Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

рівень вищої освіти ___перший бакалаврський рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему «Дослідження умов експлуатації обвідних роликів станів холодної прокатки 1200 і 1680 в залежності від профілю твірної бочки»____

Виконав: студент ___4__курсу, групи 6.*1363 ОМТ-С*

__Черваков В.В._____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

спеціалізація

_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

Обробка металів тиском _____
(шифр і назва)

Керівник Явтущенко А.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Воденнікова О.С._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2026 року

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *перший бакалаврський рівень*

другий (магістерський) рівень

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *обробка металів тиском*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Белоконь
"23" 12 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

Черваков Володимир Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження умов експлуатації обвідних роликів станів холодної прокатки 1200 і 1680 в залежності від профілю твірної бочки

Керівник роботи (проєкту) *Явтушенко Анна Володимирівна* к.т.н. *доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" 12 2025року № 1831-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) 15.*06.2026*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Вдосконалення технології порошкової сталі*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Загальна частина. Дослідницька частина. Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал 12 слайдах (на 12 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, да... завдання ...ийняв
Розділ 1 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 2 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 3 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 4 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Затвердив	*Белоконь Ю.О. завідувач кафедри*	

7. Дата видачі завдання 10.06.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Пр...
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Розділ 1*		
4	*Розділ 2*		
5	*Розділ 3*		
6	*Розділ 4*		
7	*Висновки*		

Студент _____ В.В. Черваков
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ А.В. Явтушен
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврській роботи містить 102 сторінок, 31 рисунків, 7 таблиць, 42 літературних джерела.

Тема роботи: Дослідження умов експлуатації обвідних роликів станів холодної прокатування в залежності від профілю твірної бочки.

У бакалаврській роботі дано опис ЦХП, стисло описана технологія виробництва тонколистової сталі, розглянуто основні технічні характеристики обладнання реверсивного стана 1680, досліджено основні типи профілювання валків, які дозволяють значно поліпшити планшетність штаб в процесі прокатування шляхом зменшення різниці коефіцієнтів витяжки $\delta\mu/\mu$ по ширині штаби. Запропоновані деякі рекомендації щодо використання тих чи інших твірних валків в залежності від поперечного профілю гарячекатаного підкату при процесі прокатування штаби на станах холодної прокатки. Також наведено опис існуючих технічних рішень для усунення нерівномірності поздовжніх розтягуючи напружень по ширині штаби при її прокатуванні на безперервних та реверсивних станах холодної прокатки.

Виконано розрахунок режиму деформації та енергосилових параметрів при прокатуванні штаби 0,6 · 1030 мм, сталь – 08пс.

Рекомендується встановлювати направляючі обвідні ролики з випуклим профілем твірної в лінії станів холодної прокатування за останньою кліттю стана перед моталками, що зменшить нерівномірність поздовжніх розтягуючих напруг та поліпшить змотування штаби в рулон, покращить якість поперечного перетину штаби і процес її змотування.

Ключові слова - холодна прокатка, обтиск, валки, обвідні ролики, штаба, моталка, деформація, поздовжні напруження, прокатний стан.

ЗМІСТ

Вступ		7
1	Аналітично-пошукова частина	9
1.1	Стан проблеми	9
1.2	Основні проблеми стабілізації геометричних параметрів тонколистового прокату	13
1.3	Пристрої для регулювання натягнення та форми штаби при прокатуванні	19
1.4	Поздовжні напруження у штабі при випуклому натяжному (обвідному) ролику	29
2	Дослідницько-розрахункова частина	34
2.1	Поліпшення площинності холоднокатаної листової сталі	34
2.2	Загальна характеристика цеху	40
2.3	Технологія виробництва тонколистової сталі	43
3. Розрахункова частина		54
3.1	Технологічний процес прокатки на реверсивному стані 1680	54
3.2	Коротка технічна характеристика обладнання реверсивного стана 1680	57
3.3	Вимірювальне обладнання	59

3.4 Розрахунок режиму прокатки та енергосилових параметрів 72

4. Охорона праці та техногенна безпека 83

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів цеху холодної прокатки під час проведення досліджень 85

4.2 Розроблення заходів щодо захисту працівників від дії небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища цеху холодної прокатки.

4.3 Заходи з електробезпеки 86

4.4 Заходи з пожежної та техногенної безпеки 87

4.5 Розрахунок теплоізоляції поста керування 89

ВИСНОВКИ 96

Перелік літературних джерел 98

ВСТУП

Найважливішою галуззю промисловості країни є чорна металургія. Незважаючи на розвиток виробництва нових матеріалів, наприклад, пластмас, чорні метали зберігають роль основного конструкційного матеріалу.

