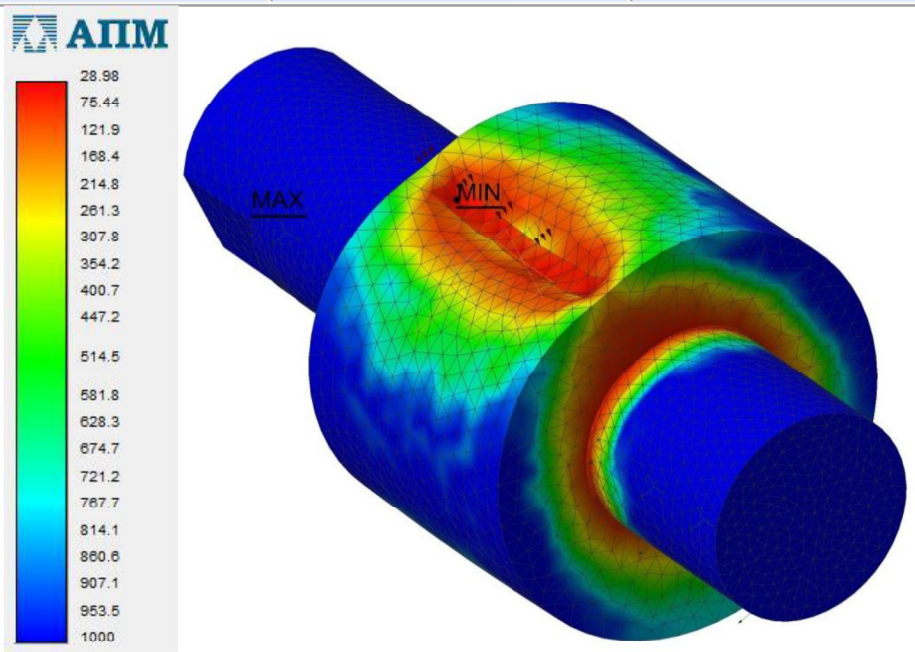
Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Сумарне лінейне переміщенння	USUM [мм]	0	0.009412



Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по плинності		40.781082	1000



Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по міцності		28.976032	1000



З виконаного дослідження можна зробити висновок, що прикладені навантаження відповідають закладеним параметрам міцності валка. Різниця в напруженнях при «ручному» розрахунку σ=57,85 МПа та при імітаційному моделюванню σ=38, 5 МПа викликана різними методиками розрахунку, але в обох випадках розрахункові напруження менші допускаємих [σ]=120 МПа, що підтверджує працездатність валка. При розрахунку деформацій отримали 100 % співпадіння f=0,009, що значно менше допускаємих [f]=0,3…1.

Таким чином можна зробити висновок, що доцільно провести імітаційні дослідження і для бандажованих валків.

3D модель бандажованого робочого валка з фіксацією бандажа напівбуртом з прикладеними до нього зусиллями прокатки, які попередньо розраховані в розділах в 2.1-2.2 наведено на рисунку 3.10. Для достовірності виконання розрахунків матеріал бандажованих валків приймемо аналогічний з цільнокованним.

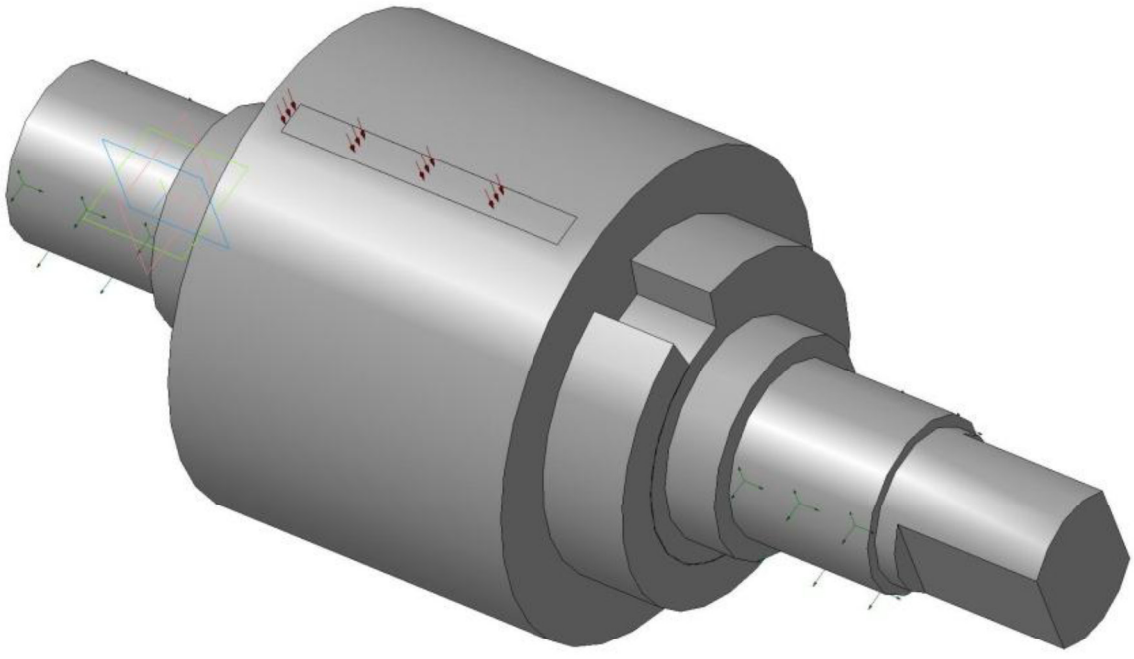


Рисунок 3.10 – 3D модель складеного робочого валка з фіксацією бандажу напівбуртом з прикладенними до нього зусиллям прокатки

Назва матеріала: **Сталь 50ХН**

Межа плинності [МПа]	1520
Модуль пружності нормальний [МПа]	210000
Коефіцієнт Пуассона	0.3
Щільність [кг/м^3]	7860
Температурний коефіцієнт лінійного розширення [1/C]	0.000012
Теплопровідність [Вт/(м*C)]	44
Межа міцності при стиску [МПа]	1080
Межа витривалості при розтягуванні [МПа]	477
Межа витривалості при крученні [МПа]	270

3) Інформація про навантаження

Найменування	**Обрані об'єкти**	**Параметри навантаження**
Тиск: Тиск:1	Грані: 1	Величина: 74.7 Н/мм^2

Найменування	1-а деталь	2-а деталь	Тип контакту	Радіус [мм]
Співпадні поверхні: Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр. - Вал-3А_Гайка	Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр..m3d Грані: 3	Вал-3А_Гайка.m3d Грані: 14	Жорсткий контакт	2
Совпадающие поверхности: Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр. - Вал-3А _Вісь	Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр..m3d Грані: 3	Вал-3А _Ось.m3d Грані: 1	Жорсткий контакт	2
Співпадні поверхні : Вал-4А_Втулка Конич. Внутр. - Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр .	Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр..m3d Грані: 3	Вал-4А_Втулка Коніч. Наружн..m3d Грані: 2	Жорсткий контакт	2
Співпадні поверхні : Вал-3А_Гайка - Вал-3А _Вісь	Вал-3А_Гайка.m3d Грані: 3	Вал-3А _Ось.m3d Грані: 1	Жорсткий контакт т	2
Співпадні поверхні: Вал-3А_Бандаж - Вал-3А _Вісь	Вал-3А_Бандаж.m3d Грані: 8	Вал-3А _Ось.m3d Грані: 7	Жорсткий контакт	2
Співпадні поверхні : Вал-3А_Бандаж - Вал-4А_Втулка Коніч. Зовн.	Вал-3А_Бандаж.m3d Грані: 3	Вал-4А_Втулка Коніч. Зовн..m3d Грані: 5	Жорсткий контакт	2

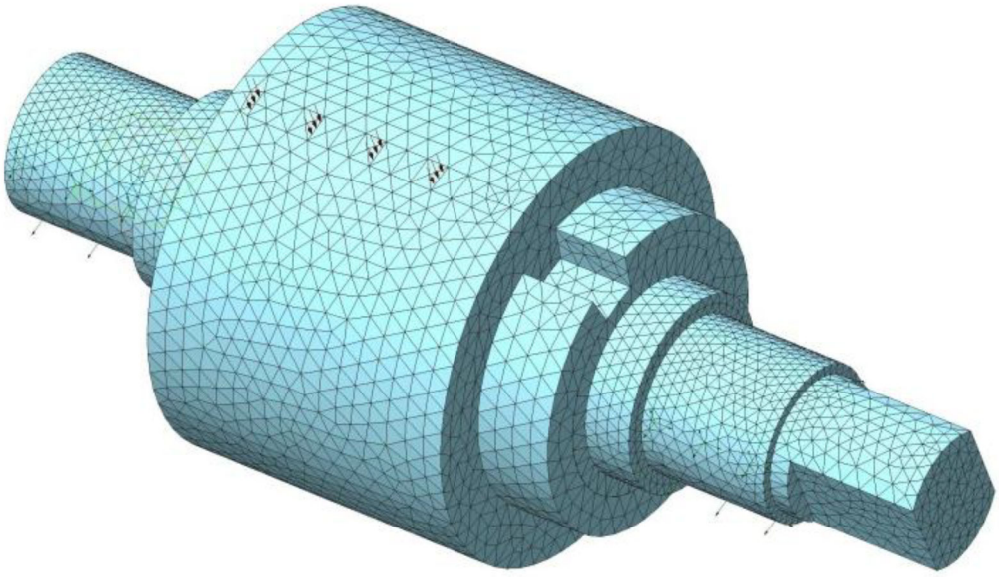
4) Інформація про закріплення

Найменування	Обрані об’єкти	X [мм]	Y [мм]	Z [мм]	Rot. X [град]	Rot. Y [град]	Rot. Z [град]
Закріпленння: Закріпленння:1	Грані: 2	Заборон.	Заборон.	Заборон.	-	-	-

