ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра загальнотехнічних дисциплін

Пояснювальна записка

до *дипломної роботи* на здобуття ступеня вищої освіти

«___*магістр*___»

бакалавр, магістр

на тему: «Підвищення ефективності технології виробництва листового гарячекатаного прокату»

Виконав: здобувач вищої освіти за освітньо-професійною програмою
_Технології і засоби механізації__
сільськогосподарського виробництва__
назва ОПП
спеціальності __208___Агроінженерія_
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти «магістр»_групи __
_____Безміліцин І.О._____
Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти
Керівник: _____Брикун О,М._____
Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: _____
Прізвище та ініціали рецензента

Полтава – 2021 року

ВСТУП

Сучасні економічні умови диктують необхідність проведення досліджень, спрямованих на зниження споживаних ресурсів при виробництві ЛГП, зокрема зниження енергетичних витрат і підвищення експлуатаційної стійкості робочих валків. Для цього металургійним підприємствам необхідно освоювати та впроваджувати нові технології, що завжди пов'язане з необхідністю модернізації чи заміни діючого обладнання.

На металургійних підприємствах один із напрямів зниження рівня споживаних ресурсів при виробництві ЛГП із заданими властивостями можливий за рахунок удосконалення обладнання, розробки та впровадження нових технологічних режимів змащування та охолодження валків та смуги.

Для зниження рівня споживаних ресурсів при виробництві ЛГП необхідно реалізувати технічні рішення щодо вдосконалення обладнання, розробити та впровадити технологію ефективного впливу на процеси змащування та охолодження валків та смуги. Під терміном «ефективний вплив» розуміються такі технологічні режими: обсяги мастильного матеріалу (СМ), що подається на поверхню валків, і охолоджувача для кожної з прокатних клітей залежно від температурно-швидкісних режимів прокатки, що призводить до зниження енергосилових і фрикційних параметрів.

Технологічні режими можна розрахувати за результатами математичного моделювання. Розроблені підходи та алгоритми дозволять проводити налаштування (адаптацію) режимів змащування та охолодження залежно від параметрів прокатки в рамках монтажних партій, а також реалізувати нові технічні рішення щодо вдосконалення обладнання.

В даний час питання змащування та охолодження валків при виробництві ЛГП вивчені недостатньо глибоко. Для практичної реалізації досліджуваних процесів існує необхідність у теоретичному та експериментальному обґрунтуванні нових рішень, спрямованих на вдосконалення технології та обладнання для змащування та охолодження валків листових станів гарячої прокатки.

Метою дослідження є пошук ефективних підходів та застосування

технології ефективного охолодження шляхом визначення раціонального геометричного положення колекторів охолодження для системи «робочий валок – смуга» для досягнення максимального тепло знімання з поверхні робочих валків.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

Створення аналітичних залежностей, що описують вплив мастильного матеріалу на зниження енергосилових та фрикційних параметрів процесу прокатки, а також підвищення експлуатаційної стійкості при виробництві ЛГП з використанням методів фізичного та математичного моделювання в системі «опорний валок – робочий валок – смуга» для чотиривалкових кліток листів .

Розробка математичної моделі процесу примусового охолодження системи «робочий валок – смуга» з урахуванням закономірностей формування температурних умов процесу листової гарячої прокатки.

Об'єктом дослідження є безперервні чернові та чистові групи клітей листових станів гарячої прокатки.

Предмет дослідження. Режими змащування та охолодження робочих валків та смуги листових станів гарячої прокатки.

Методи досліджень та достовірність результатів роботи. Робота представляє комплексне дослідження, засноване на використанні сучасних методів у галузі машин та технологій обробки тиском. Наукові дослідження базуються на фундаментальних законах збереження маси, енергії, рівняннях теплопровідності, рівняннях математичної фізики, методах кореляційного та регресійного аналізу. Адекватність отриманих експериментальних даних оцінювалася за допомогою сучасної атестованої апаратури.

Теоретична те практична значущість. Створено, науково та технічно обґрунтовано методологію налаштування та управління системою охолодження робочих валків та смуги, що відрізняється від відомих застосуванням послідовно реалізованих та взаємопов'язаних комплексних математичних моделей, що описують зміну теплового стану валків та смуги, що дозволяє визначати витрату та тиск охолоджувача, розташування колекторів та форсунок для досягнення максимального теплознімання з охолоджуваних поверхонь.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМК ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Сучасні тенденції розвитку технології та обладнання виробництва листового гарячекатаного прокату

Україні протягом багатьох десятиліть вдавалося утримуватись у списку лідерів цієї галузі завдяки наявності власної сировинної бази. Однак у перше десятиліття XXI століття ситуація почала змінюватися: значно зміцнили свої позиції країни-експортери металопродукції, такі як Китай, Індія та ін., за рахунок запуску більш високоефективного та високотехнологічного виробництва.

Широкосмуговий листовий гарячекатаний прокат (ЛГП) є одним із основних видів продукції чорної металургії. ЛГП випускається обсягом десятків мільйонів тонн щорічно. Решта продукції у вигляді гарячекатаних смуг та рулонів призначається для випуску зварних труб великого діаметру, виробів автомобілебудування, суднобудування та інших виробництв.

Аналіз світового рівня розвитку науки і техніки в галузі виробництва листового гарячекатаного прокату показує, що вимоги до механічних та геометричних характеристик гарячекатаного листа постійно змінюються.

За останні 10 років в Україні і за кордоном відзначається істотна зміна сортаменту продукції, що прокатується на станах гарячої прокатки. Суттєво (на 15-20%) збільшилась частка прокату з високоміцних марок сталей. До високоміцних марок сталі існують досить жорсткі вимоги щодо механічних властивостей: прокат повинен мати високу міцність (тимчасовий опір розриву), мати високий опір до крихкого і в'язкого руйнування, мати необхідне значення в'язкості при температурах будівництва та експлуатації, мати хорошу пластичність і зварюваність [5]. Для досягнення зазначених властивостей розробляються та впроваджуються нові технології та режими прокатки, для яких необхідно забезпечувати експлуатаційні режими роботи основного та допоміжного обладнання прокатних станів.

Металургійним підприємствам для отримання прокату з новими вимогами часто необхідно займатися освоєнням нової технології прокатки, що в свою чергу, спричиняє повну або часткову модернізацію діючого обладнання.

Так, наприклад, на металургійних підприємствах України (ПрАТ «ММК», ПАТ «НЛМК»,) за останні десять років спостерігається кілька тенденцій у цьому напрямі:

– освоєння прокату з конструкційних марок сталей із вмістом вуглецю до 0,2 % та легованих ніобієм, ванадієм, титаном та іншими елементами. При цьому дані марки сталі для отримання необхідних механічних властивостей виробляються за технологією контрольованої прокатки, включає прискорене охолодження з отриманням смуги товщиною від 6 мм до 20 мм;

– освоєння технології прокатки на безперервних широкосмугових пристроях гарячої прокатки тонких (меншою, ніж передбачено початковими проектами) гарячекатаних смуг, товщиною менше 1,5 мм. Особливістю даної технології є значне обтискання, що призводить до збільшення швидкості прокатки та збільшення машинного часу роботи.

Одночасне вирішення двох практично взаємовиключних завдань на сучасних станках призводить до низки проблем: обладнання працює із завищеними технологічними параметрами, збільшено машинний час роботи, що у свою чергу призводить до передчасного зношування основного та допоміжного обладнання та виходу його з ладу. Спостерігається недотримання теплового режиму роботи основного та допоміжного обладнання, що призводить до локального перегріву робочих валків, і, у свою чергу, позначається як готовий листовий гарячекатаний прокат.

З метою зниження виробничих витрат робочі пристрої забезпечуються сучасними виконавчими механізмами та технологічними системами подачі мастильного матеріалу, системами проти згинання та осьового зсуву робочих валків. У зв'язку зі зростаючими темпами прокатки для стабілізації теплового профілю робочих валів, прокатні стани оснащуються сучасними системами охолодження робочих валків. Залежно від поставлених завдань системи охолодження дозволяють регулювати і розподіляти обсяг охолоджувача, що надходить. Встановлюються колектори охолодження секційного типу, що дозволяють розподіляти обсяги води, що подається по довжині бочки валка. Необхідно також відзначити впровадження нових систем, призначених для подачі

охолоджувача на поверхню заготовки, що прокатується безпосередньо перед деформацією.

Таким чином, підприємствам, що випускають гарячекатаний прокат, необхідно розробляти та впроваджувати передові технічні рішення, орієнтовані на енергоефективність процесів виробництва, оскільки цей напрямок виробничої діяльності є основним механізмом досягнення конкурентоспроможності як для окремих підприємств, регіонів та галузей, так і для національної економіки в цілому.

Впровадження нових технологій та модернізація діючого обладнання диктують необхідність розробки нових математичних моделей та підходів, спрямованих на зниження використання ресурсів під час виробництва листового гарячекатаного прокату.

Під зниженням використання ресурсів у роботі мають на увазі таке: розробка та впровадження заходів, спрямованих на зниження енерговитрат при виробництві прокату, а також підвищення експлуатаційної стійкості робочих валків, що полягає у зниженні зносу та зменшенні знімання робочого шару при шліфуванні.

1.2 Технологія та обладнання виробництва листового гарячекатаного прокату.

В даний час основна кількість листового гарячекатаного прокату виробляється на безперервних широкосмугових станах гарячої прокатки.

Невеликі обсяги прокату виробляють на станах Стеккеля, на реверсивних універсальних станах, а також на безперервних станах [7].

Необхідно відзначити сучасну тенденцію останніх десятиліть: впровадження технологій сполученого процесу «лиття – прокатка». Впроваджуються принципово нові технології на нових ливарно-прокатних агрегатах.

До складу обладнання широкосмугових станів гарячої прокатки зазвичай входять: методичні печі для нагріву, прокатні кліті (кількість яких може доходити до 14 шт.), лінія прискореного (ламінарного) охолодження, пристрої для

змотування прокатаного металу в рулони.

Кліті, як правило, ділять на дві групи: чорнову та чистову. Між собою безперервні групи чорнових та чистових клітей з'єднують проміжним рольгангом, який оснащений системою теплового захисту. Окалина з поверхні смуг видаляється гідравлічними системами, струменями високого тиску, які іноді поєднується з роликовим руйнівником окалини. Управління температурою лінії здійснюється системою міжклітинного охолодження.

На рис. 1.1 показано схему розташування обладнання безперервного стану 2000 ПАТ «НЛМК». Особливість даного стану полягає в тому, що у чорновій групі відсутня можливість реверсивної прокатки. Напівбезперервні стани гарячої прокатки (рис. 1.2) відрізняються тим, що чорнова група додатково оснащена однією кліттю, або декількома, в яких здійснюється реверсивна прокатка, що дозволяє істотно зменшити технологічну лінію.

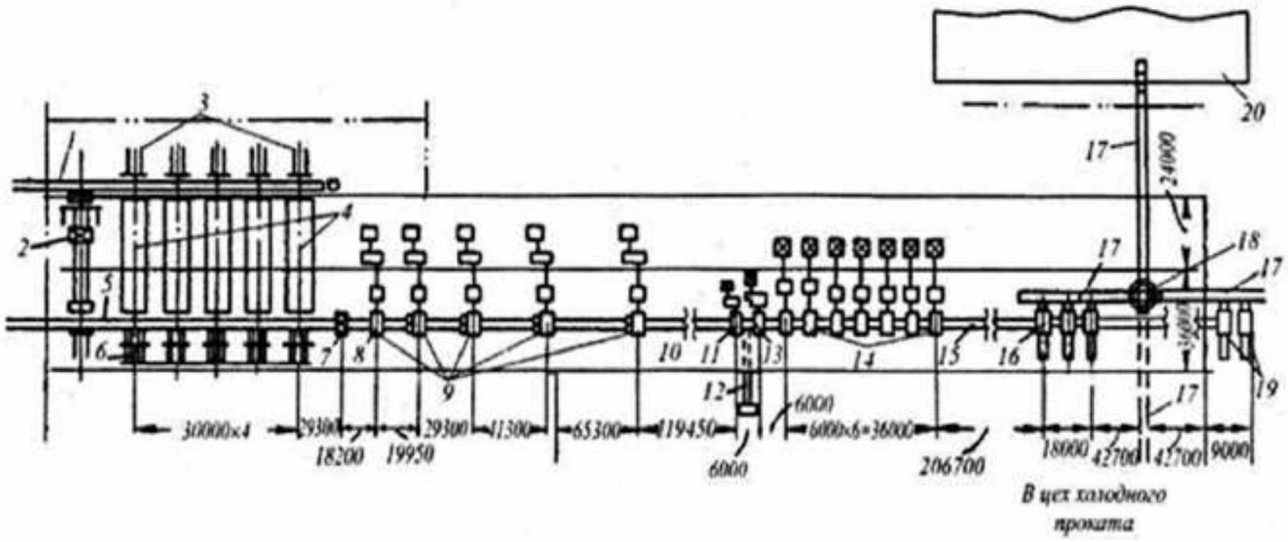


Рис. 1.1 – Схема розташування основного обладнання безперервного листового стану гарячої прокатки: 1 – пічний рольганг; 2 – візок передачі слябів; 3 – штовхачі слябів; 4 – нагрівальні методичні печі; 5 – приймальний рольганг; 6 – приймач нагрітих слябів; 7 – вертикальний руйнувач окалини; 8 – двовалкова кліть; 9 – універсальні чотиривалкові кліті; 10 – проміжний рольганг; 11 – леткі ножиці; 12 – конвеєр для головного та донного обрізу; 13 – чистовий двовалковий руйнувач окалини; 14 - чистові чотиривалкові кліті; 15 – відвідний рольганг; 16 - моталки для змотування тонких смуг; 17 – конвеєри; 18 – підйомно-переворотний стіл; 19 - моталки для змотування товстих смуг; 20 – склад рулонів та відділення