Прокатне виробництво є кінцевою стадією всього металургійного циклу. Через прокатні цехи проходить близько 90-95% всього виплавленого металу. Прокатна продукція застосовується практично у всіх галузях промисловості країни у вигляді готових виробів, або у вигляді заготовок для подальшого переділу.

В даний час до продукції широкоштабових станів холодної прокатки висуваються жорсткі вимоги, пов'язані з необхідністю підвищення її конкурентоспроможності на світовому ринку, потреби якого в останнє десятиліття істотно змінилися.

Основним критерієм, що визначає конкурентоспроможність продукції, є якість, яка забезпечується за рахунок мінімізації різнотовщинності і не площинності штаби.

Якість профілю штаби (різнотовщинність і площинність) формується головним чином під час гарячої прокатки. Холодна прокатка мало змінює відносну величину поперечної різнотовщинності, але робить істотний вплив на площинність штаби, і в цьому питанні важлива роль належить раціональній вихідній профілювання валкового вузла [1].

Істотний вплив на показники прокатки штабимає натягнення. Воно виконує роль стабілізуючого чинника, що сприяє вирівнюванню витяжок по ширині штаби. Питоменатягнення (на 1 мм ширини)

розподіляється по ширині нерівномірно: воно більше на тих ділянках, які мають меншу витяжку. З літератури [2] відомо, що навіть за відсутності натягнення при ідеально рівному обтисненні по ширині, швидкість течії металу в осередку деформації по ширині штаби розподіляється нерівномірно. При нерівномірній деформації по ширині, нерівномірність швидкостей течії посилюється. На тій ділянці штаби, на якій висотна деформація з якихось причин зменшується, тобто висота щілини збільшується, витяжка знижується. При натягненні цієї ділянки штаба отримує додаткове розтягнення.Середнє нормальне контактне напруження (СНКН) знижується, пружне сплющування валків зменшується, профіль штаби і контактний тиск по ширині штаби вирівнюються.

1.АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ

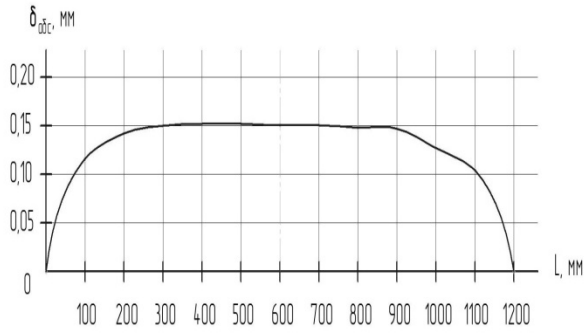
1.1 Аналіз сучасного стану досліджуваної проблематики

У процесі холодної прокатки на безперервних і реверсивних станах на формування площинності штаби впливає значна кількість змінних технологічних факторів. Результати досліджень [3] свідчать про те, що розподіл питомих розтягувальних напружень по ширині штаби може бути суттєво нерівномірним. Підтвердженням цього є результати вимірювання зношування поверхні обвідних (направляючих) роликів реверсивних станів 1200 та 1680 цеху холодної прокатки ЦХП, наведені на рисунку 1.

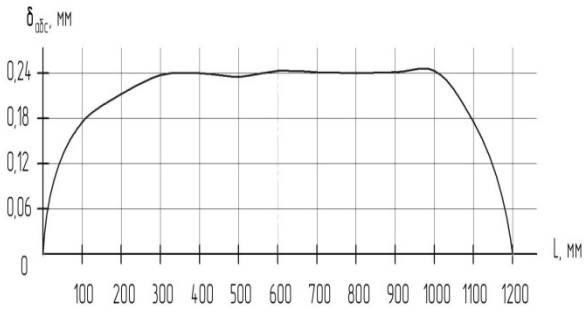
Одним із ефективних способів впливу на такі важливі характеристики прокату, як поперечний профіль і планшетність, є регулювання розподілу питомого натягу по ширині штаби. Для контролю цих параметрів застосовуються контактні роликові тензометри, які забезпечують достатньо точне вимірювання натягів у різних зонах штаби. Разом із тим технічні засоби, що дозволяли б безпосередньо керувати питомими натягненнями під час прокатування, на сьогодні відсутні.