5) Кінцево-елементна сітка

Параметри та результати розбивання

Найменування	**Значення**
Максимальна довжина сторони елемента [мм]	12
Максимальний коефіцієнт згущення на поверхні	6
Коефициент розрідження в об’ємі	1.5
Кількість кінцевихх елементів	42542
Кількість вузлів	12951



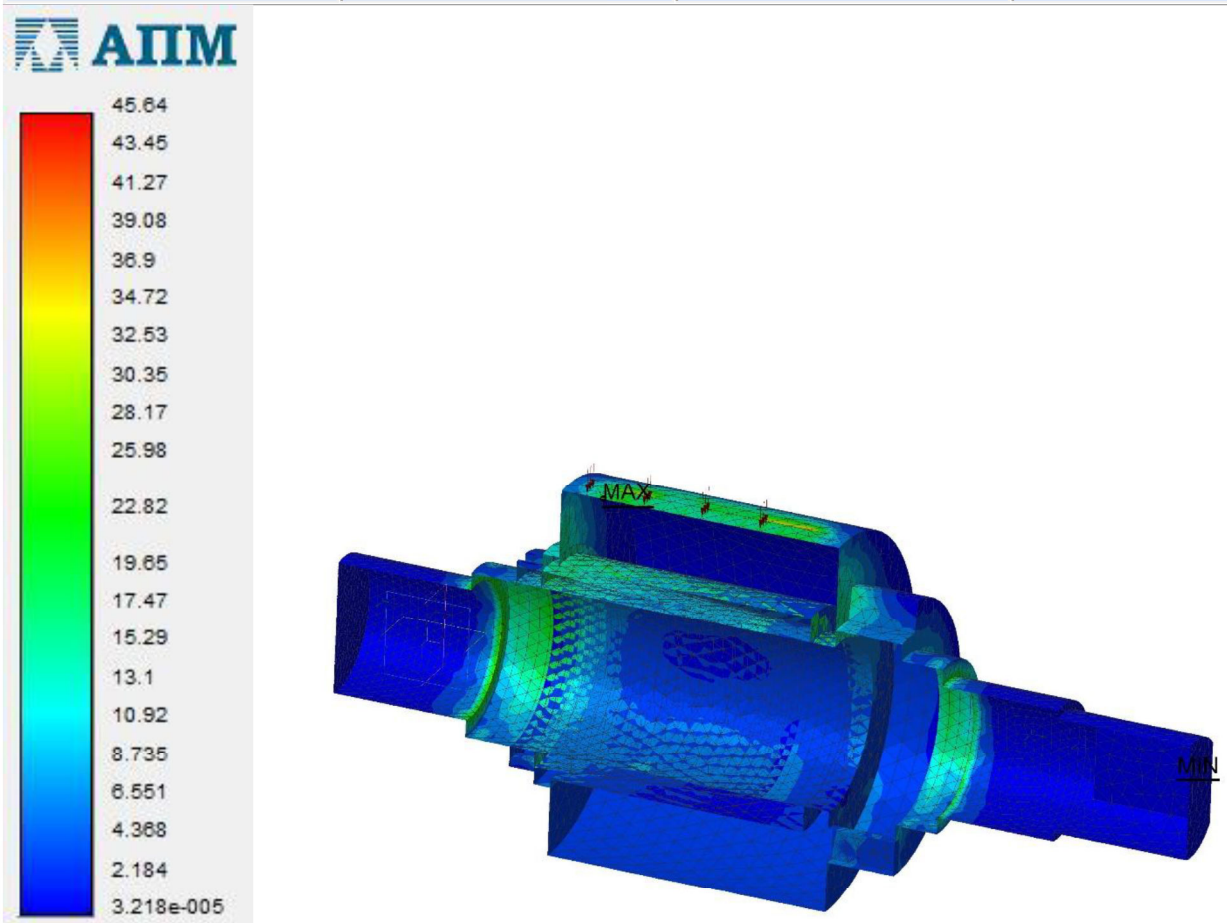
6) Результати

Інерційні характеристики моделі

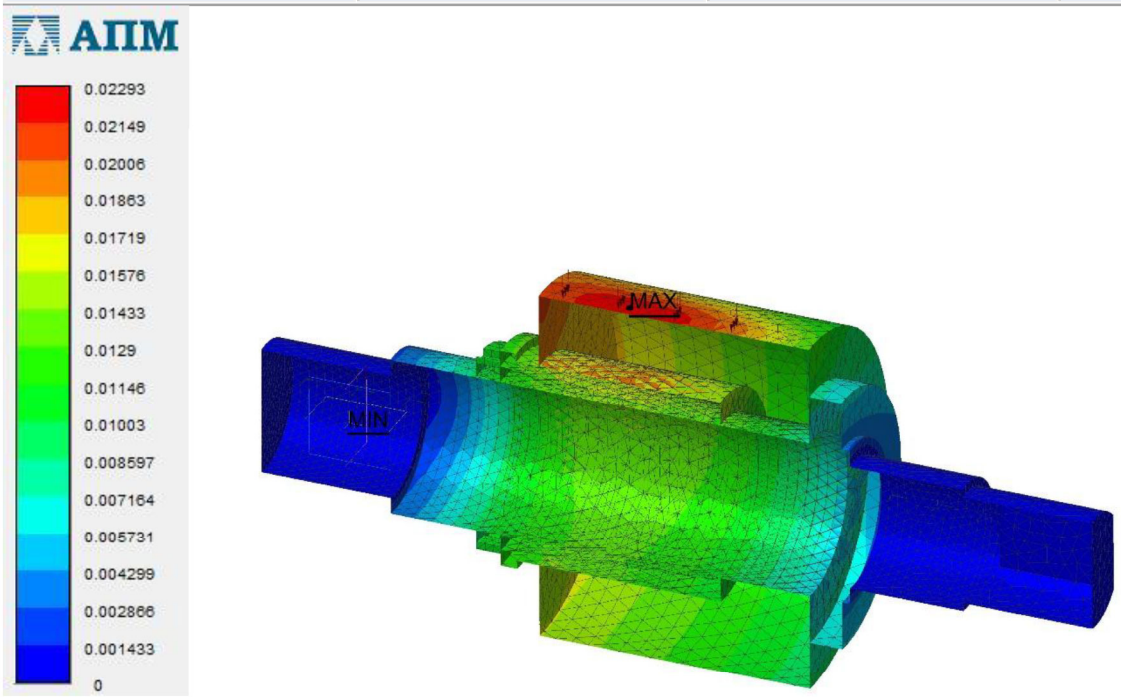
Найменування	**Значення**
Маса моделі [кг]	70.00326
Центр тяжкості моделі [м]	(0.176595 ; -0.000151 ; -0.000003)
Моменти інерції моделі відносно центра мас [кг*м^2]	(2.762676 ; 0.168955 ; 0.169666)
Реактивний момент відносно центра мас [Н*м]	(-94.035848 ; 12.584109 ; -2361.257067)
Сумарна реакція опор [Н]	(-6.154694 ; 147255.295979 ; -333.552868)
Абсолютне значення реакції [Н]	147255.673878
Абсолютне значення момента [Н*м]	2363.162296

Результати статичного розрахунку

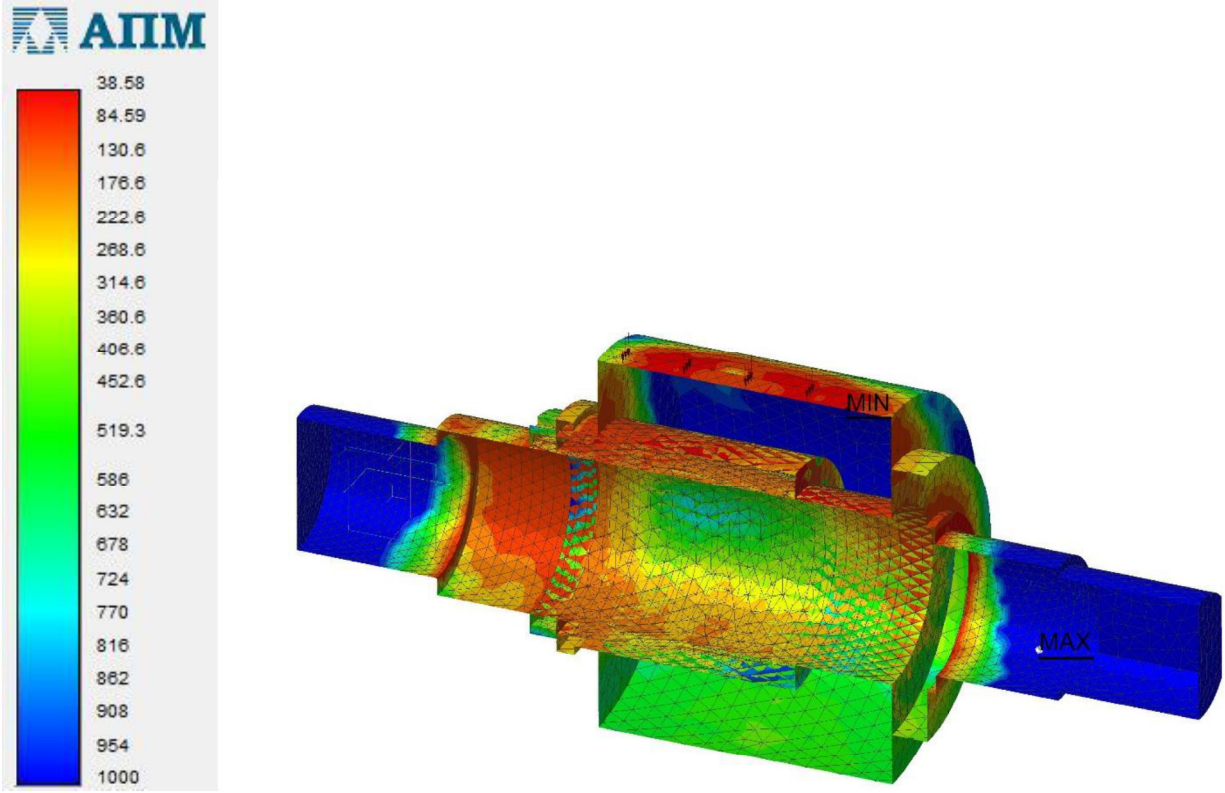
Найменування	**Тип**	**Мінімальне значення**	**Максимальне значення**
Еквівалентне напруження по Мізесу	SVM [МПа]	0.000032	45.635975