листооздоблення

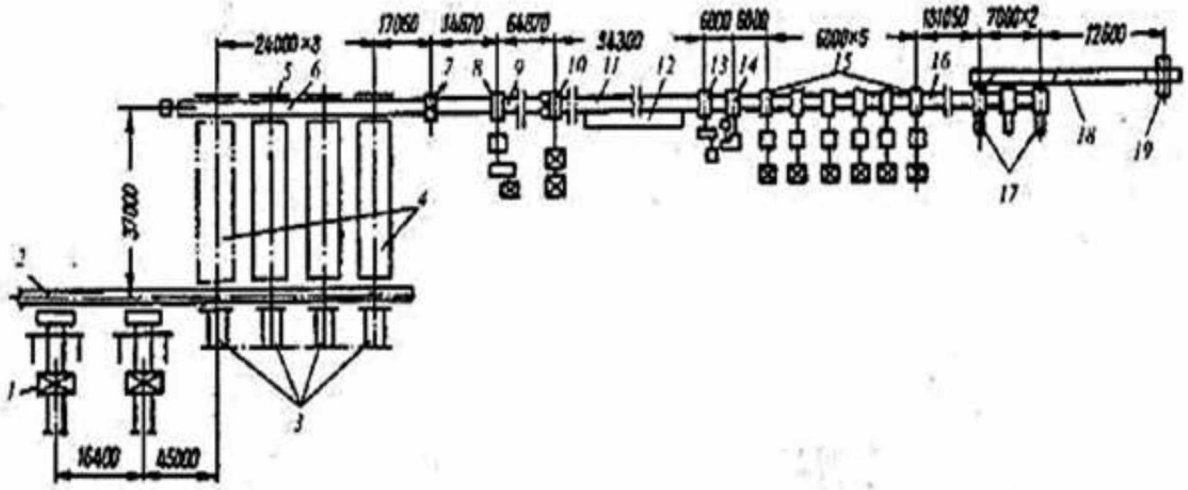


Рис. 1.2 – Схема розташування основного обладнання напівбезперервного листового стану гарячої прокатки: 1 – передавальний візок; 2 – пічний рольганг; 3 – штовхачі слябів; 4 – нагрівальні методичні печі; 5 – буфери (амортизатори); 6 – приймальний рольганг; 7 – кліть із вертикальним валками; 8 – двовалкова кліть із горизонтальними валками; 9 – рольганг чорнової групи клітей; 10 – реверсивна універсальна кліть; 11 - проміжний рольганг; 12 – стелаж для недокатів; 13 – леткі ножиці; 14 - чистовий двовалковий руйнувач окалини; 15 - чистові чотиривалкові кліті; 16 - відвідний рольганг; 17 - моталки; 18 – конвеєр рулонів; 19 – підйомно-переворотний стіл

На рис. 1.3 наведено схему розташування обладнання комбінованого стану гарячої прокатки 2800/1700 ПАТ. Перевага даної схеми розташування обладнання полягає у можливості одночасно виробляти як товстий лист (товщиною до 50 мм), так і тонкі смуги (товщиною до 1,5 мм). Чорнова група переважно складається з кількох (найчастіше двох) реверсивних клітей. Чистова об'єднана в безперервну групу. Кількість клітей у чистовій групі зазвичай варіюється від шести до семи чи восьми.

До складу обладнання 3/4-безперервних станів гарячої прокатки входить: чорнова група клітей, з якої одна або дві реверсивні кліті, дві нереверсивні кліті, що об'єднуються в одну безперервну підгрупу [8]. На рис. 1.4 наведено схему розташування основного обладнання 3/4-безперервного стану 2050 компанії

«Baosteel».

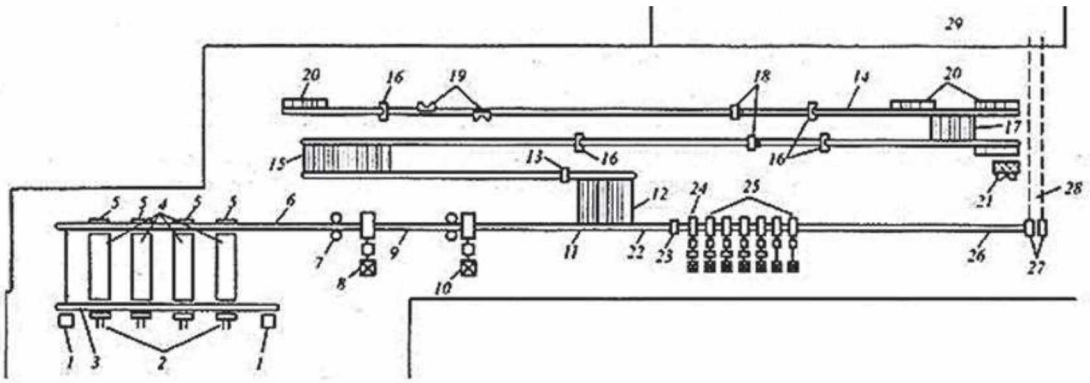


Рис. 1.3 – Схема розташування основного обладнання комбінованого листового стану гарячої прокатки [9]: 1 – завантажувальні пристрої; 2 – штовхачі слябів; 3 – пічний рольганг; 4 – нагрівальні методичні печі; 5 – буфери (амортизатори); 6 – приймальний рольганг; 7 – кліть із вертикальним валками; 8 – чорнова двовалкова кліть; 9 – рольганг чорнової групи клітей; 10 - чотиривалкова універсальна кліть; 11 - відвідний рольганг; 12 - передавальний шлеппер товстих листів; 13 - ролико-правильні машини; 14 – транспортні рольганги; 15 – холодильник; 16 - гільйотинні ножиці поперечного різання; 17 - передавальний шлеппер; 18 – дискові ножиці; 19 - гільйотинні ножиці для обрізання кромок листів; 20 – кишені; 21 - гільйотинні ножиці; 22 - проміжний рольганг; 23 - летучі ножиці; 24 – руйнувач окалини; 25 - чистові чотиривалкові кліті; 26 - відвідний рольганг; 27 - моталки; 28 - підземний конвеєр транспортування рулонів; 29 – склад готової продукції

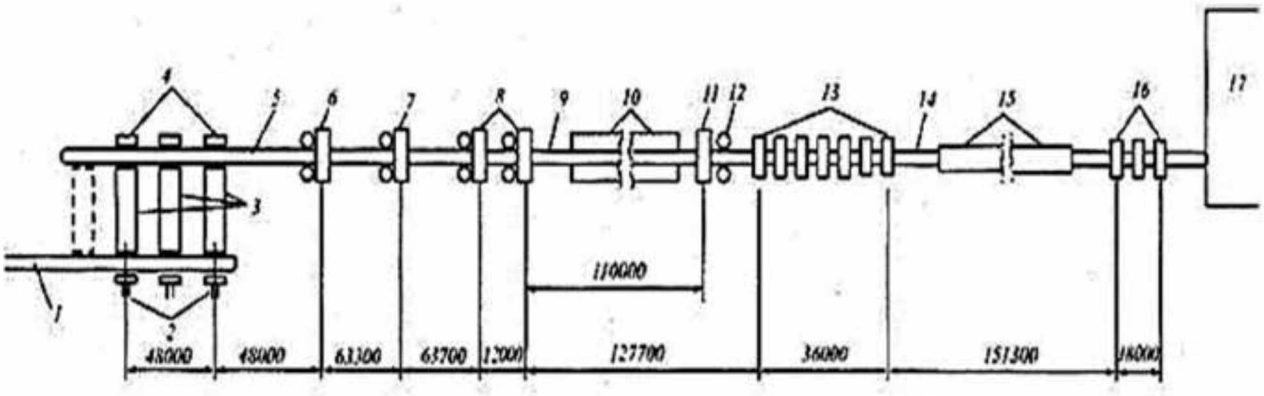


Рис. 1.4 – Схема розташування основного обладнання ¾ - безперервного листового стану гарячої прокатки: 1 – пічний рольганг; 2 – штовхачі слябів; 3 – нагрівальні методичні печі з крокуючими балками; 4 - пристрій для видачі слябів;

5 – приймальний рольганг; 6 – двовалкова універсальна реверсивна кліть; 7 – чотиривалкова універсальна реверсивна кліть; 9 - проміжний рольганг; 10 - тепло ізолюючий підйомний кран; 11 – кривошипні ножиці; 12 - роликова напрямна проводка; 13 - чистова безперервна група чотиривалкових клітей; 14 - відвідний рольганг; 15 – вентиляційна установка; 16 - моталки; 17 – ад'юстаж.

Сучасні листові стани гарячої прокатки переважно оснащені безперервними чорновими та чистовими групами клітей, що дозволяє суттєво збільшити випуск гарячекатаного прокату та забезпечити його високі споживчі властивості.

Обладнання сучасних станів можна зрозуміти за введеними в експлуатацію в останнє десятиліття станами гарячої прокатки відомою компанією SMS group GmbH, Німеччина [10]:

- стан гарячої прокатки у м. Чилегон, о. Ява в компанії PT Krakatau Steel (PTKS) (основні компоненти: піч з крокуючими балками, 4-ступінчаста реверсивна чорнова кліть; 6 чистових клітей з гідравлічним регулюванням зазору, встановлення ламінарного охолодження і т.д.);
- компактний стан гарячої прокатки в Туреччині в компанії Çolakoğlu Metalurji (основні компоненти: 4-ступінчаста реверсивна чорнова кліть; койлбокс без оправки; 7 чистових клітей з гідравлічним регулюванням зазору, встановлення ламінарного охолодження і т.д.);
- стан гарячої прокатки в китайській компанії HBIS Laoting Iron & Steel (основні компоненти: прес для зміни розмірності слябів, дві реверсивні кліті, семи клітна чистова група, встановлення ламінарного охолодження).

Такі листові стани гарячої прокатки мають наступні переваги: висока продуктивність, широкий сортамент прокату по марках сталі і розмірам, висока точність смуг, що прокатуються, відповідність заданим механічним властивостям смуг безпосередньо після прокатки. При цьому є й недоліки, до яких можна віднести:

– робочі кліті не розраховані на прокатку смуг із важко деформуємих сталей (межа міцності $\sigma \geq 500$ МПа), тому при обробці даних марок сталей виконавчі механізми працюють зі значними навантаженнями;

– при прокатці заготовок товщиною менше 1,5 мм, різко збільшується машинний час роботи стану, що призводить до суттєвого перегріву та передчасного зносу робочих валків.

Розвиток та вдосконалення вітчизняних широкосмугових станів гарячої прокатки спрямовано забезпечення запитів економіки України, і, зокрема, забезпечення потреб її високотехнологічних секторів: виробництво корозійностійких трубних, мостових, суднобудівних, надміцних сталей, автомобільних та інших марок сталей.

Впровадження сучасних ресурсо- та енергоефективних технологій дозволить листопрокатному виробництву за відносно малих витрат задовольнити як внутрішній, так і зовнішній попит на металопрокат, а також успішно реалізувати програму імпортозаміщення.

1.3 Аналіз відомих рішень, спрямованих на зниження споживаних ресурсів при виробництві листового гарячекатаного прокату

Зниження споживаних ресурсів у технології листової гарячої прокатки може бути досягнуто впровадженням комплексних науково-технічних рішень. Одним із таких напрямків є технологія подачі рідких мастильних матеріалів на поверхню валків.

Технологія подачі рідких мастильних матеріал досить відома і широко застосовується у різних технологіях прокатного виробництва. Найбільших успіхів дана технологія досягла в листовій холодній прокатці.

Необхідність застосування змащувальних матеріалів у технології гарячої прокатки обґрунтована у роботах авторів [11]: Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.І. Пономарьов, Тубольцев, А.Ф. Килиєвич та ін.

Авторами робіт були сформульовані основні вимоги, що пред'являються до змащувальних матеріалів при гарячій прокатці. Застосовувані мастильні матеріали повинен мати високі адгезійні властивості, що забезпечують їх мінімальний змив з поверхні валків при прокатці і повинні подаватися в такій кількості, при якій не порушуються умови захоплення. На підставі результатів досліджень [12] автори стверджують, що закономірності та механізм мастильної

дії при гарячій прокатці в основному мають такий же характер, як і при холодній.

Однак, незважаючи на успіхи в галузі застосування технології подачі змащувальних матеріалів, листові стани гарячої прокатки, які експлуатуються в Україні, до 2008 року не були оснащені системами змащування валків.

У роботі ставиться науково-практичне завдання, спрямоване на значне підвищення ефективності роботи системи технологічної змазки. Під терміном «енергоефективність» у цій роботі розуміється зміна питомої витрати електроенергії при прокатці одного й того ж обсягу металу на листовому стані гарячої прокатки. Наступним напрямком у зниженні споживаних ресурсів технології листової гарячої прокатки є підвищення експлуатаційної стійкості робочих валків, що полягає у зниженні зносу та зменшенні знімання робочого шару при шліфуванні, яке можна досягти за рахунок керування тепловим станом робочих валків.

Підвищення експлуатаційної стійкості робочих валків є важливою проблемою. Валки це основний прокатний інструмент, який є однією із основних частин прокатного стану. Згідно з літературними даними, при листовій гарячій прокатці витрата валків становить приблизно 0,3...0,5% маси прокату.

Технологією листової гарячої прокатки закладаються жорсткі вимоги до експлуатаційних характеристик прокатних валків.

Експлуатація робочих валків супроводжується такими видами їх зношування: зношування схоплюванням, окисне, теплове, абразивне, а також знос, характерний для тертя кочення, у тому числі втомний. Крім перерахованого вище, на робочих валках, що експлуатуються на листових станах гарячої прокатки, спостерігається термічний знос, а також технічний знос, викликаний корозійною втомою, який може проявлятися у вигляді деформаційного старіння [13].

Найбільший вплив на експлуатаційні характеристики робочих валків у технології листової гарячої прокатки надає його тепловий стан. Температура поверхні робочих валків у чорнових і чистових клітях не має перевищувати 65-70 °С і 80-85°С, відповідно. Підтримку температури робочих валків у встановленому температурному інтервалі можна здійснити кількома шляхами:

– визначенням оптимального теплового режиму валка, наприклад, за рахунок зміни об'єму охолоджувача, що подається, і площі змочування поверхні валка, а також перерозподілом об'єму охолоджувача, що надходить, як між прокатними клітями, так і по довжині бочки валка.

– зміною технологічного процесу прокатки, наприклад зменшенням часу контакту металу, що прокочується, з поверхнею валка (дане рішення не знайшло застосування, оскільки призводить до втрати продуктивності прокатних станів).

У зв'язку з цим особливо актуальними в даний час є питання дослідження та моделювання теплового стану робочих валків з урахуванням процесу охолодження з подальшою оптимізацією температурних режимів експлуатації.

1.4 Аналіз відомих методів математичного опису технологічних процесів під час виробництва гарячекатаного прокату

Наявний теоретичний та практичний досвід є гарною базою для розвитку теорії, розробки та впровадження ефективних процесів, спрямованих на зниження ресурсоємності виробництва листового гарячекатаного прокату.

У відомих роботах, що описують процеси листової гарячої прокатки, при визначенні технологічних параметрів процесу прокатки вплив режимів подачі мастильних матеріалів практично не відображено.

Для моделювання процесу листової гарячої прокатки необхідно знати числові характеристики заготівлі, що прокатується. Для розрахунку коефіцієнта застосування рівнодіючої плеча (ψ), багато авторів використовують формулу Я.Д. Василєва - В.Г. Шувякова, однак даний підхід не дозволяє врахувати вплив змащувальних матеріалів при різних режимах його подачі, що зумовлює необхідність його уточнення та розвитку.

Основне завдання, на яке спрямоване застосування змащувальних матеріалів у технології листової гарячої прокатки – зниження величини контактного тертя та зношування валків при прокатці.