Зміна питомого натягу можлива лише опосередковано - шляхом регулювання загального натягнення штаби та використання систем противигину валків. Коригування теплового профілю валків характеризується значною інерційністю, тому його застосування доцільне переважно під час прокатування дуже тонких штаб. Необхідно також враховувати, що вплив натягнення на площинність має певні допустимі межі. Недостатній рівень натягу може спричинити зростання коробоватості штаби, тоді як його надмірне збільшення підвищує ризик утворення хвилястості на крайках [4].

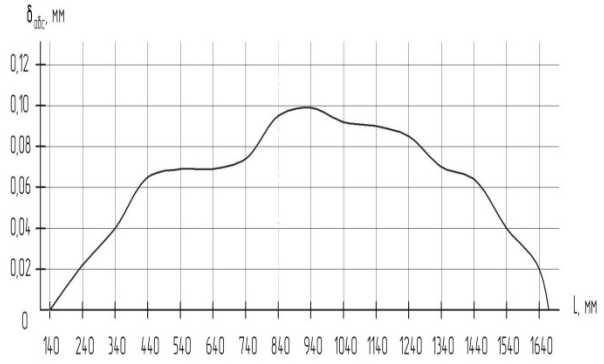
абсолютне зношування



а

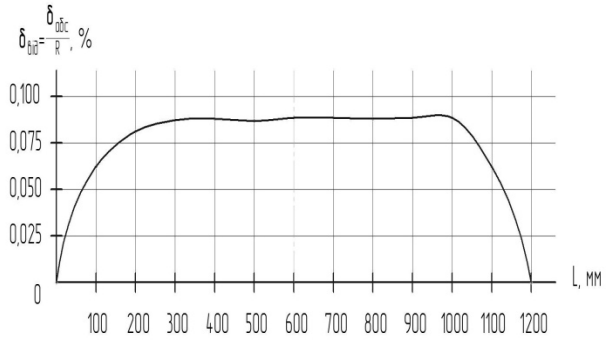


б

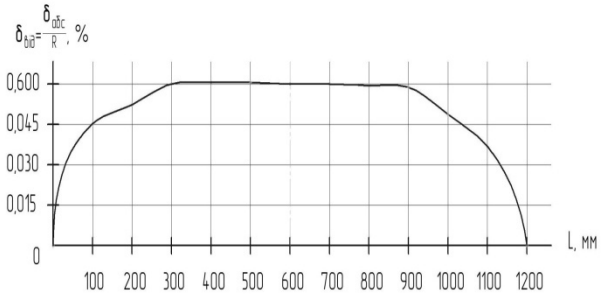


в

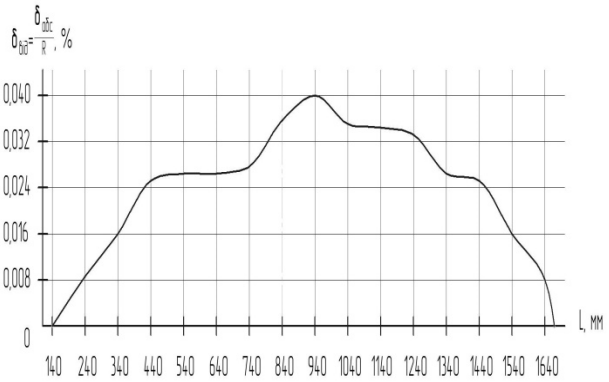
відносне зношування



г



д



е

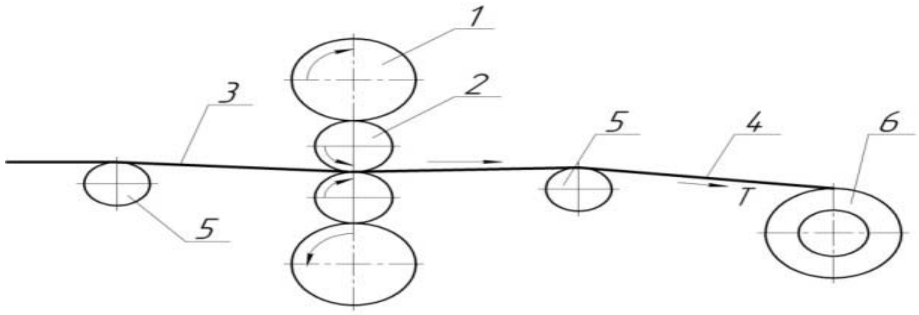
Рисунок 1 - діаграма абсолютного (а, б, в) та відносного (г, д, е) зношування поверхні обвідних (направляючих) роликів реверсивних станів 1200 та 1680