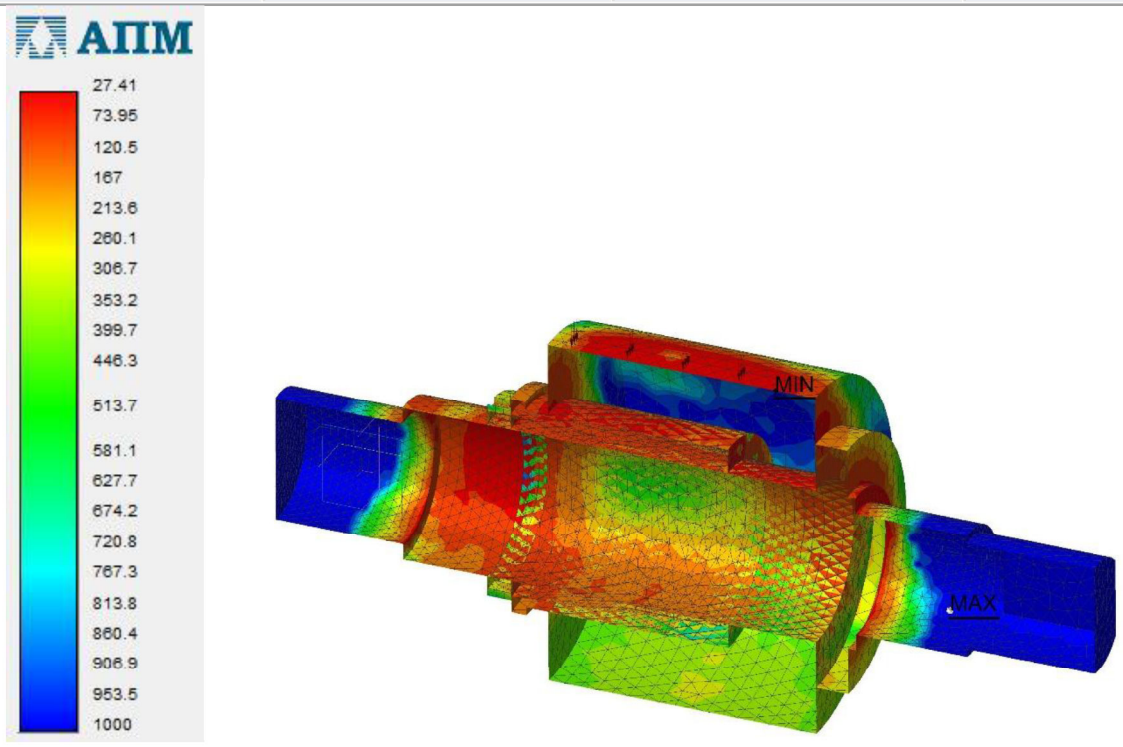
Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Сумарне лінейне переміщенння	USUM [мм]	0	0.022926



Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по плинності		38.580769	1000



Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по міцності		27.412652	1000



З виконаного імітаційного моделювання практичного застосування бандажованого валка із фіксацією бандажу напівбуртом можна зробити висновок, що валок відповідає виробничим вимогам. Виникаючі напруження σ=45,63 МПа значно менші допускаємих [σ]=120 МПа, що підтверджує надійності валка. Виникаючий прогин менше мінімально допустимого [f]=0,3…1 мм майже в 15 разів та складає всього f=0.022471 мм.

3D модель бандажованого робочого валка із закріпленням бандажу конічними втулками з прикладенними до нього зусиллями попередньо розрахованими в розділах в 2.1-2.2 наведено на рисунку 3.11

Для достовірності виконання розрахунків матеріал виготовлення запропонованої конструкції складеного валка приймемо аналогічний з попееередніми розрахунками.

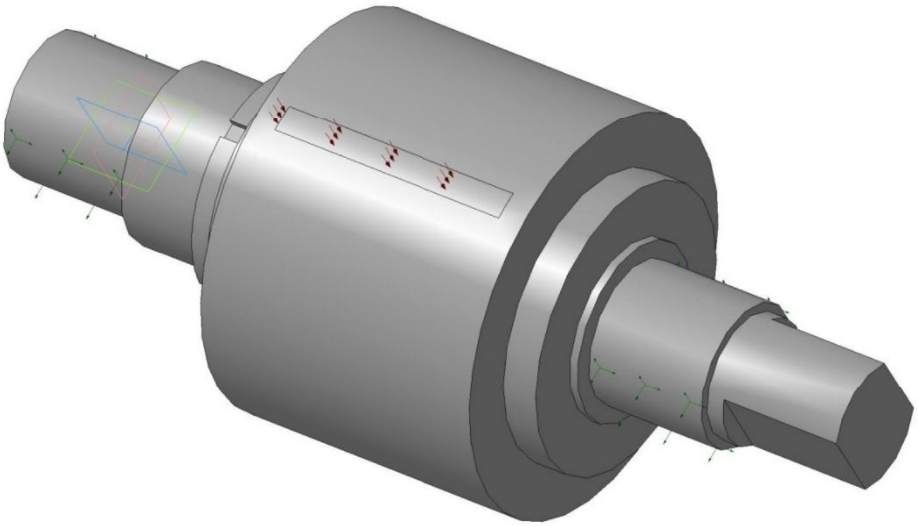


Рисунок 3.11 – 3D модель складеного робочого валка із фіксацією бандажу конічними втулками з прикладенними до нього зусиллям прокатки

Назва матеріала: **Сталь 50ХН**

Межа плинності [МПа]	1520
Модуль пружності нормальний [МПа]	210000
Коефіцієнт Пуассона	0.3
Щільність [кг/м^3]	7860
Температурний коефіцієнт лінійного розширення [1/C]	0.000012
Теплопровідність [Вт/(м*C)]	44
Межа міцності при стиску [МПа]	1080
Межа витривалості при розтягуванні [МПа]	477
Межа витривалості при крученні [МПа]	270

3) Інформація про навантаження

Найменування	Обрані об’єкти	Параметри навантаження
Тиск: Тиск:1	Грані: 1	Величина: 74.7 Н/мм^2

4) Інформація про закріплення

Найменування	**Обрані об’єкти**	**X [мм]**	**Y [мм]**	**Z [мм]**	**Rot. X [град]**	**Rot. Y [град]**	**Rot. Z [град]**
Закріпленння: Закріпленння:1	Грані: 2	Заборон.	Заборон.	Заборон.	-	-	-