Питанням, пов'язаним із зниженням зношування валків у технології прокатки присвячено достатню кількість робіт наступних авторів: С.Д.

Адамський, А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, А.П. Грудьов, П.І. Грудєв, Є.П. Жильников, В.М. Заверюха, Ю.В. Зільберг, А.Ф. Килиєвич, В.М. Клименко, І.В. Горобець, С.А. Чекмарьов, А.П. Коновалов та інших. [15].

Основна формула для розрахунку коефіцієнта тертя, запропонована А.І.Целіковим, була отримана шляхом апроксимації експериментальної кривої Н.М. Гета, і містить як аргумент лише температуру прокатки *t*:

$$\mu = 0{,}55 - 0{,}00024\ t. \qquad (1.1)$$

Аналіз відомих формул розрахунку контактних сил тертя показує, що вплив технологічних чинників у них враховано з допомогою поправочних коефіцієнтів. Однак використання поправочних коефіцієнтів не дозволяє врахувати вплив змащувальних матеріалів на процес контактного тертя при гарячій прокатці, що потребує додаткових досліджень.

Момент, необхідний для забезпечення необхідної деформації металу ($M_{пр}$), рекомендовано визначати за методикою А.І. Целікова. Автори, які займаються вивченням процесу листової гарячої прокатки із застосуванням змащувальних матеріалів, проводили свої розрахунки за даною методикою. Результати робіт показують високу збіжність, що дозволяє рекомендувати цей підхід щодо подальших досліджень.

Вплив змащувальних матеріалів на зниження енерговитрат процесу листової гарячої прокатки оцінюється зі зміни струмового завантаження двигуна головного приводу ($M_{дв}$). Серед відомих підходів для оцінки енерговитрат найпоширеніша методика О.В. Третьякова, у якій для визначення ($M_{дв}$) необхідно використовувати експериментально отримані значення.

Нині відомо досить багато теоретичних праць, у яких автори описують взаємодію валкових вузлів під час подачі змащувальних матеріалів [16].

Завдання щодо визначення витрати змащувальних матеріалів у валковому вузлі «кварто» найчастіше зводиться до аналітичного визначення товщини шару таких матеріалів на контакті: "робочий валок - опорний валок" або "робочий валок - смуга".

Існує ряд робіт, присвячених визначенню даних параметрів.

Для розрахунку товщини змащувальних матеріалів на контакті «опорний

валок – робочий валок» багато дослідників пропонують використовувати залежність, обґрунтовану в роботах Д.С. Кодніра та В.М. Васіна.

Аналіз літературних даних показує, що практично не досліджено напружено деформований стан у системах "робочий валок - опорний валок" та "робочий валок - смуга" при подачі змащувальних матеріалів.

Застосування вищевказаної методики дозволяє виробляти енергосилові розрахунки процесу листової гарячої прокатки, у тому числі із застосуванням змащувальних матеріалів, а також оцінювати зміни напружено деформованого стану в системі «робочий валок – смуга», використовуючи експериментальні дані, що фіксують зміну технологічного параметра "зусилля прокатки".

Незважаючи на великий обсяг досліджень, в даний час у технології листової прокатки відсутні чіткі рекомендації щодо призначення витрат змащувальних матеріалів залежно від сортаменту продукції, що призводить до неповного використання технологічних можливостей застосовуваних систем подачі мастильних матеріалів.

Аналіз літературних даних показує, що нині відсутній єдиний методологічний підхід, заснований на теоретичних, експериментальних і промислових дослідженнях, і навіть лабораторному моделюванні процесів контактної взаємодії системи «опорний валок – робочий валок –смуга» [17]. Реалізація методологічного підходу дозволить розробити та впровадити ефективні режими подачі змащувальних матеріалів при листовій гарячій прокатці.

1.5 Охолодження робочих валків у технології листової гарячої прокатки

На сьогоднішній день відомо велику кількість способів охолодження робочих та опорних валків за допомогою струменів рідини під тиском, а також конструкцій та пристроїв для їх здійснення [18]. Також відомі рішення щодо зниження температури поверхні смуги перед входом у осередок деформації, що дозволяють зменшити температуру в місці контакту валка з смугою, що прокочується. У літературі дані рішення звуться «система анти лущення».

Для технології листової гарячої прокатки характерні умови, коли температура робочих валків безпосередньо у контакті зі смугою може досягати

400-500 °С. При експлуатації робочих валків спостерігається значний перепад температур робочого шару (термічний цикл), що сприяє утворенню термічних тріщин і передчасному виходу валків з ладу. Крім того, при великих температурах знижується міцність робочого шару валка, відбувається значне падіння твердості (до 25%) і, отже, значне зниження зносостійкості, виникає інтенсивний розпал поверхні валків, що сприяє появі на поверхні прокату дефекту «вкатаної» або «розгарної» окалини.

Зниження рівня термічної напруги, а, отже, і підвищення їх експлуатаційних характеристик, може бути досягнуто внаслідок організації раціонального теплового режиму роботи валків, зокрема режиму охолодження.

1.6 Вимоги до систем охолодження листових станів гарячої прокатки

До 80-х років минулого століття конструювання систем охолодження листових станів здійснювали без урахування ряду найважливіших вимог технології прокатки, що визначають якість та продуктивність. Так, наприклад, основний параметр (витрата охолоджуючої рідини) розраховували тільки виходячи з умови теплового балансу при режимі, що встановився, а також виходячи з вимоги відведення певної кількості теплоти. При цьому в розрахунку не враховувалися вимоги, які є обов'язковими: зміна та управління тепловим профілем робочих валків у процесі прокатки. Крім того, при розрахунку не враховувалися технологічні обмеження. Наприклад, розрахунок температури смуги, що прокочується по проходах, здійснювався без урахування ряду технологічних систем: гідро видалення окалини, міжклітинного охолодження, а також примусового зниження температури поверхні смуги перед входом у середовище деформації, що підтверджує актуальність досліджень [19].

Нині можна сформулювати такі вимоги, яким має відповідати сучасна методика розрахунку теплового режиму роботи стану гарячої прокатки, у частині налаштування та роботи системи охолодження робочих валків:

1. Забезпечення ефективного відведення необхідної кількості теплоти, що виділяється, залежно від розрахункової функції, яка враховує: склад і характеристики заготовок, що прокочуються в рамках кожної монтажної партії,

режим обтискань, натяг, швидкості прокатки і т.д.

2. Забезпечення індивідуального диференційованого регулювання витрати охолоджувача по прокатним клітям, як для кожної смуги, що прокочується, так і для всієї монтажної партії в цілому.

3. Забезпечення індивідуального регулювання витрати охолоджувача по довжині бочки валка з метою управління тепловим профілем валка та смуги, що прокочується.

4. Розрахунок режиму охолодження та способу подачі охолоджувача повинен виконуватись з урахуванням:

– теплового стану поверхні смуги в осередку деформації, що визначається з урахуванням впливу зовнішніх факторів та систем: гідро видалення окалини, міжклітинне охолодження, примусове зниження температури поверхні смуги перед входом у середовище деформації, а також тепловиділення у процесі пластичної деформації заготовки;

– допустимого температурного діапазону експлуатації валків, а також вимог щодо розподілу охолоджувача по довжині бочки валка;

– сумарної витрати охолоджувача, що подається на стан, з урахуванням можливості його перерозподілу по клітях безпосередньо у процесі прокатки.

1.7 Способи подачі охолоджуючої рідини на валки

В даний час всі способи подачі охолоджувача на поверхню робочих і опорних валків умовно можна розділити на декілька типів охолодження: струменеві охолодження, через щілинні колектори, комбіноване охолодження, водоповітряне та емульсійно-повітряне охолодження.

Багато діючих станів, введені в експлуатацію до 80-х років XX століття, переважно оснащувалися системою ступеневого охолодження: колекторами з круглими або прямокутними отворами, розташованими в певному порядку, з певним кроком по довжині [20]. Для досягнення ефективності процесу охолодження колектори стали оснащувати плоско струминними форсунками з метою стабілізації теплового стану та керування тепловим профілем робочих валків. Однак у літературі практично відсутні рекомендації, що дозволяють

визначати оптимальне розташування колекторів охолодження, що забезпечує максимальне тепло знімання з поверхні валків.

1.8 Аналіз відомих методів математичного опису теплових процесів функціонування системи «робочий валок – смуга»

Моделювання теплового стану для елемента системи - «смуга» описані у відомих роботах Целікова А.І., Хлопоніна В.М., Полухіна П.І., В.І., В.П. Полухіна, Коновалова Ю.В., Шичкова О.М., Салганіка В.М. та інших вчених [22].

Відмінною особливістю для дослідження теплового стану смуги є вибір підходів на вирішення поставленої задачі. Умовно підходи можна розділити на дві групи: емпіричні залежності та вирішення задачі теплопровідності із застосуванням різних математичних методів. Отримані авторами емпіричні залежності побудовані на основі збору та обробки великої кількості експериментальних даних та дозволяють отримати досить точні рішення. Однак цей підхід не має єдиного (узагальнюючого) алгоритму, при цьому отримані рішення вимагають верифікації до умов діючого виробництва.

Узагальнюючим алгоритмом, спрямованим на дослідження теплового стану елемента системи – «смуга», є рішення завдання теплопровідності. Використання цього підходу дозволяє підвищити точність розрахунків, а також дозволяє врахувати вплив зовнішніх та внутрішніх факторів.

Загальним під час вирішення завдань є облік зовнішніх чинників: конвективний теплообмін, теплообмін випромінюванням, виділення тепла при пластичній деформації смуги.

Аналіз відомих робіт показує, що наведені формули дозволяють з достатньою точністю описати теплові втрати для умов листової прокатки.

Облік теплової взаємодії між смугою та робочими валками багато авторів описують емпіричними залежностями.

Моделювання теплового стану елемента системи «робочий валок» дозволяє аналізувати теплові процеси в поверхневому шарі валків та смуги, а також температурне поле валка, та видавати конкретні рекомендації щодо налаштування теплового режиму роботи валків.

Температура валків при гарячій прокатці змінюється внаслідок чергування циклів «нагрів – охолодження». Нагрівання валків відбувається головним чином від енергії, що віддається нагрітою смугою і лише незначною мірою від теплоти, що виділяється при пластичній деформації. Валки охолоджуються водою. Умови нагрівання та охолодження валків у процесі прокатки неоднакові по довжині бочки і, відповідно, неоднакові величини термічного розширення діаметра бочки.

Неправильна організація теплового режиму прокатки може призвести до небажаних наслідків, до поломки валка. Недостатнє кількість охолоджувача чи неправильна його подача викликає перегрів валків, спотворення теплового профілю, утворення тріщин розпалу.

Для опису процесів перенесення теплоти в речовинному середовищі у загальному випадку використовують диференціальне рівняння теплопровідності. Для опису конкретного процесу перенесення теплоти до даного рівняння необхідно використовувати «граничні умови». У деяких випадках система з диференціального рівняння та граничних умов може бути вирішена аналітично, однак у більшості теплофізичних процесів аналітичне рішення відсутнє.

Для аналізу складних явищ, до яких слід віднести і процеси теплопровідності, основне рівняння теплопровідності записується в такому вигляді [24]:

У науці склався загальний підхід, пов'язаний із використанням методів математичної фізики. Суть цього підходу полягає в тому, що на підставі відомих фізичних законів встановлюються шукані зв'язки в межах нескінченно малого обсягу всередині тіла та за нескінченно малий проміжок часу. В результаті одержують диференціальне рівняння (або систему таких рівнянь), що описує весь клас досліджуваних явищ. Для вирішення конкретних завдань це диференціальне рівняння інтегрують у межах досліджуваного простору та для заданого інтервалу часу, отримуючи таким шляхом аналітичне розв'язання задачі. Загальні рішення перерахованих рівнянь у випадку похідних не мають фізичного рішення. Для отримання кінцевого рішення необхідно поставити граничні умови розв'язання задачі.

1.9 Мета та постановка завдань дослідження

На основі проведеного літературного аналізу визначено, що основний напрямок дослідження полягає у розвитку методології комплексного вдосконалення технології та обладнання для змащування та охолодження валків листових станів гарячої прокатки.

Під час проведення досліджень вирішується комплексна науково-технічна проблема – підвищення експлуатаційної стійкості робочих валків безперервної групи клітей листових станів гарячої прокатки. Вирішення поставленої проблеми можливе кількома шляхами: технологічним (удосконаленням технології) та конструкційним (удосконаленням обладнання).

Під технологічним впливом мається на увазі зміна режимів обтискання та швидкостей прокатки. Дані питання досить глибоко вивчені, оскільки безпосередньо впливають на якість готової смуги, і широко застосовуються, наприклад, технології контрольованої прокатки, тому не є предметом дослідження в даній роботі.

Конструкційні рішення, спрямовані на стабілізацію і поліпшення теплового стану робочих валків, і пов'язані з налаштуванням системи охолодження. В результаті неправильного охолодження на робочих поверхнях виникають втомні термічні напруги. Висока температура заготовки, що прокочується в чорнових клітях, призводить до нерівномірного зношування і утворення на поверхні валків «сітки розпалу».

Конструкційним впливам присвячено досить багато досліджень [25]. Однак комплексних досліджень, спрямованих на розробку єдиної методології та побудови алгоритмів для налаштування системи охолодження робочих валків безперервної групи клітей, у літературі мало і тому, проблема недостатньо вивчена.

2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Дослідження впливу режимів подачі рідких мастильних матеріалів на функціонування системи «опорний валок – робочий валок – смуга»

Застосування рідких мастильних матеріалів у технології листової гарячої прокатки, згідно з проведеними ранами дослідженнями, спрямоване на зниження ресурсоємності виробництва прокатної продукції, виражене в скороченні енергетичних витрат і підвищенні експлуатаційної стійкості робочих валків.

Для якісної оцінки ефективності застосування режимів подачі рідких матеріалів, а також для подальшої рекомендації їх застосування в технології листової гарячої прокатки, запропоновано використовувати показники ефективності E_i.

$$E_i = \frac{П_i^0}{П_i^1}, \tag{2.1}$$

де $П_i$ -показники оцінки ефективності застосування режимів РМ: 0 - без застосування РМ; 1 – із застосуванням РМ.

Показники ефективності E_i застосування режимів подачі рідких мастильних матеріалів технології листової гарячої прокатки.

Для досліджуваних режимів подачі рідких РМ з метою подальшої оцінки їх ефективності пропонуються використовувати такі відносні показники (E_i), які умовно можна розділити на дві групи.

Ефективність впливу на процеси змащування для оцінки функціонування системи «опорний валок – робочий валок – смуга» розраховується за дотриманням наступних умов: $E_i > 1$ та $Ei \rightarrow \max$.