а – ролик (1200) знаходиться на складі; б - ролик (1200) знаходиться в експлуатації; в – ролик(1680) знаходиться на складі; г – ролик (1200) знаходиться на складі; д - ролик (1200) знаходиться в експлуатації; е – ролик (1680) знаходиться на складі;

Аналіз наведених діаграм показує, що для реверсивного стана 1200 характерне більш рівномірне зношування поверхні роликів. Це пояснюється відносною стабільністю ширини прокатуваних штаб. Для стана 1680 характерний значно ширший сортамент продукції, що призводить до локалізації зон контакту та, відповідно, до більш нерівномірного зношування поверхні обвідних роликів.

На сучасних станах холодної прокатки після чистової кліті перед моталками зазвичай встановлюються гладкі обвідні ролики з циліндричним профілем бочки (рисунок 2). Після виходу з валків штаба огинає обвідний ролик і надходить на моталку для змотування в рулон. Як правило, в ролі обвідних елементів використовуються тензометричні ролики (стресометри), які дають можливість контролювати розподіл розтягувальних напружень по ширині штаби та підтверджують його нерівномірний характер.

Практичні спостереження свідчать, що розподіл натягнення по ширині штаби наближається до параболічного закону, причому максимальні значення припадають на крайові ділянки. У результаті під час змотування рулону крайні витки притискаються один до одного з більшою силою. Це призводить до виникнення підвищеного міжвиткового тиску, який у процесі відпалу може викликати злипання або локальне зварювання витків. Наслідком такого явища стає утворення дефекту типу «злам», який досить часто спостерігається після дресирування холоднокатаного прокату.



1 - опорні валки; 2 – робочі валки; 3,4 – штаба; 5 – обвідний ролик з регулярним рельєфом поверхні; 6 – моталка

Рисунок 2 – Схема розташування робочої кліті і обвідних роликів

Для зниження ймовірності виникнення дефекту «злам» необхідно забезпечити максимально рівномірний розподіл поздовжніх розтягувальних напружень по всій ширині штаби в процесі її змотування.

Експериментальні дослідження показують, що під час роботи моталки середній рівень натягу в штабі зазвичай не перевищує $\sigma_н \approx 40$ Н/мм². За наявності нерівномірних витяжок по ширині поздовжні напруження на крайках рулону можуть значно перевищувати відповідні значення в його центральній частині [1, 5]. Унаслідок цього крайові ділянки рулону ущільнюються сильніше, що спричиняє підвищення міжвиткового тиску, погіршення умов термічної обробки та виникнення злипання витків.

У зв'язку з цим актуальним завданням є пошук та впровадження технічних рішень, спрямованих на вирівнювання поздовжніх розтягувальних напружень по ширині штаби під час її прокатування на станах холодної прокатки. У подальшому розглянуто основні підходи до вирішення зазначеної проблеми.

1.2 Особливості забезпечення стабільності геометричних характеристик тонколистового прокату

Відповідно до вимог вітчизняних і міжнародних стандартів, основними показниками якості тонколистового прокату є точність товщини та відповідність геометричної форми листів і штаб установленим нормам. Саме ці характеристики значною мірою визначають придатність продукції до подальшого використання та її конкурентоспроможність на ринку.

У процесі холодної прокатки можуть виникати різноманітні дефекти поверхні та форми прокату. Частина з них успадковується від гарячекатаного підкату, зокрема залишки окалини, поверхневі тріщини, надриви та інші пошкодження. Разом із тим безпосередньо під час холодної прокатки формуються нові дефекти, причини появи яких пов'язані з особливостями технологічного процесу та технічним станом обладнання.