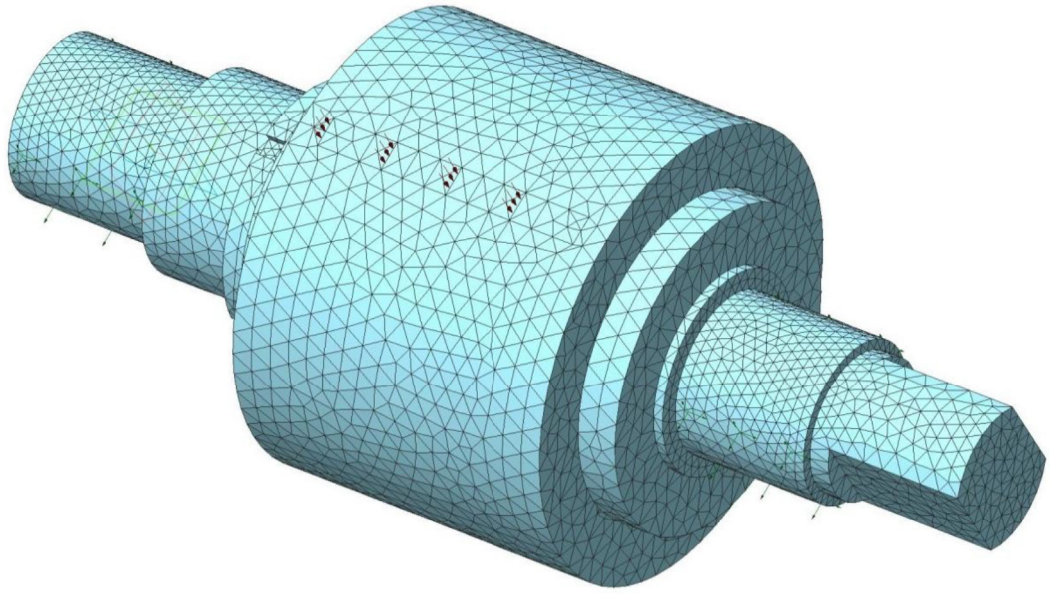
5) Інформація про співпадні поверхні

Найменування	1-а деталь	2-а деталь	Тип контакту	Радіус [мм]
Співпадні поверхні: Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр. - Вал-3А_Гайка	Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр..m3d Грані: 3	Вал-3А_Гайка.m3d Грані: 14	Жорсткий контакт	2
Совпадающие поверхности: Вал-4А_Втулка Конич. Внутр. - Вал-3А _Вісь	Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр..m3d Грані: 3	Вал-3А _Ось.m3d Грані: 1	Жорсткий контакт	2
Співпадні поверхні : Вал-4А_Втулка Конич. Внутр. - Вал-4А_Втулка Коніч. внутрішн.	Вал-4А_Втулка Коніч. Внутр..m3d Грані: 3	Вал-4А_Втулка Коніч. Наружн..m3d Грані: 2	Жорсткий контакт	2
Співпадні поверхні : Вал-3А_Гайка - Вал-3А _Вісь	Вал-3А_Гайка.m3d Грані: 3	Вал-3А _Ось.m3d Грані: 1	Жорсткий контакт т	2
Співпадні поверхні: Вал-3А_Бандаж - Вал-3А _Вісь	Вал-3А_Бандаж.m3d Грані: 8	Вал-3А _Ось.m3d Грані: 7	Жорсткий контакт	2
Співпадні поверхні : Вал-3А_Бандаж - Вал-4А_Втулка Коніч. Зовн.	Вал-3А_Бандаж.m3d Грані: 3	Вал-4А_Втулка Коніч. Зовн..m3d Грані: 5	Жорсткий контакт	2

6) Кінцево-елементна сітка

Параметри та результати розбивання

Найменування	**Значення**
Максимальна довжина сторони елемента [мм]	12
Максимальний коефіцієнт згущення на поверхні	6
Коефициент розрідження в об’ємі	1.5
Кількість кінцевихх елементів	41897
Кількість вузлів	12648



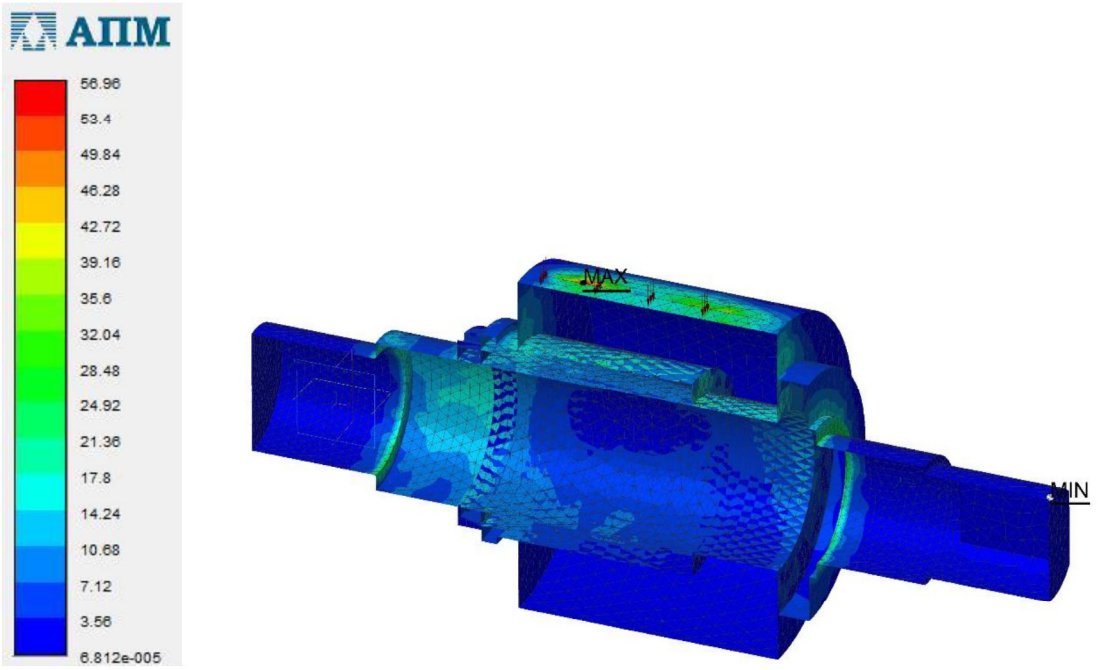
7) Результати

Інерційні характеристики моделі

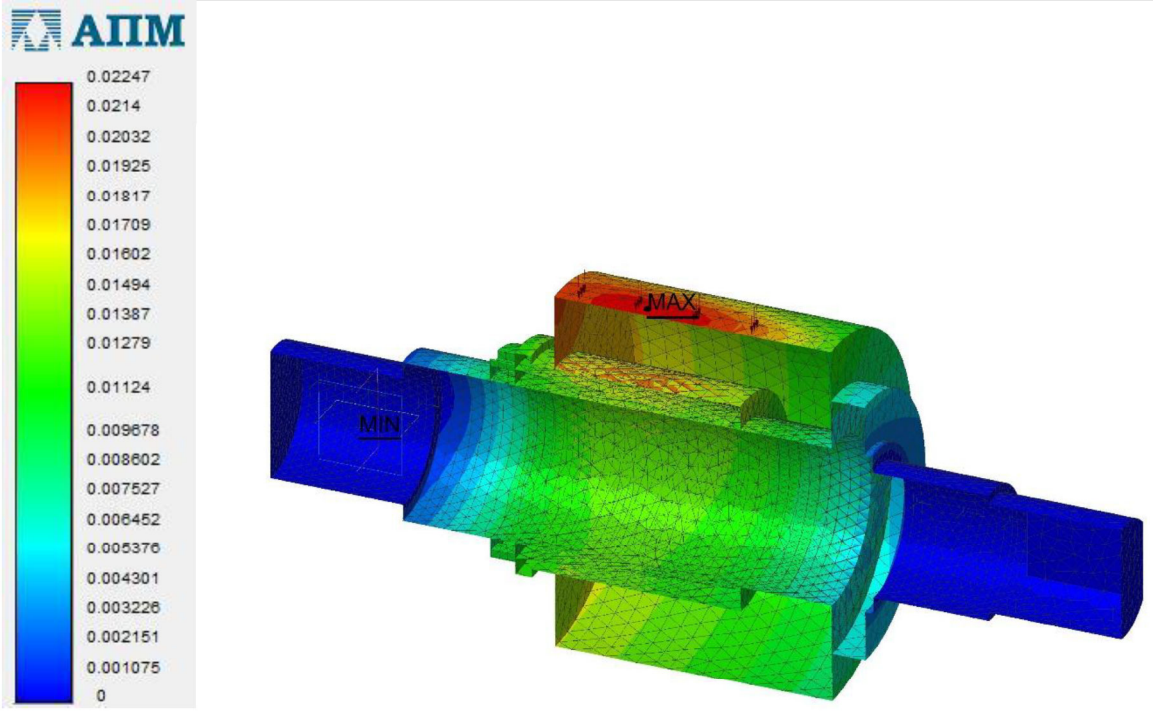
Наименование	**Значення**
Найменування	68.882931
Маса моделі [кг]	(0.198106 ; 0.000002 ; -0.000005)
Центр тяжкості моделі [м]	(3.26837 ; 0.166555 ; 0.166554)
Моменти інерції моделі відносно центра мас [кг*м^2]	(-6.756008 ; -10.971285 ; 795.488286)
Реактивний момент відносно центра мас [Н*м]	(-0.004728 ; 147169.507647 ; 1.19765)
Сумарна реакція опор [Н]	147169.507652
Абсолютне значення реакції [Н]	795.592626

Результати статичного розрахунку

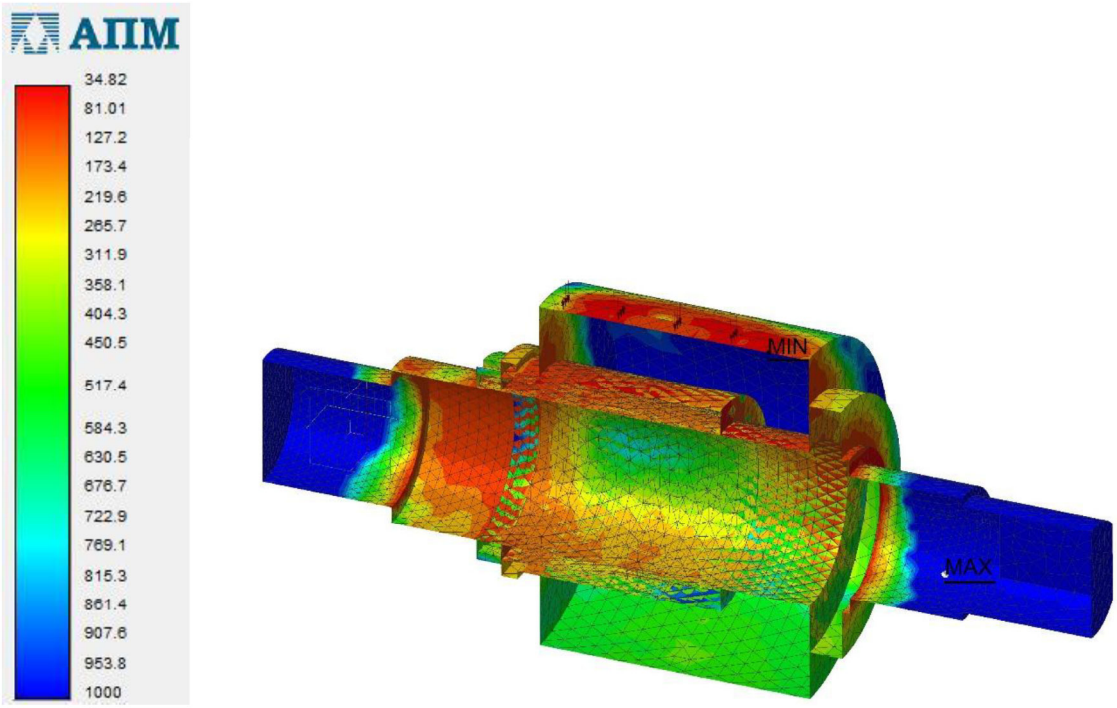
Найменування	**Тип**	**Мінімальне значення**	**Максимальне значення**
Еквівалентне напруження по Мізесу	SVM [МПа]	0.000068	56.958809