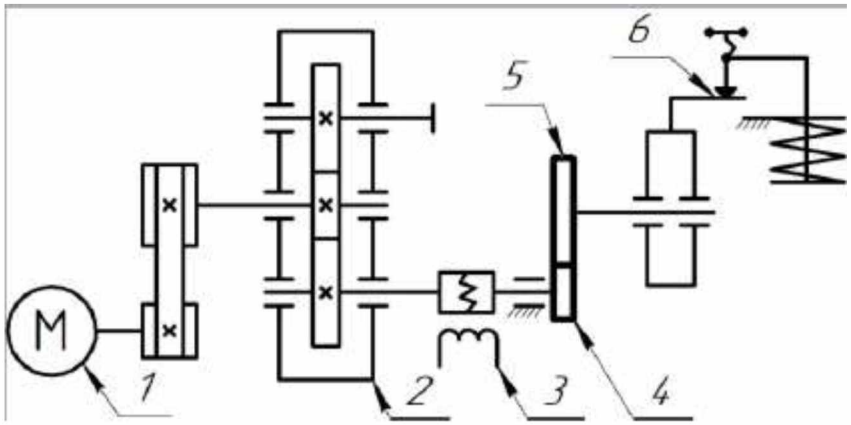
Визначення показників ефективності залежно від режимів подачі рідких РМ, а також їх вплив на зміну контактної взаємодії в системі «опорний валок – робочий валок» необхідно дослідити в рамках постановки та проведення лабораторних експериментів. Ефективним напрямом вважається використання лабораторно-статистичних методів обробки даних, одержаних на фізичній моделі.

Метод фізичного (лабораторного) моделювання дозволяє вирішити конкретні завдання, у тому числі в галузі тертя та зношування, а також дозволяє

за допомогою теорії подоби трансформувати отримані результати на реально діючий промисловий об'єкт.

2.2 Методика дослідження впливу режимів подачі мастильних матеріалів

Для проведення досліджень впливу режимів подачі ММ на зміну контактної взаємодії в системі «опорний валок – робочий валок», використали випробувальний стенд – Машина тертя СМЦ-2 (далі за текстом, лабораторна установка). Кінематична схема лабораторної установки наведена рис. 2.1 , технічні характеристики наведено у табл. 2.1.



1 - електродвигун; редуктор з передатним ставленням U=1; 3 безконтактний індуктивний датчик вимірювання «моменту тертя»; 4- приводний нижній ролик, що моделює робочий валок; 5 – верхній ролик, що моделює опорний валок; 6 - система навантаження

Рис. 2.1 – Кінематична схема лабораторної установки

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики лабораторної установки

Частота обертання приводного нижнього ролика, $с^{-1}$	0,1 ... 25,0
Діапазон виміру моменту тертя, Н*м	1,5 ... 15,0
Навантаження на зразки, кН	0,2…2,0
Потужність, споживана, макс, кВт	2,2

Для проведення експериментальних досліджень лабораторна установка пройшла технічну модернізацію, що полягає у відмові від використання

потенціометра та перехід на напівпровідникові схеми керування сигналами, а також у використанні контролерів для керування та стеження за декількома досліджуваними параметрами одночасно. У силовій частині встановлено частотний перетворювач електродвигуна. З метою визначення зміни завантаження головного приводу у процесі проведення експерименту на кожну з трьох фаз електродвигуна було встановлено двоканальну систему реєстрації енергосилових параметрів (напруги та струму) [177]. Загальний вид лабораторної установки, цифрового блоку управління та пристрою виведення інформації представлені на рис. 2.2 та рис. 2.3.

Рис. 2.2 – Загальний вигляд лабораторної установки

Рис. 2.3 – Блок контролерів та пристрої виведення інформації

Керування всім комплексом досліджуваних параметрів здійснюється у вигляді спеціально розробленої програми для ЕОМ через інтерфейс,

Визначення показників ефективності під час проведення лабораторних досліджень.

Запропоновані показники ефективності застосування рідких ЗМ були визначені на лабораторній установці.

Кінематична схема приводу верхнього робочого валка широкосмугового стану гарячої прокатки відповідає кінематичній схемі, представленій на рис. 2.1 , і використовується на лабораторній установці.

Таким чином, підбираючи відповідні діаметри верхнього та нижнього

роликів, матеріали роликів, та зусилля навантаження, на лабораторній установці можна відтворювати та досліджувати контактну взаємодію в системі «опорний валок - робочий валок», на прикладі верхньої валкової пари клітей «кварто».

У процесі постановки та проведення дослідження на лабораторній установці «Машина тертя» було визначено такі показники ефективності (E_i) застосування рідких СМ для технології листової гарячої прокатки:

На контактну взаємодію у системі «опорний валок – робочий валок» впливають такі параметри:

погонне навантаження, н/м;

нормальні контактні та дотичні напруження, МПа;

коефіцієнт тертя;

момент тертя, кН·м;

подача ЗМ, мм^3/хв.

Відомо [179], що коефіцієнт тертя через момент тертя можна описати наступною залежністю:

$$f = \frac{2\mathrm{M}_{\mathrm{тр}}}{d_{\mathrm{раб}} \times P'} \tag{2.2}$$

де $M_{тр}$ - момент тертя, контакті «опорний валок – робочий валок», Н·м;

$d_{роб}$ – діаметр нижнього ролика, що моделює верхній робочий валок, мм;

P – навантаження в сполученні для системи «опорний валок–робочий валок», Н.

З метою забезпечення подібності під час відтворення режимів контактної взаємодії досліджуваної системи «опорний валок – робочий валок» клітей «кварто» та роликів, що моделюють верхню валкову пару на лабораторній установці, використовували основні положення завдання Герца та другу теорему теорії подібності. В результаті було отримано вираз:

$$f = \frac{4\mathrm{M}_{\mathrm{тр}}}{\pi d_2 P^0_{max} bl'} \tag{2.3}$$

де P^0_{max} - максимальна контактна напруження;

b - напівширина майданчика контакту, мм;

l - довжина бочки опорного валка (верхнього ролика), мм.

При моделюванні прийнято такі припущення:

- зсув осі робочого валка щодо опорного відсутня;
- коефіцієнт тертя на контакті «опорний валок – робочий валок» та контакті лабораторної установки «Машина тертя» однаковий.

Модельована контактна взаємодія в лабораторній установці та контактна взаємодія на контакті «опорний валок – робочий валок» вважатимуться подібними в тому випадку, якщо масштабні коефіцієнти математичних залежностей дорівнюватимуть 1.

Комбінація масштабних коефіцієнтів буде представлена у вигляді:

$$k_{f_1} f_1 = \frac{4 k_{\text{м}_{\text{тр}}} \text{M}_{\text{тр}}^1}{\pi k_{d_2} d_2^1 k_{P^0_{max}} P^{01}_{max} k_b b^1 k_l l^1}, \tag{2.4}$$

де 1 - індекс, що вказує на характеристики об'єкта моделювання.

Характеристики експериментальної установки через комплекс масштабних коефіцієнтів виглядатимуть так:

$$f_2 = k_f f_1; \text{M}_{\text{тр}}^2 = k_{\text{м}_{\text{тр}}} \text{M}_{\text{тр}}^1;\ d_2^2 = k_{d_2} d_2^1;\ P^{02}_{max} = k_{P^0_{max}} P^{01}_{max};\ b^2 = k_b b^1;\ \ l^2 = k_l l^1.$$

Розділивши вираз (2.4) почленно отримаємо:

$$f_1 = \frac{4 \text{M}_{\text{тр}}^1}{\pi d_2^1 P^{01}_{max} b^1 l^1}. \tag{2.5}$$

При використанні індикатора подібності стає можливим визначення масштабних коефіцієнтів, що входять у вираз (2.5) , та порівняння даних, отриманих на лабораторній установці та в результаті дослідних досліджень.

Вирази визначення масштабних коефіцієнтів:

$$k_{d_2} = \frac{d_2^2}{d_2^1} = 0{,}0407;\ k_{P^0_{max}} = \frac{P^{02}_{max}}{P^{01}_{max}} = 0{,}367; k_b = \frac{b^2}{b^1} = 0{,}0149;$$

$$k_l = \frac{l^2}{l^1} = 0{,}00549, k_{\text{м}_{\text{тр}}} = \frac{\text{M}_{\text{тр}}^2}{\text{M}_{\text{то}}^1} = 2{,}542 \cdot 10^{-6},$$

де M_1 -визначався за експериментальними даними на лабораторної установці.

За отриманим коефіцієнтом подібності k_f для перевірки адекватності запропонованих рішень було проведено попередні однофакторні експерименти.

2.3 Постановка та проведення однофакторних експериментів

Як об'єкт моделювання прийнято кліть №7 листового стану гарячої прокатки 2000 ПрАТ «Автокраз». За підсумками відповідних розрахунків визначено умови проведення лабораторного експерименту.

Постійні фактори:

діаметр верхніх роликів у середньому 65 мм;

діаметр нижніх роликів у середньому 35 мм;

ширина верхнього ролика 10 мм;

ширина нижнього ролика 12 мм;

вага роликів перед експериментами: нижня – 68 г, верхня – 249 г;

верхній ролик холостий;

матеріал роликів: верхній ролик – сталь 90ХФ, нижній ролик швидкорізальна сталь 200ХВФМ;

Мастильний матеріал – МГП.

Фактори, що варіюються:

число оборотів нижнього ролика ω = 500; 1000 об/хв;

об'єми мастильного матеріалу Q= 0,01; 0,5 мм^3/хв;

зовнішнє навантаження P = 300; 900 Н.

Методика проведення попередніх експериментів.

Під час реалізації експерименту використовували параметри. Параметри експерименту, що варіюються:

X1 – зовнішня додана до верхнього ролика навантаження, P (290; 850 Н);

X2 – кількість обертів нижнього ролика, ω (500; 1000 об/хв);

X3 - витрата мастильного матеріалу, Q (0,1; 0,5 мм^3/хв). Контрольовані параметри експерименту:

Y1 – момент тертя ($M_{тр}$, Н·м);

Y2 – знос верхнього та нижнього ролика ($U_{верх}$, $U_{нижн}$, г);

Y3 – температура верхнього та нижнього ролика (T, °C).

ЗМ в зону контакту подавався порційно, та необхідний об’єм, відповідно до умов експерименту.

Зусилля притискання роликів (Р, Н) фіксувалося за допомогою натискного пристрою та підтримувалося на постійному рівні на всіх етапах проведення експерименту.

Час проведення експерименту визначалося за кількістю обертів нижнього ролика.

Температура роликів (Т, °С) контролювалася за допомогою відтарованої термопари, якою оснащена лабораторна установка.

Момент тертя ($М_{тр}$, Н·м) вимірювався безконтактним індуктивним датчиком. Фіксація одержаних даних здійснювалася за допомогою електронно-обчислювального блоку, інтегрованого з ЕОМ. Кількість вимірювань, що реєструються цифровим блоком, становила 4-м вимірюванням в секунду. Точність виміру моменту сили тертя дорівнює 0,015 Н·м (±1,5%).

Зношування роликів ($U_{верх}$, $U_{нижн}$, гр.) визначався на аналітичних вагах з точністю до 0,001 гр.

При моделюванні контактної взаємодії у системі «опорний валок – робочий валок» кожної з клітей було реалізовано вісім однофакторних експериментів. Для проведення порівняльного аналізу було проведено додатковий експеримент (№0 див. табл. 2.2) за таких умов: Р=850 Н; ω = 1000 об/хв, Q = 0 мм^3/хв.

У табл. 2.2 наведено результати моделювання для 7-ої кліті листового стану 2000. Фотографії експериментальних зразків після проведення експериментів представлені рис. 2.4.

Таблиця 2.2 – Результати попередніх експериментів на лабораторній установці

Номер досвіду	Варіюються параметри експерименту			Вимірювані параметри експерименту				
	Навантаження, Р, Н	Кількість оборотів,	Витрата СМ, Q мм^3/хв	Момент тертя, $М_{тр}$, Н·м	Знос, гр.		Температура,°С	
					$U_{верх}$	$U_{нижня}$	$Т_{верх}$	$Т_{нижня}$
0	850	1000	0	29,3	1,199	0,906	65	56,7
1	290	500	0,1	22,2	0,895	0,77	48,65	42,8
2	850	500	0,1	27,9	0,827	0,79	43,25	38,1

3	290	1000	0,1	25,0	0,898	0,803	63	54,7
4	850	1000	0,1	26,7	0,736	0,904	51,45	44,9
5	290	500	0,5	23,4	0,723	0,812	43,9	40,6
6	850	500	0,5	26,5	0,747	0,756	46,1	39,9
7	290	1000	0,5	24,4	0,895	0,881	69,45	61,65
8	850	1000	0,5	28,3	0,953	0,795	60	47,65

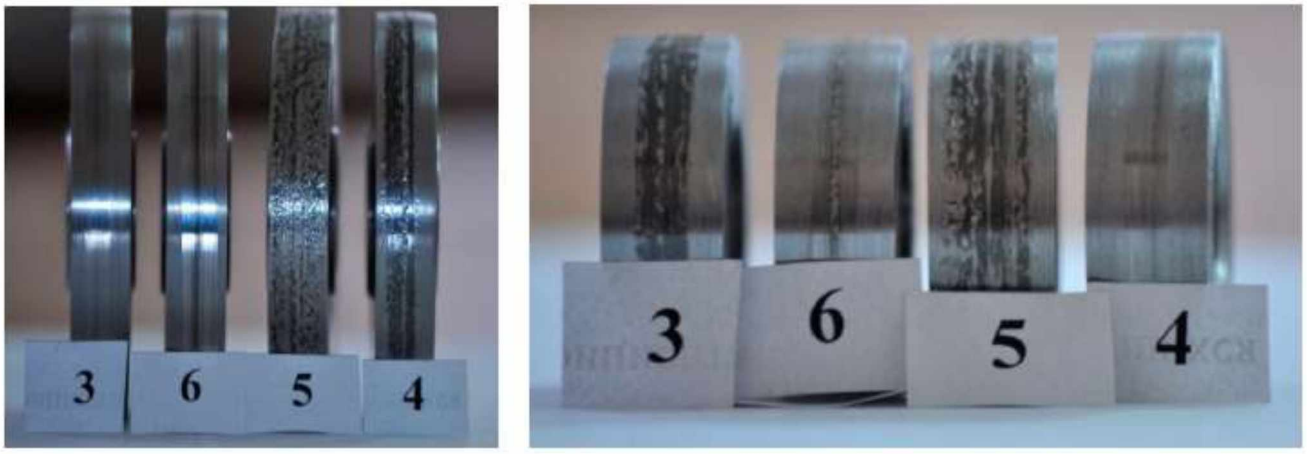


Рис. 2.4 – Експериментальні зразки після проведення експерименту

Верифікація експериментальних даних

Верифікація отриманих даних проводилася шляхом порівняння результатів лабораторного експерименту з даними діючого виробництва з урахуванням розрахованого коефіцієнта подібності. Результати наведено у табл. 2.3. Отримані розбіжності в 12...21% можна визнати допустимими, а розроблені підходи щодо експериментів на лабораторній установці «Машина тертя» застосовними.