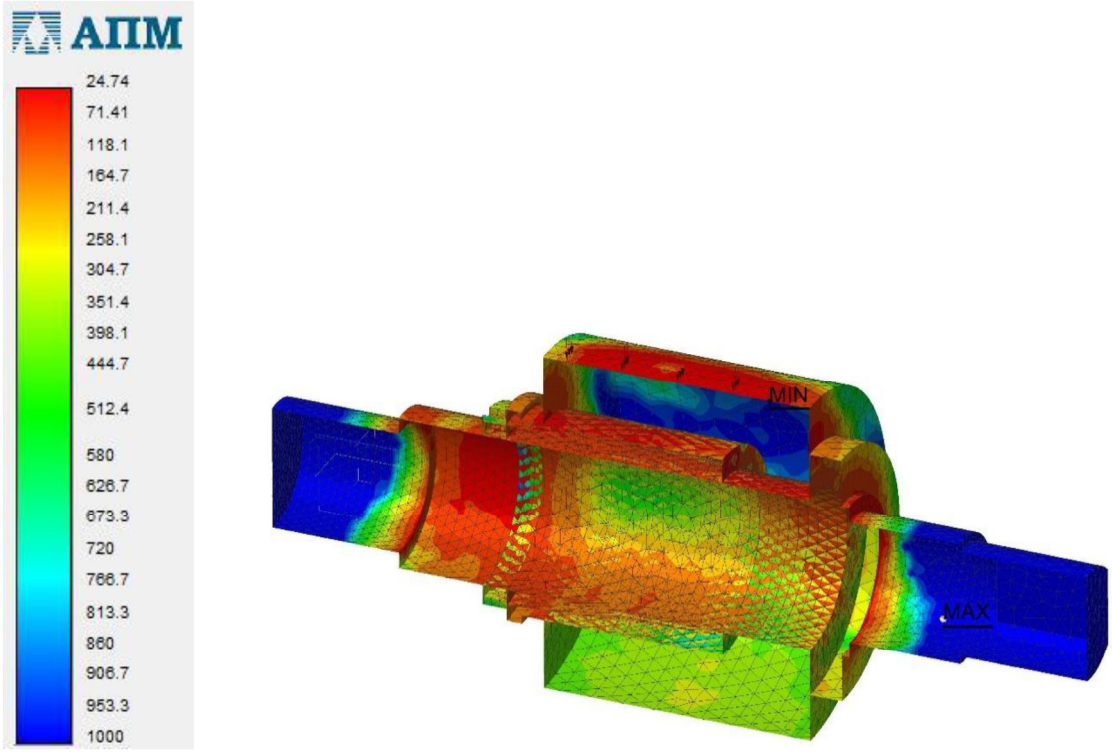
Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Сумарне лінейне переміщенння	USUM [мм]	0	0.022471



Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по плинності		34.820141	1000



Найменування	Тип	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по міцності		24.740627	1000



Результати імітаційного моделювання промислового впровадження підтверджують вірність обраних рішень по зміні конструкції прокатного валка. Напруження, що виникають в тілі валка (σ=56,95 МПа) значно менші допустимих – [σ]=120 МПа, що підтверджує працездатність валка при цьому коефіцієнт запасу по напруженням перевищує 2. Розрахунковий прогин у розмірі f=0.022471 мм, значно менше допустимого [f]=0,3…1 мм, таким чином жорсткість конструкції забезпечується, що є важливим фактором для використання складених прокатних валків

За загальними результатами порівняльного аналізу імітаційного моделювання впровадження складених конструкцій прокатних валків можна зробити висновок, що їхнє використання є доволі перспективним рішенням. При рівних технологічних умовах вони витримують співставні навантаження по відношенню до цільнокованих валків, але в свою чергу мають переваги перед ними, описані в розділі 1. Із запропонованих конструкцій бандажованих валків найбільш оптимальною є конструкція із закріпленням бандажу конічними втулками. По перше з точки зору виготовлення вона є технологічно простішою, а по друге має меншу матеріалоємність моделі –68,88 кг у порівнянні з 70 кг – для бандажованого валка із напівбуртом, при близько рівних технологічних можливостях.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ

4.1 Виявлення шкідливих факторів у листопрокатному виробництві та їхня оцінка

Листопрокатне виробництво належить до категорії енергоємних і потенційно небезпечних галузей металургійного комплексу, де на працівників впливає комплекс фізичних, хімічних і психофізіологічних факторів виробничого середовища. Виявлення та оцінка шкідливих факторів є необхідною передумовою для забезпечення безпечних умов праці, розроблення ефективних заходів охорони праці та екологічної безпеки.

Згідно з вимогами [70-73], шкідливим вважається будь-який виробничий фактор, вплив якого на працівника за певних умов може призвести до погіршення стану здоров'я або професійного захворювання. У листопрокатному виробництві джерелами таких факторів є технологічне обладнання, процеси нагріву, обтиснення, транспортування металу, використання системи охолодження з мастильно-охолоджувальними рідинами (МОР), а також допоміжне устаткування.

До фізичних факторів впливу відносяться:

– підвищена температура повітря робочої зони – у зоні гарячої прокатки температура може перевищувати 40÷45 °С через випромінювання нагрітих заготовок, печей і валків. Тривала дія високих температур призводить до перегріву організму, зниження працездатності та підвищення ризику теплових ударів.

– інфрачервоне (теплове) випромінювання – інтенсивність інфрачервоного випромінювання біля прокатних клітей сягає 350–500 Вт/м², що перевищує допустимі норми, визначені [74]. Необхідне застосування тепловідбивних екранів [75] і засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) – окулярів, щитків, спецодягу з алюмінізованими вставками.

– підвищений рівень шуму та вібрації – рівень шуму при перетіканні виробничого процесу в робочих клітях гарячої прокатки становить 95–110 дБ, що перевищує допустимі 80 дБ [76]. Основними джерелами шуму є редуктори, приводи валків, гідравлічні системи та транспортери. Вібраційні навантаження передаються через фундаменти клітей і робочі платформи, що може призвести до професійних захворювань опорно-рухового апарату.
– gідвищена запиленість та загазованість повітря – в процесах нагрівання, обтискання і різання металу утворюються оксиди заліза (FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4), пил з вмістом важких металів, а також гази – оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки. Концентрації пилу можуть досягати 10–15 мг/м³ при нормі 4 мг/м³.

До хімічних шкідливих факторів можна віднести:

– мастильно-охолоджувальні рідини (МОР) – використання емульсійних складів на основі мінеральних масел і синтетичних добавок створює небезпеку контакту працівників зі шкірою і дихальними шляхами. Пари МОР містять альдегіди, аміни та інші токсичні сполуки, що викликають алергічні реакції та подразнення слизових оболонок.
– продукти згоряння та термічного розкладу – у зоні нагрівальних печей і після обтиснення металу можуть виділятися CO, CO_2, NO_x, SO_2, а також сажа. За результатами вимірювань у листопрокатних цехах концентрація CO нерідко перевищує 20 мг/м³, що близьке до гранично допустимої концентрації (ГДК = 20 мг/м³).

Робота операторів пультів керування, машиністів прокатних клітей та крановиків супроводжується високою емоційною напругою, необхідністю швидкого реагування на зміну параметрів процесу. Нерідко спостерігається монотонність праці або, навпаки, висока інтенсивність робочих дій. Такі фактори можуть призводити до нервово-емоційного виснаження, зниження уваги та підвищення ризику травматизму.

Відповідно до гігієнічної класифікації праці [74], умови праці у листопрокатному виробництві відносяться переважно до класу 3 (шкідливі), підкласів 3.1–3.3 залежно від інтенсивності впливу факторів.

В таблиці 4.1 приведена карта умов праці механослужби [26].

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого й трудового процесу.Професія: слюсар-ремонтник, місце роботи: реверсивний прокатний стан 1680

Фактори	Нормативне значення, ГДК, ГДУ	Фактичне значення	III клас шкідливих і небезпечних умов., і характер праці			Час дії фактора % у зміну
			1 ступ.	2 ступ.	3 ступ.	
I. Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3						
1 клас небезпеки						
2 клас небезпеки						
Марганцю оксиди (дезінтегр)	0,3	0,56	1,87р			83,1
3–4 клас небезпеки						
Масла мінеральні	5,0	6,5	1,3р			83,1
Азоту діоксид	2,0	4,0	2р			83,1
Ангідрид сірчистий	10,0	13,5	1,35р			83,1
II. Пил переважно фіброгенної дії, мг/м^3	4	25			6,3р	
III. Шум, дБ	80	96			16	100
IV. Мікроклімат у приміщенні						
– температура повітря, °С	16–27	37		10		83,1
V. Робоча поза						
Важкість праці		IIа		серед.		
Напруженність праці				помір.		
Кількість факторів			4	1	3	

Найбільш критичними параметрами є:

- температура повітря робочої зони – 37 °С (перевищення максимальнодопустимої норми у 1,4 рази);
- рівень шуму – 96 дБ (перевищення норми у 16 дБ);
- концентрація пилу металевих оксидів – до 10 мг/м³ (перевищення у 2,5 раза);

Робітники, що обслуговують цех гарячого прокатки тонкого листа, постійно пов'язані з розпеченим металом. Недбалість при роботі з ним може бути причиною нещасного випадку. Найбільшу небезпеку представляє устаткування для переробки й транспортування штаб і рулонів: робочі кліті, кантувачі, електромостові крани.