Таблиця 2.3 – Результати порівняльного однофакторного експерименту

Кліть	Марка сталі, типорозмір	Група сталі (σ_{0i}),МПа	Порівняльні параметри процесу листової прокатки		
			Момент тертя, Н·М		Розбіжність, %
			Лаборатор.	Експерим.	
7	SAE1006 2x1250	1	26,6	27,5	3,27
7	Ст2пс 3x1185	2	23,2	23,7	2,11
7	St-37-2 2x1000	2	24,7	23,1	-6,93
7	10Г2ФБЮ 8x1250	6	26,6	25,1	-5,98
7	20ЮА 6,0x1280	2	24,3	21,7	-11,98

7	SAE1015(M) 2,5x1510	1	23,5	21,1	-11,37

Висновки до розділу

На основі проведеної попередньої серії лабораторних експериментів визначено діапазони впливу факторів: зовнішнє навантаження Р (Н), швидкість обертання нижнього ролика V (об/хв), витрата ЗМ Q ($мм^3$/хв) на досліджувані технологічні параметри: момент тертя $М_{тр}$ (Н м), величину зносу $U_{верх}$, $U_{нижн}$ (гр.) та температуру верхнього та нижнього ролика (моделюючих робочий та опорний валки) Т (град.).

Результати лабораторних експериментів показують, що наявність ЗМ при контактній взаємодії дозволяє зменшити зношування роликів (грам) і момент тертя (Н·м). Отримані результати порівнювалися з даними експерименту №0. Для верхніх роликів (моделюють опорні валки) зафіксовано зниження зносу в 1,1...1,32 разів, для нижніх роликів (моделюючих робочі валки) в 1,1..1,42 разів, зниження моменту тертя склало 1,2...2, 4 рази.

Визначено найбільш ефективні режими контактної взаємодії за умови застосування рідких ЗМ.

Результати попередніх експериментів не повною мірою відображають процеси, що протікають при контактній взаємодії в системі «опорний валок – робочий валок» при подачі СМ, і дозволяють лише виявити напрямок подальших досліджень. Враховуючи різноманіття та складність процесів, для більш глибокого дослідження впливу різних факторів необхідно побудувати математичну модель високого (другого) порядку із залученням теорії планування експерименту.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Удосконалення обладнання та застосування технології ефективного охолодження для системи «робочий валок – смуга»

Визначення раціонального розташування колекторів охолодження системи «робочий валок – смуга» було проведено за допомогою спеціально розробленої методики.

Запропонована методика базується на проведенні теоретичних експериментів на розробленій математичній моделі теплового стану смуги, що прокатується, і робочих валків. Порядок постановки та проведення серії теоретичних експериментів визначається згідно з теорією планування експерименту [18]. Чисельна реалізація експериментів проводилася у розроблених математичних моделей [24].

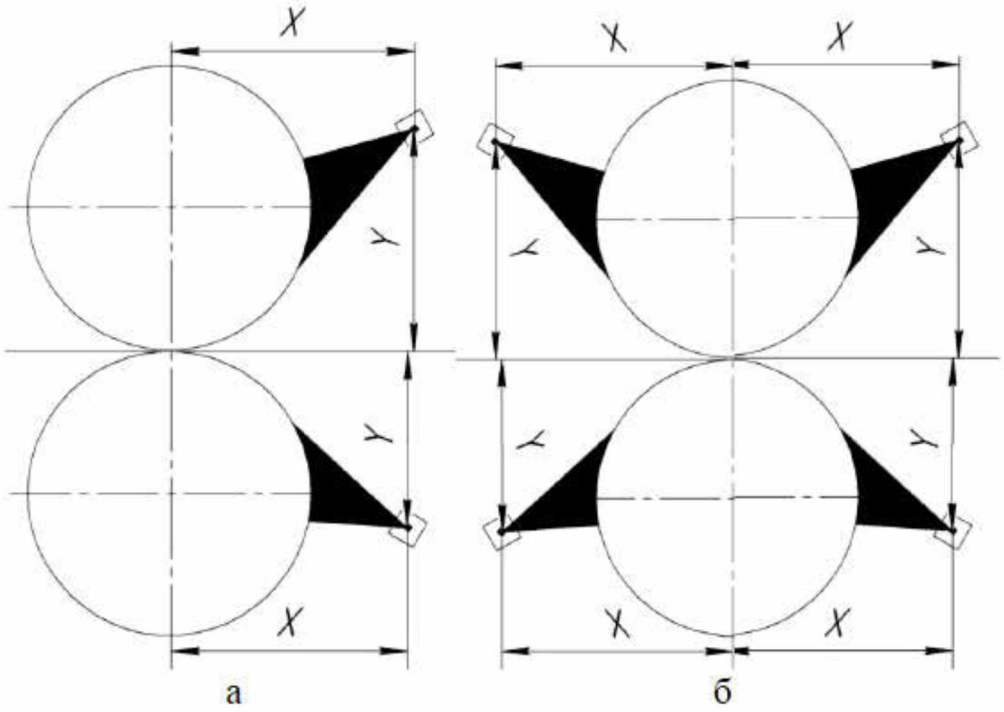
На першому етапі дослідження реалізовано серію однофакторних експериментів. За результатами експериментів визначено основні технологічні фактори, що впливають на тепловий стан у системі «робочий валок – смуга», та ступеня їх впливу. Керування тепло зніманням з поверхні робочих валків найбільш оптималшьно забезпечується зміною факторів:

- положення колекторів подачі охолоджувача: координати X, мм, Y, мм, кут нахилу φ, град;
- кут розкриття та кут перекриття форсунок, град;
- кількість рядів форсунок n, прим;
- тиск у системі подачі охолоджувача, МПа.

Розрахункова схема наведена рис. 3.1.

На другому етапі дослідження було ухвалено рішення про побудову математичних моделей другого порядку для найбільш значущих факторів з використанням планів ОЦКП [25]. Фактори та діапазони варіювання, наведені у табл. 3.1 - 3.3.

Для побудови математичної моделі була побудована матриця експериментів, що включає 25 дослідів. Як відгук Y було обрано розрахункове максимальне значення температури робочих валків у центрі бочки T, °C.



а – у безперервній чорновій групі клітей; б – у безперервній чистовій групі клітей

Рис. 3.1 – Розрахункова схема визначення геометричного положення колекторів подачі охолодження листових станів гарячої прокатки

Таблиця 3.1 – Значення факторів у натуральному вигляді для безперервної чистової групи клітей листових станів гарячої прокатки

Координати для колекторів охолодження верхніх та нижніх робочих валків

Чинники	Тиск у системі P, МПа	Координата X, мм	Координата Y, мм	Кут нахилу колектора, φ, град
Кодування	X_1	X_2	X_3	X_4
Основний рівень X_0	1,4	400	600	40
Інтервал варіювання ΔX	0,4	140	140	8
Верхній рівень $X_0 + \Delta X$ (+1)	2,0	640	740	48
Нижній рівень X_0-ΔX (-1)	1,0	340	460	32
Позитивне плече зіркової точки (+α)	2,2	712,1	812,1	41,3
Негативне плече зіркової точки (-α)	0,8	287,9	387,9	28,6

Таблиця 3.2 – Значення факторів в натуральному вигляді для чистої безперервної групи клітей листових станів гарячої прокатки (Координати для колекторів охолодження верхніх робочих валків)

Чинники	Тиск у системі P, МПа	Координата X, мм	Координата Y, мм	Кут нахилу колектора, φ, град
Кодування	X_1	X_2	X_3	X_4
Основний рівень X_0	1,9	630	660	34,4
Інтервал варіювання ΔX	1	280	270	22,4
Верхній рівень $X_0 + \Delta X$ (+1)	2,9	910	930	48
Нижній рівень X_0-ΔX (-1)	0,9	340	390	13
Позитивне плече зіркової точки (+α)	3,31	1024,9	1041,7	67,31
Негативне плече зіркової точки (-α)	0,48	234,08	278,2	3,68

Таблиця 3.3 – Значення факторів в натуральному вигляді для чистої безперервної групи клітей листових станів гарячої прокатки (Координати для колекторів охолодження нижніх робочих валків)

Чинники	Тиск у системі P, МПа	Координата X, мм	Координата Y, мм	Кут нахилу колектора, φ, град
Кодування	X_1	X_2	X_3	X_4
Основний рівень X_0	1,74	640	720	27
Інтервал варіювання ΔX	0,84	170	170	17
Верхній рівень $X_0 + \Delta X$ (+1)	2,6	810	890	44
Нижній рівень X_0-ΔX (-1)	0,9	470	440	10
Позитивне плече зіркової точки (+α)	2,9419	880,38	960,38	41,038
Негативне плече зіркової точки (-α)	0,4481	399,62	479,62	2,962

У табл. 3.4 наведено результати дослідів за реалізованим планом. Для перевірки статистичної значущості моделі, що реалізується, кожен досвід дублювали мінімум три рази.

Таблиця 3.4 – Результати експериментів

№ досл.	Y (чорнова)	Y (чистова; верхні)	Y (чистова; нижні)
1	74,4	97	72
2	77,2	94	74
3	74,2	96	76
4	70,2	97	74
4	72,3	98	70
6	74,7	93	74
7	74,4	94	73
8	60,8	97	74
9	66,3	74	74
10	67,8	83	72
11	72,7	80	70
12	68,4	83	74
13	77,8	78	64
14	66,3	80	67
14	76,3	82	72
16	74,8	78	76
17	77,2	97	64
18	69,4	87	67
19	74,6	84	72
20	72,3	88	70
21	71,2	83	74
22	68,0	80	73
23	76,2	90	70
24	74,2	79	72
25	74,8	81	64

Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії проводився кодованому вигляді. Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів b_{0i}, b_i, b_{ii}, b_{ii}^2 проведена за критерієм Ст'юдента при 95% рівні значимості.

Для перекладу факторів із кодованих значень до натуральних величин були використані залежності, подані у табл. 3.5.

Перевірка адекватності отриманих моделей була проведена за критерієм Фішера та середньоквадратичним відхиленням. За результатами перевірки, всі

моделі визнані адекватними.

Таблиця 3.5 – Залежності для переведення рівнянь у натуральний вигляд

Фактор	T (чорнова; верх; низ)	T (чистова; верх)	T (чистова; низ)
X_1	$x_1 = \frac{X_1 - 2}{1}$	$x_1 = \frac{X_1 - 630}{280}$	$x_1 = \frac{X_1 - 810}{470}$
X_2	$x_2 = \frac{X_2 - 650}{350}$	$x_2 = \frac{X_2 - 660}{270}$	$x_2 = \frac{X_2 - 890}{550}$
X_3	$x_3 = \frac{X_3 - 750}{450}$	$x_3 = \frac{X_3 - 35,5}{22,5}$	$x_3 = \frac{X_3 - 44}{10}$
X_4	$x_4 = \frac{X_3 - 48}{32}$	$x_4 = \frac{X_4 - 1,9}{1}$	$x_4 = \frac{X_4 - 2,6}{0,9}$

Температура робочих валків у безперервній чорновій групі клітей.

Колектора охолодження верхніх та нижніх робочих валків.

$$T(\text{черновая; верх; низ})(Q, X, Y, \varphi) = 87,191 - 44,2P - 18,2X - 62,1Y - 20,5\varphi + 27,1PX + \\ + 56,5P\varphi + 30,2XY + 12,2X\varphi + 42Y\varphi - 32,01X^2 - 19,1Y^2 + 27,3\varphi^2 + 49,0P^2 \\ (R^2 = 0,85; F^{расч}_{0,95;7)} = 205,7 \geq F^{табл} = 22,6) \quad (3.1)$$

Температура робочих валків у безперервній чистовій групі клітей.

$$T(\text{чистовая; верх})(X, Y, \varphi, Q) = 133,2 - 36,2X - 26,2Y - 20,6\varphi - 32,6P - 12,1XY + \\ + 17,7X\varphi - 23,1XP + 24,8Y\varphi + 28,9YQ + 14,2\varphi P + 22,31X^2 - 18,80Y^2 - 22,7\varphi^2 + 62,5P^2 \\ (R^2 = 0,86; F^{расч}_{0,95;7)} = 235,8 \geq F^{табл} = 21,3) \quad (3.2)$$

Колектори охолодження верхніх робочих валків.

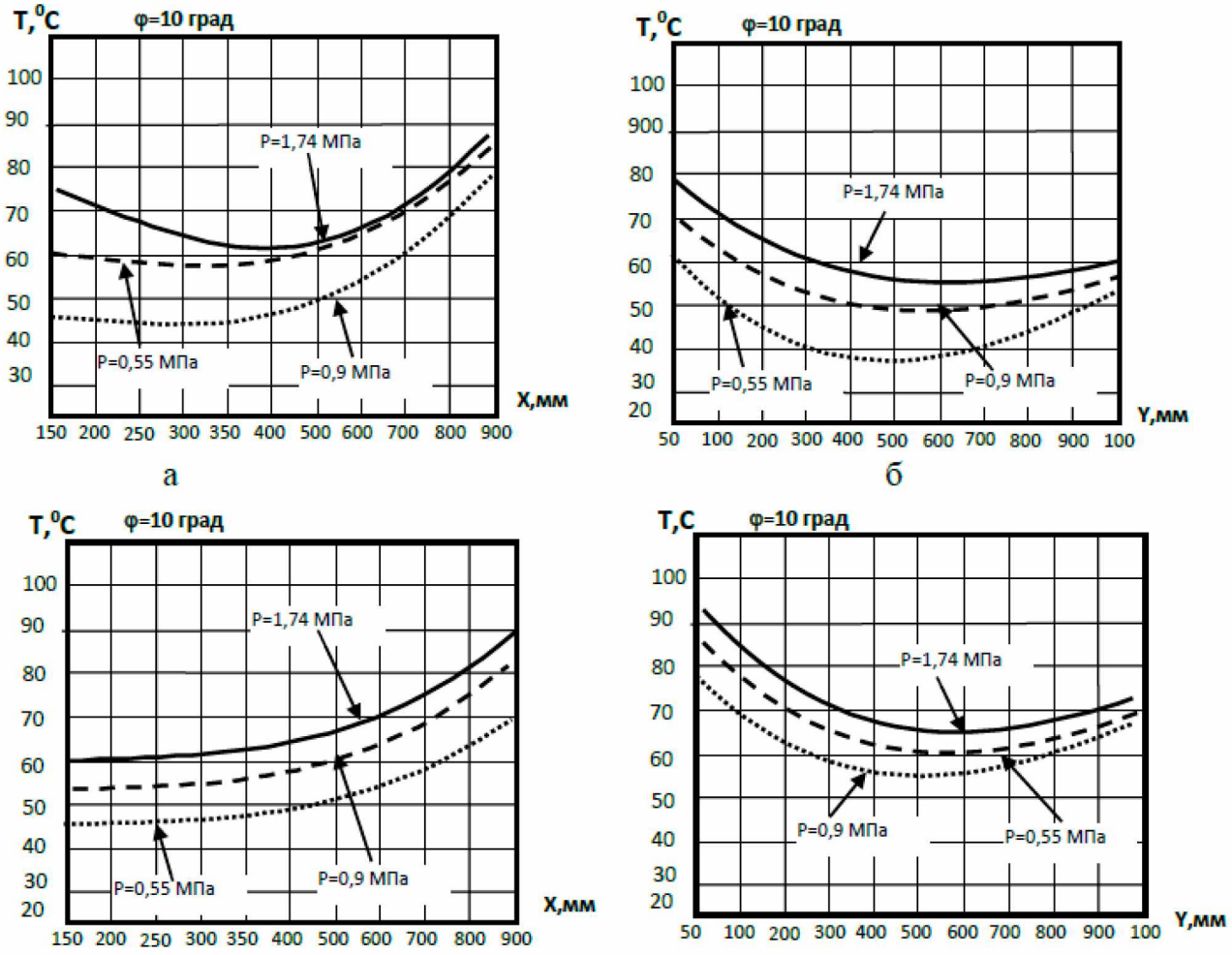
$$T(\text{чист; низ})(X, Y, \varphi, Q) = 137,9 - 63,7X - 28,3Y - 29,6\varphi - 32,9P - 19,1XY + +15,2X\varphi \\ - 23,7XP + 34,4Y\varphi + 22,1YP + 14,2\varphi P - 37,11X^2 - 23,4Y^2 - 32,1\varphi^2 + 46,2P^2 \\ (R^2 = 0,85; F^{расч}_{0,95;7)} = 223,7 \geq F^{табл} = 19,8) \quad (3.3)$$

За отриманими рівняннями було побудовано графіки, що представлені рис. 3.2 та рис. 3.3 .

Аналіз отриманих результатів досліджень дозволяє зробити такі висновки

1. Аналіз виразів (3.1) - (3.3) показує, що найбільше впливає на досліджувану величину (T, °C) надає чинник Q – тиск у системі подачі охолоджувача, МПа. Аналіз графіків дозволяє зробити висновок, що найкраще вибирати фактор Q в діапазоні 0,9 ... 1,63 МПа. Слід зазначити, що фактор (Q) у рівняннях (3.1) - (3.3), крім впливу на досліджувану величину (T, °C), бере участь

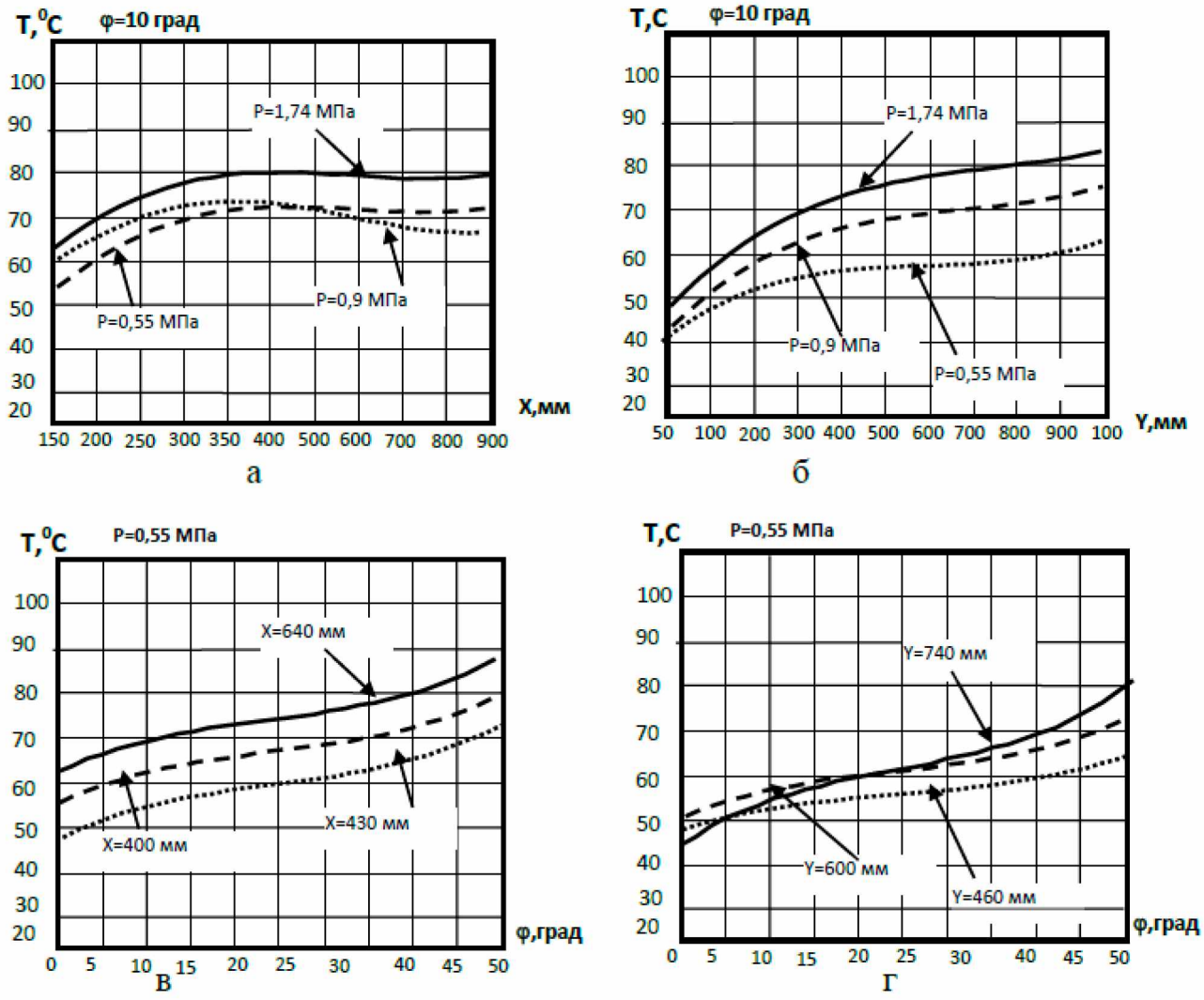
у всіх коефіцієнтах парної кореляції, що говорить про наявність кореляційного взаємозв'язку досліджуваних факторів.



а, б – температура робочих валків у безперервній чорновій групі клітей; в, г – температура робочих валків у безперервній чистовій групі клітей при охолодження верхніх робочих валків

Рис. 3.2 – Графіки залежностей, які описують зміну температури робочих валків залежно від різного положення колекторів системи охолодження за координатою X, мм та координатою Y, мм при різних параметрах тиску в системі подачі охолоджувача P ,МПа та куті нахилу колектора φ ,град:

2. Аналіз виразів (3.1) - (3.3) показує, що всі досліджувані фактори впливають на зміну температури верхнього та нижнього робочих валків. Аналіз результатів досліджень показує, що для досягнення мінімальної температури робочих валків рекомендується вибирати такі параметри:



а, б – температура робочих валків у безперервній чистовій групі клітей при охолодженні нижніх робочих валків; в, г – температура робочих валків у безперервній чорновій групі клітей за зміни кута нахилу колектора φ, град

Рис. 3.3 – Графіки залежностей, які описують зміну температури робочих валків залежно від різного положення колекторів системи охолодження за координатою X, мм та координатою Y, мм при різних параметрах тиску в системі подачі охолоджувача P, МПа та куту нахилу колектора φ, град

Для безперервної чорнової групи клітей:

– положення колектора за координатою X = 450…550 мм;

– положення колектора за координатою Y = 350 ... 700 мм;

– кут нахилу колектора φ = 18 ... 32 град.

Для безперервної чистової групи клітей при охолодженні верхніх робочих

валків:

– положення колектора за координатою X = 490 ... 620 мм;

– положення колектора за координатою Y = 600 ... 750 мм;

– кут нахилу колектора φ = 37 ... 50 град.

Для безперервної чистової групи клітей при охолодженні нижніх робочих валків:

– положення колектора за координатою X = 450 ... 690 мм;

– положення колектора за координатою Y = 480 ... 650 мм;

– кут нахилу колектора φ = 32 ... 47 град.

Аналіз отриманих даних дозволив дійти невтішного висновку, що досліджувані функції, описані рівняннями (3.1) - (3.3), є статистично адекватними.

Для пошуку оптимальних значень параметрів, що досліджуються в експерименті, було використано методику, наведену в роботі [11].

Як досліджувану функцію були вибрані такі параметри:

- температура робочих валків у безперервній чорновій групі клітей - T(чорнова), °C;
- температура верхніх робочих валків у безперервній чистовій групі клітей - T(чистова, верх), °C;
- температура нижніх робочих валків у безперервній чистовій групі клітей - T(чистова, низ), °C;

Розрахунок параметрів проводився для рівнянь, одержаних у кодованому вигляді. Математичне рішення поставленого завдання зводилося до виразів:

$$T(\text{черновая}) \atop (Q, X, Y, \varphi) \to \min \begin{cases} \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_1} = 2{,}111 + 1{,}95x_2 - 1{,}2x_3 + 1{,}75x_2x_4 + 1{,}625x_2x_3x_4 - 0{,}98x_1 = 0 \\ \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_2} = -0{,}433 + 1{,}95x_1 + 2{,}01x_4 + 1{,}75x_1x_4 + 1{,}087x_3x_4 + 1{,}625x_1x_3x_4 - 0{,}82x_2 = 0 \\ \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_3} = -1{,}2x_1 + 2{,}175x_4 + 1{,}08x_2x_4 + 1{,}625x_1x_2x_4 - 4{,}68x_3 = 0 \\ \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_4} = -0{,}610 + 2{,}012x_2 + 2{,}175x_3 + 1{,}75x_1x_2 + 1{,}087x_2x_3 + 1{,}625x_1x_2x_3 + 1{,}418x_4 = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$T(\text{чистовая; верх})(Q, X, Y, \varphi) \to \min \begin{cases} \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_1} = -0{,}937x_3 + 0{,}812x_4 - 1{,}312x_2x_4 - 0{,}687x_3x_4 + 8{,}242x_1 = 0 \\ \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_2} = 0{,}662 - 1{,}312x_2x_4 + 2{,}74x_2 = 0 \\ \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_3} = -0{,}937x_1 - 0{,}687x_1x_4 - 2{,}258x_3 = 0 \\ \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_4} = -7{,}228 + 0{,}812x_1 - 1{,}312x_1x_2 - 0{,}687x_1x_3 + 1{,}24x_4 = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$T(\text{чистовая; низ})(Q, X, Y, \varphi) \to \min \begin{cases} \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_1} = -0{,}81x_2 + 1{,}06x_2x_4 - 1{,}62x_1 = 0 \\ \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_2} = -0{,}81x_1 + 1{,}06x_3x_4 + 3{,}52x_2 = -0{,}81 \\ \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_3} = 1{,}06x_2 + 1{,}31x_2x_4 + 6{,}52x_3 = 0{,}89 \\ \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_4} == 1{,}06x_1x_2 + 1{,}31x_2x_3 + 3{,}52x_4 = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Практичне рішення задачі оптимізації представлено у табл. 3.6 у вигляді певних координат центру, записаних у кодованому та натуральному вигляді для кожної поверхні відгуку.

Таблиця 3.6 – Результати пошуку оптимальних значень за рівняннями другого порядку

	Безрозмірні параметри				Розмірні параметри				Функція відгуку *y*
	x_1	x_2	x_3	x_4	X_1	X_2	X_3	X_4	T, °C
Чорнова група клітей	0,48	0,46	0,42	0,712	124,7	416,0	664,4	37,69	74,77
Чистова група клітей (верхні робочі валки)	0,93	2,78	2,31	6,776	891,42	412,8	-16,4	8,67	144,63
Чистова група клітей (нижні робочі валки)	0,10	0,20	0,171	0,019	647	684,98	29,90	1,76	66,912

Таким чином, на основі результатів теоретичних досліджень для

забезпечення максимального тепло знімання з поверхні робочих валків одержано рекомендації для встановлення колекторів охолодження.

3.2 Способи вдосконалення обладнання системи охолодження робочих валків

Однією з технічних проблем, які були вирішені під час проведення досліджень, є впровадження нових технічних рішень, спрямованих на підвищення стійкості робочих валків шляхом удосконалення обладнання системи охолодження.

Досвід експлуатації робочих валків показує, що неправильна організація теплового режиму прокатки може призвести до небажаних наслідків – термічного зношування, що призводить до збільшення параметрів знімання валка при його перешліфуванні. При неправильному налаштуванні системи охолодження робочих валків у процесі їх експлуатації можуть виявлятися такі негативні явища [27]:

– перегрів робочого валка (100…110 ^{0}C для безперервної чистової групи), що зумовлює спотворення теплового профілю;

– утворення тріщин розпалу (процес пов'язаний з термо циклюванням, тобто чергуванням циклів «нагрів-охолодження);

– значне термічне зношування.

Для усунення негативних явищ необхідно розробити та впровадити заходи, що спрямовані на удосконалення обладнання системи охолодження робочих валків, що включають:

- визначення оптимальної кількості охолоджувача, що подається на кожну з прокатних клітей;

- визначення раціонального розташування колекторів охолодження;

- зміна конструкції колекторів охолодження (при необхідності);

- вибір раціонального типу форсунок.

3.3 Розробка заходів щодо вдосконалення обладнання системи охолодження робочих валків безперервної чорнової групи клітей

Існуюча система охолодження робочих валків безперервної чорнової групи клітей стану до проведення модернізації являла собою систему колекторів спрейєрного типу (труба з отворами). Додаткове охолодження робочих валків здійснювалося за рахунок влучення охолоджувача з колекторів охолодження верхніх опорних валків, які також були колекторами спрейєрного типу. Аналіз роботи системи охолодження дозволив виявити, що робочі валки у безперервній чорновій групі клітей працюють за підвищених робочих температур. Так, наприклад, температура робочих валків в останній кліті (кліть №6) становила 80...85°С, що згідно з прийнятою технологією експлуатації є неприпустимим.

На основі розробленої математичної моделі теплового стану робочих валків, що включає визначення витрати (л/год), тиску (Р, МПа), а також оптимальних зон охолодження (обливу), запропоновані нові технічні рішення.

1. Для кліті №6 проведено перерозподіл об'ємів охолоджувача з верхнього опорного валка на колектор охолодження верхнього та нижнього робочого валка.