Багато операцій у цехові супроводжуються створенням шумів низької й високої частоти. Рівень шуму на 50 % перевищує стандартні припустимі норми 80 дБА. ДСН 3.3.6.037-99. Шумові виділення відбуваються при різанні штаби на ножицях, виправлення її на правильних машинах і т.д. Подача нагрітих зливків від нагрівальних колодязів до прокатного стану є в основному безпечною операцією. Однак при транспортуванні злитків з не застиглою серцевиною зливковозами можливе виплюхування рідкого металу, падіння гарячої окалини, теплові опіки.

Процес подачі, транспортування та оброблення слябів і штаби на дільниці повністю механізований, що забезпечує стабільність технологічного циклу та зменшує фізичне навантаження на персонал. Для контролю параметрів роботи обладнання та забезпечення його своєчасного технічного обслуговування застосовуються контрольно-вимірювальні прилади, розташовані на постах управління прокатного стану. Організація робочих постів забезпечує оператору зручний огляд основного технологічного обладнання – робочих клітей, рольгангів і допоміжних механізмів, що сприяє оперативному реагуванню на зміни в процесі прокатки та підвищує рівень безпеки праці.

Відповідно до карти умов праці, професія оператора (або працівника даної дільниці) відноситься до категорії робіт із третім ступенем шкідливості та

небезпеки, що обумовлено впливом таких факторів, як запиленість повітря, підвищений рівень шуму та температура робочої зони.

Оцінка гігієнічних умов робочого місця:

За гігієнічною класифікацією умови праці на даному робочому місці належать до III класу, 3-ї ступені, тобто характеризуються як шкідливі, з перевищенням гранично допустимих рівнів окремих факторів виробничого середовища.

Технічна та організаційна оцінка

Робоче місце відповідає чинній технічній документації, вимогам проєкту організації робіт та забезпечене необхідними засобами контролю, безпеки й зв'язку. Усі технологічні операції виконуються відповідно до затверджених регламентів, що мінімізує ризик аварійних ситуацій.

Атестація робочого місця

Результати атестації засвідчили наявність трьох факторів першого ступеня, двох – другого ступеня та трьох – третього ступеня шкідливості. З урахуванням їх сукупного впливу робоче місце віднесено до категорії з особливо шкідливими та особливо небезпечними умовами праці.

Працівникам, зайнятим на даній дільниці, надаються передбачені пільги:

- додаткова відпустка тривалістю 10 календарних днів;
- надбавка до заробітної плати до 24 %;
- безоплатне забезпечення молоком у кількості 0,5 літра за зміну як засобу профілактики впливу шкідливих виробничих факторів.

4.2 Електробезпека та заходи пожежної безпеки

Основу електротехнічного комплексу цеху становлять електричні машини мостових кранів, головного прокатного стану та агрегатів оброблення штаби, а також пульти керування технологічним обладнанням. Усі ці елементи утворюють єдину систему електропостачання та керування, що забезпечує безперервність технологічного процесу. Відповідно до вимог «Правил безпечної експлуатації електроустановок» (НПАОП 4.01–1.21–98), прокатний цех

класифікується як приміщення з підвищеною небезпекою, що зумовлено наявністю металевих конструкцій, підвищеної вологості та можливістю дотику до струмопровідних частин.

У виробничих приміщеннях використовується трифазна електромережа з ізольованою проводкою, що забезпечує стабільність роботи електродвигунів і систем керування. Для запобігання ураженню електричним струмом передбачено комплекс заходів захисту:

- ізоляція струмопровідних частин,
- дистанційне керування механізмами,
- застосування електродвигунів у захищеному виконанні, що унеможливлює контакт персоналу з відкритими струмоведучими елементами.
- Електропроводка прокладена в заземлених металевих трубах, з’єднаних із загальним контуром заземлення цеху. Опір заземлювального пристрою становить 4,0 Ом, що відповідає встановленим нормативним вимогам і гарантує надійне спрацювання захисних пристроїв у разі виникнення короткого замикання чи пробою ізоляції.

Таким чином, конструктивне виконання електроустановок і систем заземлення забезпечує високий рівень електробезпеки персоналу, а також надійність експлуатації всього електротехнічного обладнання прокатного виробництва. Усі роботи пов'язані з ремонтом устаткування веде служба електриків [77].

Забезпечення пожежної безпеки у листоправильному виробництві здійснюється відповідно до вимог [78-80], а також галузевих інструкцій з пожежної безпеки на металургійних підприємствах.

Основними потенційними джерелами займання у листоправильному виробництві є:

- нагріті листи металу, що надходять після печей або прокатних клітей (температура поверхні може перевищувати 400–500 °C);

- іскроутворення під час механічної правки, ударів металу об ролики або упори;
- короткі замикання та перегрів елементів електроприводів правильних машин і транспортерів;
- витікання мастильно-охолоджувальної рідини (емульсії), що може горіти при контакті з нагрітими деталями;
- використання газозварювального чи різального обладнання під час ремонту.

До горючих матеріалів, які можуть сприяти розвитку пожежі, належать:

- МОР на основі мінеральних масел;
- гідравлічні рідини, мастила, промивальні склади;
- дерев'яні підкладки, піддони, ізоляційні матеріали;
- кабельна ізоляція, гумові ущільнювачі, пластмасові корпуси апаратури.

Відповідно до ДСТУ EN 60079-10-1:2019, у приміщеннях листоправильного виробництва можуть формуватися:

- зона 2 – ділянки з нечастим або короткочасним виділенням парів горючих рідин (біля насосів і баків МОР);
- зона П-IIа – приміщення, де наявні негорючі пилоподібні речовини або тверді горючі матеріали.

4.3 Визначення ймовірності аварій та рекомендації щодо їхньої ліквідації

Виробничі агрегати (механізми) доцільно розглядати як складну технічну систему, утворену сукупністю взаємопов'язаних елементів і деталей, кожен із яких виконує визначену функцію. Відмова одного або кількох елементів може призвести до порушення працездатності системи в цілому, що, у свою чергу, стає причиною аварії або позаштатної ситуації.

Аварійні події можуть бути зумовлені не лише технічними несправностями чи людським фактором, а й зовнішніми незалежними

причинами, які не залежать від персоналу або адміністрації цеху. До таких причин належать: відключення електроенергії, перебої у водопостачанні, порушення стабільності тиску в гідравлічних і пневматичних системах, а також інші фактори, що впливають на нормальний перебіг технологічного процесу.

Розвиток аварійної події в умовах прокатного виробництва може призвести до низки негативних наслідків, серед яких:

- порушення або зрив виконання виробничого завдання;
- зростання обсягів браку та відсортованої продукції;
- підвищення ризику виробничого травматизму серед персоналу;
- вихід з ладу суміжного або допоміжного обладнання, що ускладнює подальшу роботу лінії.

З метою зниження ймовірності виникнення аварій доцільно реалізувати комплекс організаційно-технічних заходів, серед яких:

суворе дотримання технологічних регламентів і послідовності виробничих операцій;

- регулярне технічне обслуговування та профілактичні огляди обладнання для своєчасного виявлення дефектів;
- підвищення рівня професійної підготовки персоналу, удосконалення навичок реагування на позаштатні ситуації;
- неухильне дотримання правил техніки безпеки й експлуатаційних інструкцій.

Крім того, рекомендується періодично проводити навчальні тренування (інструктажі), спрямовані на відпрацювання дій персоналу в разі виникнення аварії та локалізацію її наслідків. Такі заходи підвищують готовність працівників до оперативного реагування й мінімізують потенційні збитки.

Для оцінювання надійності роботи приводної лінії прокатного стану доцільно розглядати її як послідовно з’єднану систему, у якій відмова одного з елементів призводить до зупинки всього агрегату. До складу приводу входять такі основні вузли:

- електродвигун;

- редуктор;
- муфта;
- шпиндель.

Кожен з елементів характеризується власною інтенсивністю відмов (λ), що виражається кількістю відмов на рік. Для проведення розрахунку прийнято такі усереднені значення показників надійності (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Інтенсивність відмов основних елементів привідної лінії

Елемент приводу	Інтенсивність відмов λ, 1/рік
Електродвигун	0,020
Редуктор	0,015
Муфта	0,010
Шпиндель	0,025

Для системи з послідовним з'єднанням елементів ймовірність відмови (аварії) протягом заданого часу t визначається залежністю:

$$P_{ав}=1-\exp\left(-\sum_{i=1}^{n}\lambda_i t\right), \quad (1)$$

де $P_{ав}$ – імовірність виникнення аварії протягом часу t;

λ_i – інтенсивність відмов окремого елемента системи;

t – період експлуатації, років;

n – кількість елементів системи.

Сумарна інтенсивність відмов становить:

$$\Sigma\lambda_i=0,02+0,015+0,01+,025=0,07 \text{ 1/рік} \quad (2)$$

Підставимо отримане значення у формулу (1) для періоду t=1 рік:

$$P_{\text{ав}} = 1 - e^{-0,070} = 1 - 0,9324 = 0,0676. \quad (3)$$

Отже, ймовірність виникнення аварії приводної лінії протягом одного року експлуатації становить приблизно 6,8 %. Це означає, що з імовірністю 0,068 хоча б один із вузлів приводу може відмовити протягом року роботи.

Середній час безвідмовної роботи (MTBF) системи визначається як обернена величина сумарної інтенсивності відмов:

$$T_{ср} = \frac{1}{\sum \lambda_i} = \frac{1}{0,070} \approx 14,3 \text{ років}. \quad (4)$$

Отримане значення характеризує орієнтовний середній період експлуатації системи до настання першої відмови за умови нормальної роботи без зовнішніх збурень. Приводна лінія прокатного стану має ймовірність відмови близько 6,8 % на рік, що є допустимим для важкого прокатного обладнання, але вимагає постійного контролю стану елементів. Найбільш уразливими вузлами є шпиндель та електродвигун, які мають найвищу інтенсивність відмов.

Підвищити надійність системи можна за рахунок:

- упровадження профілактичних оглядів і моніторингу технічного стану (вібраційний, температурний контроль);
- використання вузлів із підвищеною зносостійкістю;
- застосування резервування критичних елементів або дублювання механізмів.

Таким чином, проведений аналіз дозволив кількісно оцінити рівень надійності привідної лінії та визначити напрями вдосконалення конструкції і системи технічного обслуговування з метою зниження імовірності аварійних ситуацій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Ознайомлення з технологією й устаткуванням прокатної лінії показало, що «вузькими» місцями лінії є роботоздатність робочих та опорних валків.
2. На підставі огляду та аналізу технічної та патентної літератури встановлено, що у світовій виробничій практиці використовуються різні конструкції робочих валків, серед яких перевага належить складеним конструкціям, у яких вісь призначено для багаторазового використання, а з відпрацюванням ресурсу виконується тільки зовнішньої оболонки – бандажу, який безпосередньо контактує з оброблюваним металом.
3. При впровадженні запропонованих конструктивних змін, а саме використання бандажованних валків, можливе збільшення продуктивності, терміну служби, а також зменшення часу на перевалку валків.
4. Розрахунки на міцність найбільш навантажених вузлів приводу реверсивного прокатного стану 1680 вказують на високу працездатність та надійність машини.
5. За результатами теоретичного дослідження встановлено, що основний вплив на знос і довговічність валків має рівномірність розподілу температури по поверхні. Оптимізація системи охолодження валка забезпечить зниження термічної нерівномірності до 20 %, а інноваційні методи (керування охолодженням на основі машинного навчання) дозволяють витримувати стабільність прокату та прогнозувати стан валків.
6. За результатами виконання дослідницької частини підтверджено переваги бандажованих валків над цільнокованними та встановлено, що однією із оптимальних конструкцій бандажованих валків, завдяки своєї зменшеної матеріалоємності, являється конструкція із фіксацією бандажу конічними втулками, розробки співробітників кафедри металургійного обладнання.
7. Результати роботи можуть бути використані в прокатному виробництві вітчизняних та зарубіжних підприємств чорної та кольорової металургії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. United Engineering and Foundry Company. Rolling Mill Machinery. Franklin Classics Trade Press, 2018. 214 p.
2. Ніколаєв В. О. Обтискне та сортове виробництво прокату: навч. посібник. Запоріжжя: ЗДІА. 2015. 128 с.
3. Ніколаєв, В. О., Бондаренко Ю. В. Сучасний стан прокатного виробництва : навч. посіб. Ч. 1 Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 196 с.
4. Timofeyev D. I. Experience on commissioning the 2800 plate mill. *Metallurgist*. 1957. Vol. 1, no. 1. P. 39–42. URL: https://doi.org/10.1007/bf01137517
5. Лекція "Робочі кліті прокатних станів". *Освітній проект «На Урок» для вчителів*. URL: https://naurok.com.ua/lekciya-robochi-kliti-prokatnih-staniv-132944.html (дата звернення: 25.10.2025).
6. 2.8. Класифікація прокатних станів по числу й розташуванню валків. *StudFiles*. URL: https://studfile.net/preview/10500480/page:15/ (дата звернення: 25.10.2025)
7. Прищип М. Г. Обладнання прокатних цехів : навч. посіб для студентів ЗДІА металург. спец. ден. та заоч. форм навчання / ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 115 с.
8. United Engineering and Foundry Company. Rolling Mill Machinery. Franklin Classics Trade Press, 2018. 214 p.
9. Іванченко Ф. К., Гребеник В. М., Ширяєв В. І. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів. К: Вища шк., 1994. 455 с.
10. Metodichka_Praktika_oznakomitelnaya - Стр 6. StudFiles. URL: https://studfile.net/preview/5057053/page:6 (дата звернення: 26.10.2025)
11. Баглай А.В. Стаціонарні системи моніторингу технічного стану промислового обладнання металургійного виробництва. *Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики: зб. матеріалів доп. учасн. XXII Міжнар. конф.* Київ: Міжнародна

Асоціація «Зварювання», 2018. С. 30.

12. Баглай А.В. Зв'язок вібраційних процесів в устаткуванні з технологією гарячої прокатки. *Машини та технології обробки металів тиском*: зб. Матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-техніч. конф. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 37–40.
13. Гречаний О. М. Обґрунтування вибору технічних параметрів гільйотинних ножиць прокатного стану. *Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* 2017. Т. 38, № 2. С. 126–130.
14. Ashton G. W. Modern cold rolling mill. *Institution of Production Engineers Journal*. 1955. Vol. 34, no. 2. P. 111. URL: https://doi.org/10.1049/ipej.1955.0014
15. Influence of asymmetric structure parameters on rolling mill stability / Y. Zang et al. Journal of Vibroengineering. 2017. Vol. 19, no. 7. P. 4840–4853. URL: https://doi.org/10.21595/jve.2017.18263
16. Використання частотних моделей в технічній діагностиці несправностей металургійного обладнання / О. Гречаний та ін. *Металургія*. 2019. № 1. С. 95–100
17. Oginskyy, Y.K., The force pattern in the deformation zone at steady rolling process, *Metall. Min. Ind*., 2011, vol. 3, no. 1, pp. 10–14.
18. Verenev V. V. Development of methods for diagnosing the technical condition of rolling mill equipment in transient operating modes. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2024. No. 38. P. 362–369. URL: https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-362-369
19. Баглай А.В., Вереньов В.В. Динаміка та діагностика зазорів в клітях з багатонитковою прокаткою. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2020. № 3. С 58–60.
20. Ray S. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge: Woodhead Publishing / Elsevier, 2016. 412 p.

21. Wusatowski Z. Fundamentals of Rolling. Oxford: Pergamon / Elsevier, 1969. 679 p. URL: https://books.google.com/books/about/Fundamentals_of_Rolling.html?id=6fNGAAAAYAAJ.
22. Данченко В. М., Гринкевич В. О., Головко О. М. та ін. *Теорія процесів обробки металів тиском*. Дніпропетровськ: Пороги, 2008. 469 с.
23. Hosford W.F., Caddell R.M. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 560 p. URL: https://doi.org/10.1017/CBO9780511976940
24. Khan H.A., et al. Roll Bonding Processes: State-of-the-Art and Future Trends // Metals. 2021. 11(9):1344. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/11/9/1344
25. Servín-Castañeda R., et al. Influence of work hardening on the surface of backup rolls // Materials. 2022. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/10/3524
26. Wang Xiaodong, Li Fei, Li Benhai, Dong Lijie, Zhang Baohui. Design and Application of an Optimum Backup Roll Contour Configured with CVC Work Roll in Hot Strip Mill // ISIJ International. 2012. 52(9):1637–1643. DOI: https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1637
27. ISPatGuru Rolling mill rolls and roll shop. URL: https://www.ispatguru.com/rolling-mill-rolls-and-roll-shop/
28. Максименко О. П., Штода М. М., Нікулін О. В. Основи калібрування прокатних валків. Донецьк: ДонНТУ, 2010. 156 с.
29. LMM Rolls Classification of rolling mill rolls and selection of materials. 2023. URL: https://lmmrolls.com/classification-of-rolling-mill-rolls-and-selection-of-materials/
30. Полішко Г.О. Наплавлення заготовок робочих і опорних валків. URL: https://paton.org.ua/disertacii/dis_polishko.pdf
31. Servín R., Arreola S.A., Calderón I., Pérez A., San Miguel S.M. Effect of Crown Shape of Rolls on the Distribution of Stress and Elastic Deformation

for Rolling Processes // Metals. 2019. 9(11):1222. DOI: https://doi.org/10.3390/met9111222

32. Wang Xiaodong, Li Fei, Li Benhai, Dong Lijie, Zhang Baohui. Design and Application of an Optimum Backup Roll Contour Configured with CVC Work Roll in Hot Strip Mill // ISIJ International. 2012. 52(9):1637–1643. DOI: https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1637
33. Karandaev A.S., et al. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Cluster Mills (CVC principle) // Procedia Engineering. 2017. URL: https://surl.li/ohslcq
34. CVC® (Continuously Variable Crown) / Bending & Shifting Block - Brant Hydraulics Corporation-Top Hydraulics Products Manufacturer. *Brant Hydraulics*. URL: https://www.brant-hydraulics.com/en/products/roll-bending-block (date of access: 30.10.2025)
35. Xu G., et al. Analysis of CVC roll contour and determination of roll crown // Iron & Steel Research / International Journal of Metalforming. 2007. URL: https://ijmmm.ustb.edu.cn/cn/article/pdf/preview/10.1016/S1005-8850%2807%2960075-9.pdf.
36. Gong D., et al. Optimization of continuous variable crown work roll shifting strategy using data-driven methods // Engineering Fracture Mechanics. 2022. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eng2.12464.
37. Li Z., et al. Development and Application of Asynchronous Roll Shifting. URL: https://surl.li/djqxdm
38. Li Zhaoyang, Zhou Guanyu, Yao Chihuan, Wang Shuhuan, Qi Zhi, Guo Lantian, Zhao Dingguo, He Anrui. Development and Application of Asynchronous Roll Shifting Strategy of Double Attenuation Work Roll in Hot Rolling // Metals. 2022. 12(8):1265. DOI: https://doi.org/10.3390/met12081265.
39. Ziakhor I.V., et al. Manufacturing technologies of Cu–Al bimetallic composites. URL: https://surl.li/adreez
40. Cao Yulong, Dong Yanwu, Jiang Zhouhua, Li Guangqiang, Zhao