2. Для клітей №4-6 зроблено зміну конструкції колектора охолодження верхнього та нижнього робочого валка. Загальний вигляд колектора представлено рис. 3.4 . Фотографії виготовлених колекторів наведено рис. 3.5.

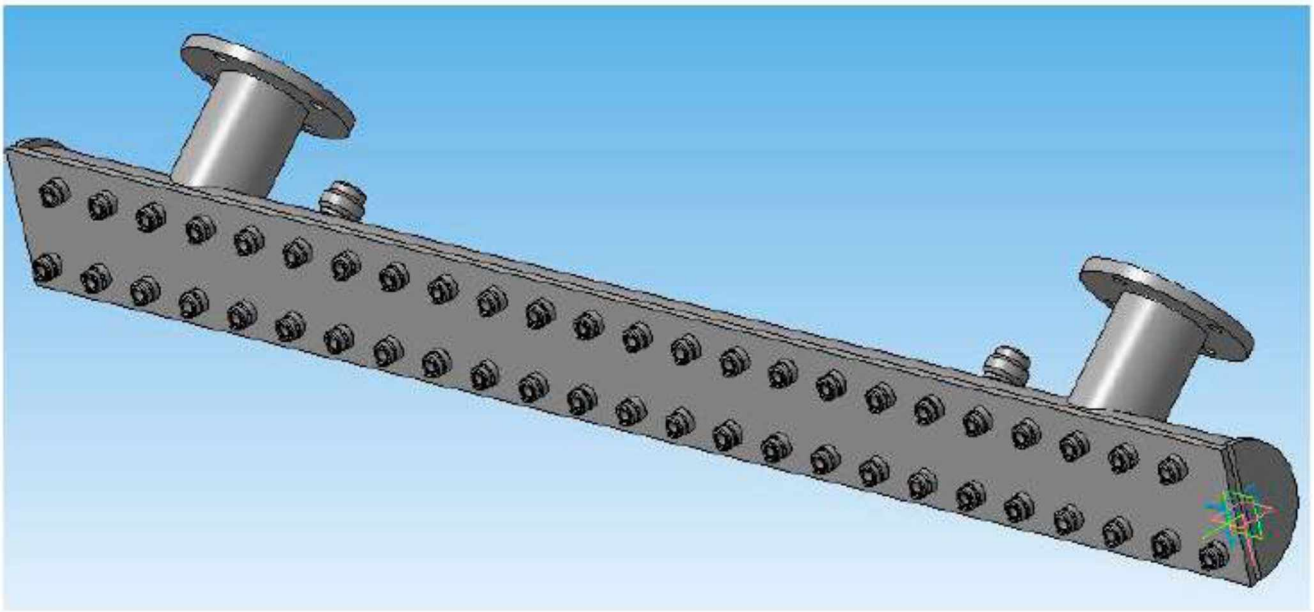


Рис. 3.4 – Загальний вигляд колектора нової конструкції для охолодження

робочих валків для безперервної чорнової групи клітей № 4-6

Рис. 3.5 – Вигляд колекторів вдосконаленої системи охолодження для безперервної чорнової групи клітей №4-6

Технічні характеристики колекторів нової конструкції наведені у табл. 3.7. На основі розроблених принципів удосконалення обладнання, спрямованих на зниження ресурсомісткості при виробництві листової продукції, та розроблених математичних моделях, визначено раціональне місце розташування колектора нової конструкції для верхніх та нижніх робочих валків безперервної чорнової групи клітей.

1. Чисельна реалізація була виконана за допомогою розробленого комплексу програмних продуктів для ЕОМ, що складаються із послідовно пов'язаних комп'ютерних програм.

За результатами проведених розрахунків для клітей №4-6 проведено зміну розташування колекторів охолодження для верхнього та нижнього робочого валка. Зокрема, розроблено та впроваджено такі технічні рішення:

– для шостої кліті: колектор нової конструкції зміщений вниз на 200 мм, у бік вісі прокатки на 70 мм; кут нахилу форсунок до вісі валка дорівнює 15°, колектора по відношенню до осі прокатки - 50°;

– для 4-ої та 5-ої кліті: колектор для охолодження верхнього робочого валка зміщений вниз від проектного положення на 400 мм і повернутий щодо вертикальної вісі валка на негативний кут 37°...43°; колектор для охолодження нижнього робочого валка від проектного положення повернутий на додатний кут

15...23°;

– запропоновано та апробовано параметри для налаштування колекторів охолодження для безперервної чорнової групи клітей.

Результати систематизовано та зведено до табл. 3.7. Розрахункову схему налаштування системи охолодження наведено на рис. 3.6. Результати передані на діюче виробництво.

Таблиця 3.7 – Характеристика системи охолодження безперервної чорнової групи клітей № 4-6

Тип колектора	Зварна напівтруба
Кількість колекторів, штук	5
Кількість форсунок в одному колекторі, штук	48
Тип форсунок	плоскофакельні
Виробник форсунок	Lechler
Кількість рядів форсунок на колекторі, штук	2
Кількість форсунок у ряду, штук	24
Кут напрямку охолоджуючого струменя до поверхні валка, градусів	
верхній	45
нижній	45
Робочий тиск води на вході в колектор, МПа	0,2-0,3
Тиск у магістральному трубопроводі, МПа	0,3-0,4
Робочий тиск на виході з форсунок, МПа	0,4
Витрата води через один колектор, $м^3$/год	150
Загальна витрата води, $м^3$/год.	500
Витрата води через одну форсунку при тиску 0,8 МПа, л/хв	50
Температура води, °С	+28…+42
Кут перекриття форсунок, град	15
Крок між форсунками, мм	80

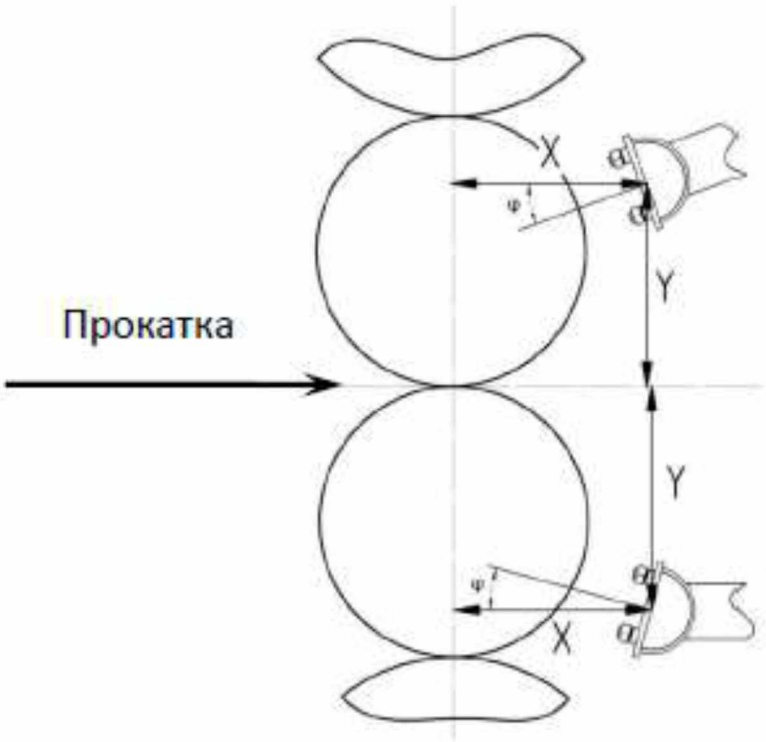


Рис. 3.6 – Розрахункова схема для налаштування системи охолодження робочих валків у безперервній чорновій групі клітей № 4-6

Таблиця 3.8 – Налаштування системи охолодження безперервної чорнової групи клітей №4-6

Положення робочих валків	Положення колектора			Тип колектора					Типи форсунок
	Щодо осі прокатки (координату X), мм	Щодо осі прокатки (координата Y), мм	Кут нахилу колектора по відношенню до осі прокатки (позитивний кут)	Кількість форсунок	Рядність	Кут перекриття, град	Крок між форсунками/рядами, мм	Витрата води через колектор, м³/год, при тиску охолоджувача не менше 08 МПа	
Безперервна чорнова група клітей									
Кліті № 4,5,6									
Верхній	Кл.4: 550 Кл.5: 500 Кл.6 500	Кл.4: 800 Кл.5: 700 Кл.5: 500	37...430	Верхній ряд 24 Нижній ряд 24	2	15	80/ 100	Кліть №4,5,6/ 850	Верхній ряд плоскофакельні, Lechler типорозмір. №554.954.30 Нижній ряд плоскофакельні, Lechler типорозмір №554.954.30

Оцінка ефективності від застосування колекторів нової конструкції проводилося експериментальним шляхом. Вимірювання температур робочих валків проводилося після їх вивалки за допомогою переносного безконтактного пірометра Time 213EL (точність виміру: +1% або +1°С). Розрахункове значення виміряних температур визначено з урахуванням спеціальної методики, що регламентує порядок виміру та визначення температури робочих валків [40].

З бази даних цехового обліку фіксувалася величина знімання робочого шару валків під час перешліфування. Загалом отримано дані після 5 монтажних партій. Як приклад, у таблиці 5.5 наведено результати вимірювань для клітин №4-6.

Таблиця 3.9 – Результати вимірювань температури та величини знімань робочих валків для безперервної чорнової групи клітей

№ п.п.	№ валка	Положення валка	Середнє знімання, мм	Середня температура по довжині бочки валка, °С
кліть №4				
1	132	верхній	1,26/0,7	56/48
	133	нижній	0,9/0,6	57/49
2	136	верхній	1,2/0,7	55/47
	137	нижній	0,6/0,5	53/45
3	141	верхній	0,6/0,5	55/47
	140	нижній	0,8/0, 5	56/48
4	142	верхній	0,7/0,5	56/48
	143	нижній	0,9/0,64	54/46
5	144	верхній	0,9/0,7	54/46
	145	нижній	0,6/0,5	62/54
Разом середнє значення			Зниження на 0,25 мм	Зниження на 8 °С
кліть №5				
1	160	верхній	0,8/0,7	62/52
	159	нижній	0,7/0,6	63/53
2	170	верхній	0,8/0,7	57/47
	171	нижній	0,6/0,5	52/48
3	157	верхній	0,6/0,5	6/50
	158	нижній	0,8/0,5	61/51
4	173	верхній	0,7/0,85	62/52
	172	нижній	0,8/0,65	59/49
5	156	верхній	0,8/0,7	58/48
	157	нижній	0,6/0,5	60/50
Разом середнє значення			Зниження на 0,2 мм	Зниження на10 °С

кліть №6				
1	121	верхній	0,92/0,6	81/70
	123	нижній	0,96/0,6	83/72
2	118	верхній	0,96/0,6	82/71
	119	нижній	1,02/0,7	80/69
3	101	верхній	1,02/0,7	79/68
	100	нижній	1,02/0,7	81/70
4	77	верхній	0,92/0,6	81/70
	78	нижній	0,92/0,6	83/72
5	75	верхній	1,02/0,7	82/71
	73	нижній	0,92/0,6	81/70
Разом середнє значення			Зниження на 0,32 мм	Зниження на 11 °С
Примітка: в чисельнику наведено значення роботи системи до реконструкції, у знаменнику після реконструкції				

Підсумкове (усереднене) значення зниження технологічних параметрів у безперервній чорновій групі клітей №4-6 наведено у табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати заходів щодо удосконалення обладнання системи охолодження робочих валків у безперервній чорновій групі клітей

Номер кліті	Температура до впровадження, °С	Температура після запровадження, °С	Середнє значення падіння температури, °С (%)	Середнє значення зменшення знімання, мм (%)
Чорнова група клітей				
4	53	45	8 (15)	0,25 (10,21)
5	60	50	10 (16)	0,24 (9,72)
6	81	70	11 (13)	0,32 (11,21)

Зниження температури робочих валків дозволило зменшити величину термічного зношування валків, що знизило величину знімання під час перешліфування, що призвело до збільшення ресурсу валків на 8…12%, що відповідає 8…12 експлуатаційним годинам. Отримані результати підтверджуються фактичними даними, за якими було здійснено розрахунок фактичного економічного ефекту від запровадження розроблених заходів. Економічний ефект розраховувався від величини «кількість переточувань валків», які склали до запровадження 103 штук/валок, після – 105 штук/валок.

Висновки до розділу

Розроблено принципи вдосконалення обладнання та технології ефективного охолодження для системи «робочий валок – смуга». Для досягнення максимального тепло знімання з поверхні робочих валків для системи «робочий валок – смуга» запропоновано спеціальну методику визначення оптимального розташування колекторів охолодження.

На основі регресійного аналізу отримано залежності, що дозволяють проводити налаштування колекторів систем охолодження робочих валків для безперервних чорнової та чистової груп клітей листових станів гарячої прокатки. Аналіз результатів досліджень показує, що для досягнення мінімальної температури робочих валків рекомендується вибирати приведені параметри.

Здійснено вдосконалення обладнання системи охолодження робочих валків у безперервній чорновій групі клітей. Розроблено та впроваджено нові конструкції колекторів охолодження робочих валків, визначено їхнє раціональне місце розташування.

Результати застосування дозволили знизити температуру робочих валків у безперервній чорновій групі клітей на 8…11°С (13…16%) за допомогою використання колекторів охолодження нової конструкції та застосування нового алгоритму для визначення раціонального розташування колекторів і об'єму охолоджувача, що подається.

В результаті налаштування та вдосконалення обладнання та режимів подачі охолоджувача зафіксовано зниження величини знімання валків при їх подальшому перешліфуванні для клітей №4-6 на 9,7…11,21%. В результаті досягнуто зниження ресурсоємності при виробництві листового прокату не менше 8...12 експлуатаційних годин.

Впровадження нових конструкцій колекторів охолодження робочих валків не виявили наявність зовнішніх дефектів на поверхнях валків (тріщин, термічних тріщин, поверхневих та внутрішніх ушкоджень, механічних ушкоджень, ушкоджень під час прокатування).

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Екологічна експертиза

Контроль параметрів листового прокату (у тому числі і за критерієм впливу на навколишнє середовище), прогнозування теплового стану робочих валків, а також керування та підтримання заданого теплового режиму експлуатації валків є функціями керування станом. Тепловий режим стану залежить від комплексу параметрів, які можна поділити на три групи:

1) постійні величини, що визначаються конструкцією та його системою охолодження (колекторів, форсунок, регулюючих органів);

2) управляючі впливу (зміна витрат і тисків у системі подачі та розподілу охолоджувача по довжині валків та по поверхні смуги);

3) вихідні параметри, що включають в себе температуру прокатується смуги та робочих валків.

У літературі та на практиці найбільша увага приділяється вивченню впливу на тепловий режим роботи прокатного стану надмірних факторів, що залежать від стану та властивостей підкату та режимів прокатки (обтискань, швидкостей, натягу, умов контактного тертя та зносу валків). Фактори, що залежать від стану та властивостей підкату, поділяють на три підгрупи: механічні властивості підкату, його різна товщина, температура та якість поверхні, механічні властивості прокату (залежать від роботи пластичної деформації та тепловиділення при прокатці).

Температура підкату відноситься до факторів вплив яких на тепловий режим стану найбільш значимий. При гарячій прокатці на широкосмугових станах було встановлено, що теплові деформації є суттєвим чинником, що знижує якість регулювання смуги.

Необхідність точного прогнозування для налаштування та керування тепловим режимом роботи листового прокатного стану потребувала розвитку методів розрахунку процесів теплообміну у системі «робочий валок-смуга» [41].

В основу запропонованих алгоритмів розрахунку теплового стану системи «робочий валок-смуга» закладаються умови отримання гарячекатаної смуги із заданими параметрами якості та виконання обмежень за температурою поверхні валків з урахуванням характеристик зношування.

При побудові та реалізації алгоритмічної структури необхідно побудувати та чисельно реалізувати математичну модель теплового стояння у системі «робочий валок-смуга», що дозволяє вирішити такі завдання:

Розрахунок поточного теплового стану робочих валків та смуги. Завдання вирішується на основі чисельно реалізованої математичної моделі нестаціонарного теплового режиму валків та смуги. Численні рішення дозволяють розрахувати температуру поверхні бочки валка в будь-якому вибраному місці, а також розподіл температури по глибині.

Визначення витрат охолоджувача для стабілізації заданого теплового профілю зводиться до вибору такого розподілу охолоджувальної рідини, за допомогою описаної вище математичної моделі, щоб розбіжності між розрахунковим (поточним) та заданим тепловим профілем постійно зменшувалися. При цьому вибір витрат охолоджуючої рідини здійснюють також з урахуванням обмежень температури валків і смуги.

Адаптація математичної моделі до умов діючого виробництва вирішується за допомогою визначення відповідності моделі реального теплового режиму валків. Для цього здійснюють запис температури валків за показаннями датчиків температури, встановлених на валках у шостій кліті. За сигналом, що визначає початок процесу адаптації моделі, порівнюють розрахункові та заміряні в процесі прокатки температури поверхні бочки валків, підбирають значення параметрів адаптації моделі таким чином, щоб середні відхилення розрахункової та вимірюваної температури були мінімальними.

4.2 Охорона праці

Як відомо, регулювання геометрії смуги залежить від вихідних параметрів і геометрії заготівлі (слябу або гуркоту), попередньої обробки та механічних властивостей прокату. Також немалу роль відіграє обладнання та місце його

розташування в лінії табору. При гарячому прокочуванні свої особливості вносить і розподіл температури. З метою забезпечення її рівномірного розподілу та, відповідно, механічних властивостей смуги як за довжиною, так і за шириною розроблено безліч пристроїв.

В.В. Частин у більшості своїх робіт, наприклад [33,34], порушує питання необхідності зменшення теплових втрат і регулювання охолодження при виробництві гарячекатаних смуг. Наводяться приклади технічної та економічної доцільності застосування різних способів та пристроїв. Наприклад, пропонується об'єднати весь виробничий ланцюжок в єдиний безперервний агрегат, але також розглядаються менш кардинальні заходи.

Одне з досить сміливих рішень щодо забезпечення збереження температури лінії стану гарячої прокатки запропоновано у роботі [35].

Захисне покриття на основі вогнетривких матеріалів (шамот, корунд, магнезит і т.д.), яке наноситься на поверхню слябу перед нагрівальними печами, а також після останньої кліті чорнової групи прокатного стану, покликане сприяти збереженню температури металу, що нагрівається в печах, при його видачі та при переміщенні по рольгангу. Цей спосіб збереження температури слябів пройшов дослідно-промислові випробування на Кулебакському металургійному заводі, але широкого застосування не отримав.

Питання забезпечення рівномірних властивостей по довжині прокату та різні способи їх забезпечення докладно описані у роботі [36]. Діяльність Ю.А. Мухіна [37] представлені результати застосування в ПАТ «НЛМК» (стан 2000 гарячого цеху і стан 2030 холодної прокатки) способу зворотного температурного клина. Суть методу полягає в прокатці в чистовій групі клітей з підвищеним прискоренням і використанням системи керованого охолодження. Таким чином, температура по довжині смуги перед змотуванням та механічні властивості готового прокату вирівнюються.

Використання аналогічного способу регулювання температури на стані 2000 ЧерМК порівняно з станом 2000 НЛМК описується у роботі [38]. Необхідно відзначити, що відхилення температури при використанні підвищеного прискорення та перерозподілу обтискань у чистовій групі клітей у деяких

випадках досягає 70 °С, але витримати необхідні уставки можливо тільки при використанні сучасних автоматизованих систем на базі ЕОМ.

При прокатці на НШСГП в умовах обмеженої довжини проміжного рольгангу відомий спосіб [39], що включає в себе прокатку заготівлі в чорновій групі клітей в розкочування, проміжну намотування розкочування з одночасним переміщенням рулону, що намотується в напрямку прокатки, обрізку переднього кінця розкату у чистовій групі клітей у смугу. За технічної можливості модернізації проміжного рольгангу давно відомий спосіб [40], так званий coil box.

По суті, це моталка, що забезпечує змотування підкату після чорнової групи клітей і подальшу розмотування розкочування для прокатки в чистовій групі. Даний спосіб вирівнювання температури дуже ефективний, але вимагає високої технічної культури обслуговування обладнання та можливий не на всіх видах продукції.

Найбільш поширений і простий спосіб забезпечення рівномірного розподілу температури в лінії стану гарячої прокатки на поточний момент є спосіб, що ґрунтується на установці екранів, що зберігають тепло, наприклад, [41]. Даний пристрій дозволяє навіть переорієнтувати прокатний стан під випуск продукції, на яку він спочатку не був розрахований, наприклад, випускати трубні марки сталей, що важко деформуються [42]. У межах використання цього устаткування В.М. Хлопонін у статті [43] розглянув ефективність використання активних, пасивних та псевдоактивних ТСУ (теплозберігаючих установок). Якщо про пасивні та активні способи екранування досить багато написано в літературі [44-47], то через малу поширеність про псевдоактивні ТСУ мало інформації. Основу всіх цих способів становить зменшення теплообміну підкату з навколишнім середовищем за рахунок зниження наведеного ступеня чорноти (всі види) або шляхом підвищення температури екранів (псевдоактивні) або ж пряма дія теплового потоку на поверхню прокату, що є особливістю активних ТСУ або ще їх називають тунельними печами . Крім використання класичних пальників та підігріву поверхні за рахунок згоряння палива відомий спосіб [48], в якому як джерело тепла для підігріву кромки розкочування використовуються щілинні індуктори. Безумовно, ефективність цих методів підтверджена роками

практичного використання, але існують ділянки лінії НШСГП, на яких неможливо або небезпечно встановлювати ТСУ.

Крім регулювання розподілу температури гуркоту по довжині та ширині в лінії стану гарячої прокатки, фахівцям прокатних цехів необхідні дані про справжню температуру прокату в конкретних точках лінії табору. Для прогнозування температури металу лінії використовуються безліч математичних моделей. Їхній огляд представлений у відомому довіднику [49]. Звичайно, більшість використовуваних формул побудовано на теоретичному аналізі, але також зустрічаються і статичні залежності. Навіть на даний момент питання точного прогнозування температури в лінії стану не втратило своєї актуальності. У роботі [50] автори провели аналіз більшості відомих моделей і на основі реальних даних, отриманих на ШСГП 2000 ВАТ «ММК», запропонували консолідовану модель розрахунку, за допомогою якої можна отримати дані про значення температури з точністю від 2,7% до 2, 3%, залежно від конкретних умов обробки.

Теоретичні дані про температуру все ж таки відрізняються від реальних, тому в лінії НШСГП встановлюються пірометри, тепловізійні сканери та камери. Огляд способів вимірювання температури у металургійних цехах з допомогою даних пристроїв було зроблено у роботі [51]. У частині прокатного виробництва пропонується оснастити стани гарячої прокатки установками контролю температури в 3-4 точках по ширині смуги або встановити тепловізійні сканери, що дозволить вести більш точне керування процесом прокатки та охолодження та забезпечить отримання рівномірної структури та властивостей за довжиною та шириною готового прокату. На даний момент вже існують працюючі в промислових умовах установки, що використовують ці принципи.

На стані 5000 ВАТ у 2007 році була встановлена система, що забезпечує контроль розподілу температури по поверхні листа до встановлення контрольованого охолодження (УКО) (рис. 4.1). Установка складається із 2-х лінійних тепловізійних камер, реалізованих на багатоелементних інфрачервоних фотоприймачах. Одна камера встановлюється безпосередньо за кліттю стану 5000 перед встановленням контрольованого охолодження, друга встановлюється

камера за УКО. Такі камери дозволяють отримувати паралельні вимірювання температури в реальному масштабі часу, що дає точне картографування виміряних значень для об'єктів, що рухаються з різною швидкістю.

Керуючий обчислювальний комплекс забезпечує прийом інформації з тепловізійних камер, обробку отриманої інформації та розрахунок температурного розподілу, узгодження зі швидкістю роботи та розрахунок картографічного температурного розподілу, ведення та перегляд баз даних. Програмне забезпечення забезпечує розрахунок максимальної, мінімальної та середньої температури аркуша, зіставлення температурного профілю з вимірами до УКО та після нього.

Таке рішення запропоновано авторами роботи [52]. На стані 2000 р. для визначення температури змотування смуги в рулон були встановлені два пірометри, один з яких пірометр спектрального відношення, призначений для вимірювання температури смуги в її середній частині та визначення коефіцієнта випромінювання, що слугує надалі для коригування значень, одержуваних від другий лінійно скануючої камери.

Використання сканера в даній системі дозволяє отримувати не тільки коректне значення температури, але реальний температурний профіль смуги. Залежно від наявного температурного профілю смуги відбувається коригування подачі води в наступній за системою вимірювання температури встановлення прискореного охолодження смуги.

Перед чистовою групою клітей стану гарячої прокатки 2000 р. ВАТ «ММК» проводилися дослідження зносу робочих валків і, як наслідок, зміни геометрії готового прокату [53]. Основну роль освіти локального зносу, як зазначається роботі, грало кількість смуг, що прокочуються в монтажній партії, але також немалий вплив мало нерівномірний розподіл температури по ширині і довжині смуги. Для зменшення утворення дефектів було запропоновано ряд технічних рішень, що стосуються зміни існуючої технології (чергування смуг вузький/широкий переходом по ширині і т.д.), зміни складу/характеристик обладнання (подача мастила в область формування дефектів тощо) та рішень, що вимагають великих капітальних витрат (осьове зрушення тощо). Висунуті

пропозиції рекомендовані для впровадження на стані 2000 НП ВАТ «ММК».

Заслуговує на увагу робота з дослідження температурних полів гуркотів товстолистового прокату, проведена на стані 5000 ВАТ «ММК» [54]. Метою дослідження було виявлення «еталонних» температурних полів, у яких показники площинності найякісніші, і є можливість прогнозування неплощинности розкочування ще лінії прокатки шляхом зіставлення його температурного поля з «эталонным». Автори використали безконтактний пірометр фірми LANDSCAN. За результатами вимірювань було виявлено, що хвилястість кромок прокату товстолистового є наслідком температурного градієнта на кромках розкочування. Було запропоновано низку технологічних рішень, які, на думку авторів, призведуть до досягнення поставленої мети. Дослідження проводилося на товстолистовому прокаті та результати застосовні лише на стані 5000 ВАТ «ММК» у зв'язку з особливостями виробництва.

4.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

Для розрахунку техніко-економічної оцінки приймаємо системи «опорний валок – робочий валок – смуга», яка встановлена на машинобудівному заводі ОАО «Полтавахіммаш».

Загальний річний економічний ефект визначається за формулою [46]:

$$Э = Б\left[C_1(T_2/T_1) - C_2\right], \qquad (4.1)$$

де B – річна потреба переробних підприємствах, B=110 шт;

C_1 – фактична собівартість пристрою, C_1=2020 грн;

C_2 – фактична собівартість купованих пристроїв, C_2 =2160 грн;

T_1 – термін служби опор ковзання для апаратів, T_1= 950 годин;

T_2 – термін служби опор ковзання для апаратів, на яких встановлені удосконалені пристрої з шліфованими шийками валів, T_2 =1250 годин.

Після підстановки числових значень маємо:

$$Э = 109\left[2010(1200/900) - 2150\right] = 57770 \text{ грн.}$$

Річна економія складає

$$Э_г = Э - E_н к \ , \qquad (4.2)$$

де $E_н$ – нормативний коефіцієнт капітальних витрат, $E_н$=0,333;

$к$ – капітальні витрати заводу ОАО «Полтавахіммаш» на розробку, виготовлення і монтаж токарно-гвинторізного верстата для механічної обробки шийок валів емальованих пристроїв $к = 82500$ грн.

Тоді

$$Э_г = 57770 - 0,33 \cdot 82000 = 30710 \text{ грн.}$$

Термін окупності капіталовкладень становить

$$T_{ок} = \frac{к}{Э_г} = \frac{82000}{30710} = 2,7 \text{ року.} \qquad (4.3)$$

Приведений розрахунок не враховує економію від випуску ємнісними апаратами продуктів, що переробляються, за рахунок зменшення часу простоїв.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Для системи «опорний валок – робочий валок – смуга» на основі проведених досліджень запропоновано та розроблено методологію вдосконалення технології та обладнання для змащування робочих валків листових станів гарячої прокатки. Для технології листової гарячої прокатки з урахуванням розробленої методології, запропоновано показники ефективності E_i, на основі яких розроблено та впроваджено ефективні режими подачі мастильного матеріалу.

Здійснено вдосконалення технологічного обладнання системи охолодження робочих валків для безперервної чотиривалкової чорнової та чистової груп клітей за рахунок застосування нового алгоритму для визначення раціонального розташування колекторів та розробки рекомендацій щодо обсягу охолоджувача. Фактичний ефект від впроваджених технічних та технологічних рішень щодо налаштування системи охолодження робочих валків виражається у додатковому збільшенні їх терміну служби на 8…12% (8…12 експлуатаційних годин), які були досягнуті:

– для чорнової групи клітей: зроблено розробку та впровадження нового обладнання (колектора охолодження), що дозволило досягти зниження середньої температури робочих валків на 10…11°С, що становить 13…16%;

– для чистової групи клітей: здійснено налаштування системи охолодження, визначено раціональні параметри розташування колекторів і кількість охолоджувача, що подається. Впровадження результатів дозволило досягти зниження середньої температури валків на 6...10°С, що становить 7...11%.