Zhengrong. Characteristics of High Speed Steel/ductile Cast Iron Composite Roll Manufactured by Electroslag Remelting Cladding // ISIJ International. 2021. 61(7):2127–2134. DOI: https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-594

41. Wypart J., Rydz D., Stradomski G., Dyja H. Analysis of bimetallic plate rolling after explosive welding // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59, Issue 4. URL: https://www.imim.pl/files/archiwum/Vol4_2014/51.pdf
42. Доброносов Ю.К. Розрахунок і конструювання прокатних станів : методичні матеріали. Донецк, 2019. 78 с. URL: https://www.dgma.donetsk.ua/metod/amm/rozrahunok_ps.pdf.
43. Приходько І., Бобирь С., Воробей С. Прогнозування живучості прокатних валків // Метал та лиття України. 2022. Т. 30, №2. URL: https://surl.li/wihoyo
44. CVC® (Continuously Variable Crown) / WR Shift Hydraulic Cylinder - Brant Hydraulics Corporation-Top Hydraulics Products Manufacturer. *Brant Hydraulics*. URL: https://www.brant-hydraulics.com/en/products/CVC-WR-shift (date of access: 02.11.2025)
45. ISPatGuru Rolling mill rolls and roll shop. URL: https://www.ispatguru.com/rolling-mill-rolls-and-roll-shop/
46. Belodedenko S., Grechany A., Yatsuba A. Prediction of operability of the plate rolling rolls based on the mixed fracture mechanism. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, no. 7 (91). P. 4–11. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122818
47. Goryany V. Rings for compound rolls of rolling mills. *Zastita Materijala*. 2025. Vol. 66, no. 1. P. 75–89. URL: https://doi.org/10.62638/zasmat1199
48. Thermal-fatigue resistant work rolls for hot rolling mills / V. Goryany et al. *Materials Testing*. 2019. Vol. 61, no. 5. P. 397–404. URL: https://doi.org/10.3139/120.111333
49. Складений прокатний валок: А.С. 32959. UA. МПК B21B 27/00 / І. О.

Бобух, О. І. Бобух, О. І. Волошин, К. О. Грігор'єв, В. С. Буртасенков – № u200800437; Заявл. 14.01.2008; Опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11– 12 с.

50. Огінський Й. К., Таратута К. В., Востоцький С. М., Гречаний О. М. Прокатний валок. Патент на винахід №123556. Київ: Укрпатент, 2021. 4 с.
51. Огінський Й., Таратута К. В., Востоцький С., Гречаний О. М., Воронцова Н. Прокатний валок : пат. 126626 Україна : B21 B27/03. № a201904296 ; заявл. 22.04.2019 ; опубл. 04.01.2023, Бюл. № 1/2023. Київ: ДП «Український інститут інтелектуальної власності», 2023. 4 с.
52. Wang D.-C., Liu H.-M., Liu J. Research and Development Trend of Shape Control for Cold Rolling Strip. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 30, no. 5. P. 1248–1261. URL: https://doi.org/10.1007/s10033-017-0163-8
53. Hydrodynamic Bearings. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Berlin, Heidelberg, 2014. P. 951. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_200217 (date of access: 03.11.2025).
54. Прокатка листів та штаб: навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА / Б. П. Середа, М. Г. Прищип, І. В. Кругляк, Т. О. Васильченко ; ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 182 с.
55. Максименко О. П., Лясота С. М., Романюк Р. Я. Теорія процесів прокатного, трубного, ковальсько-штампувального та волочильного виробництв. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2009. 208 с.
56. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни „Конструкції технологічних агрегаті в процесах ОМТ”. Частина 1. Розрахунки деталей та вузлів прокатного обладнання, для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності 136 – Металургія, за освітньопрофесійною програмою «Металургія» усіх форм навчання / Укладач В.М. Самохвал – Кам’янське: ДДТУ, 2023. 43с.

57. Roll cooling and its relationship to roll life / A. A. Tseng et al. *Metallurgical Transactions A*. 1989. Vol. 20, no. 11. P. 2305–2320. URL: https://doi.org/10.1007/bf02666666

58. Tseng A. A., Gunderia A. S., Sun P.-F. Cooling of roll and strip in steel rolling. *Steel Research*. 1991. Vol. 62, no. 5. P. 207–215. URL: https://doi.org/10.1002/srin.199101276

59. Hussain I. Y. Numerical Simulation of Heat Transfer Problem in Hot and Cold Rolling Process. *Journal of Engineering*. 2006. Vol. 12, no. 03. P. 1738–1760. URL: https://doi.org/10.31026/j.eng.2006.03.10

60. Innovative Cooling Solution Cuts Energy Costs: Power Work Roll Cooling / L. Pichler et al. *AISTech 2025*, 5–8 May 2025. 2025. P. 1405–1410. URL: https://doi.org/10.33313/389/151

61. Goyal D. R., Joshi A., Gurnani U. Review on Cold Rolling Mill Roll Deformation. *MATTER: International Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 1, no. 1. P. 83–95. URL: https://doi.org/10.20319/mijst.2015.11.8395

62. Trishevsky O. I., Saltavets M. V., Kondrashchenko V. O. Обґрунтування та вибір схем охолодження валків листопрокатних станів на основі математичного моделювання процесів теплообміну валків з полосою. *Обробка матеріалів тиском*. 2020. № 1(50). С. 307–314. URL: https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)307

63. Sun J., Du F., Li X. FEM Simulation of the Roll Deformation of Six-high CVC Mill in Cold Strip Rolling. *2008 International Workshop on Modelling, Simulation and Optimization*, Hong Kong, 27–28 December 2008. 2008. URL: https://doi.org/10.1109/wmso.2008.42

64. A novel strategy based on machine learning of selective cooling control of work roll for improvement of cold rolled strip flatness / P. Wang et al. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. URL: https://doi.org/10.1007/s10845-023-02204-2

65. Optimization on the cooling nozzles arrangement of hot rolling work roll / B. Chen et al. *Proceedings of the 2018 3rd Joint International Information*

Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference (JIMEC 2018), Chongqing, China, 15–16 December 2018. Paris, France, 2018. URL: https://doi.org/10.2991/jimec-18.2018.38

66. Temsiri S., Anocha B. Effective Work Roll Cooling toward Stand Reduction in Hot Strip Process. International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Sciences. 2016. Vol. 7.0, no. 7. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.1338955
67. Work roll cooling system design optimisation in presence of uncertainty and constrains / Y. T. Azene et al. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2010. Vol. 2, no. 4. P. 290–298. URL: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.06.001
68. Herman J. C. Impact of new rolling and cooling technologies on thermomechanically processed steels. *Ironmaking & Steelmaking*. 2001. Vol. 28, no. 2. P. 159–163. URL: https://doi.org/10.1179/030192301677894
69. Liu Y. Optimization on composition and properties of bainite-nodular iron composite rollers. *Chinese journal of mechanical engineering*. 2006. Vol. 42, no. 05. P. 214. URL: https://doi.org/10.3901/jme.2006.05.214
70. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. На заміну ДСТУ 2293-99 ; чинний від 2015-05-01. Вид. офіц. 2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=61781
71. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). На заміну ДСТУ OHSAS 18001:2010; чинний від 01.01.2021. Вид. офіц. 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004
72. ДСП 3.3.1.038–99. Підприємства чорної металургії. Чинний від 1999–12–01. Вид. офіц.

73. НПАОП 27.0-1.01-08 Правила охорони праці в металургійній промисловості.
74. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень
75. ДСТУ 2894–94. Пристрої екранувальні для захисту від інфрачервоного випромінювання. Параметри та загальні технічні вимоги. Чинний від 1996–01–01. Вид. офіц. 1994.
76. ДСН 3.3.6.037–99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Чинний від 1999–12–01. Вид. офіц.
77. Правила улаштування електроустановок. URL: https://mev.gov.ua/storinka/pravyla–ulashtuvannya–elektroustanovok (дата звернення: 03.10.2024).
78. ДБН В.1.1–7:2016.Пожежна безпека об'єктів будівництва Загальні вимоги [Електронний ресурс] // Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України. 2016. Режим доступу до ресурсу: http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/32.1.%20ДБН%20В.1.1–7~2016.%20Пожежна%20безпека%20об’єктів%20будівни.pdf.
79. СОУ 40.1–21677681–60:2012. Протипожежний захист машзалів електростанцій. Правила проектування та експлуатації протипожежного устаткування. На заміну НАПБ 05.030–2001 (ГКД 343.001.003.001–2001) ; чинний від 2012–03–29. Вид. офіц.
80. НАПБ А.01.001–2014. Правила пожежної безпеки в Україні. На заміну НАПБ А.01.001–2004 Правила пожежної безпеки в Україні ; чинний від 2023–04–07. Вид. офіц. 2014.
81. Румянцев В. Р. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та техногенна безпека» у дипломних роботах (проектах) для студентів ЗДІА спеціальностей МЧМ, МБ та інші / В. Р. Румянцев, І. О. Ткаліч. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 16 с.

ДОДАТКИ