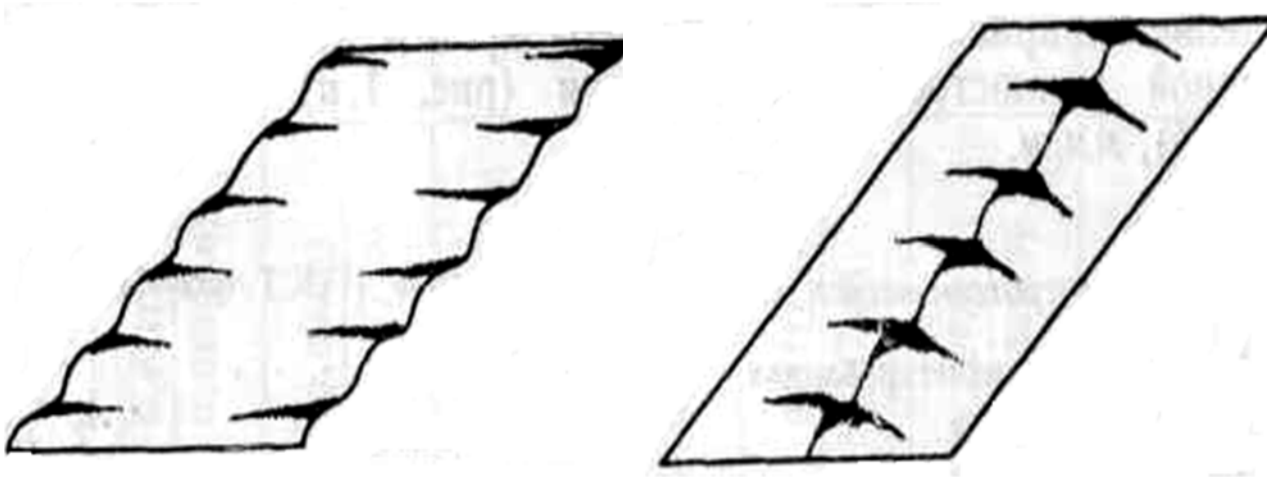
До найбільш поширених дефектів належать коробоватість, хвилястість крайок, серповидність, завороти крайок, поздовжня та поперечна різнотовщинність, відбитки, подряпини, ризики, забруднення поверхні, а також дефекти типу «злам». Їх виникнення обумовлюється нерівномірністю обтиснення по ширині штаби, неправильним налаштуванням прокатного обладнання, зношенням валків, порушенням режимів прокатування, недостатнім або надмірним натягненням металу та іншими виробничими чинниками.

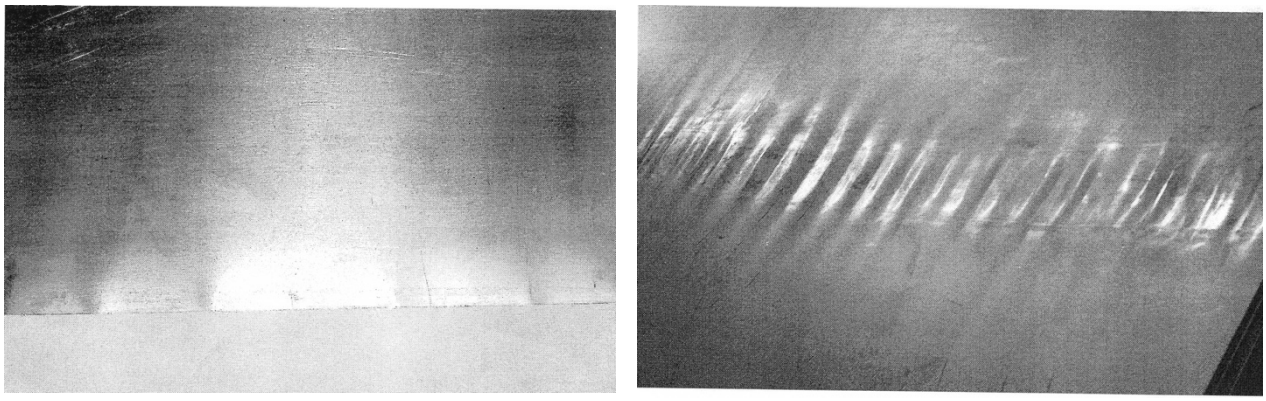
Згідно з актами технічного контролю, складеними в цеху холодної прокатки ЦХП, останнім часом на прокатних і дресирувальних станах найчастіше фіксуються дефекти хвилястості крайок і локальної нерівномірності форми штаби, що наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Дефекти на станах ЦХП

Дата складання акта	Марка сталі	Розмір, мм	Дефект
20.10.2016р.	08нс	0,7х1280	Крайова хвиля (з приводного боку) до 30 мм
20.10.2016р.	08нс	1,0х1280	Крайова хвиля (з приводного боку) до 30 мм
21.10.2016р.	08кп	1,5х1265	Місцева одностороння хвилястість (20-30 мм)
24.10.2016р.	08нс	0,7х1280	Одностороння хвилястість (до 25 мм)
24.10.2016р.	08нс	0,7х1250	Одностороння хвилястість (до 25 мм)

Форма тонколистового прокату оцінюється за показниками серповидності, хвилястості та коробоватості відповідно до вимог ГОСТ 26877-91. Приклади характерних дефектів форми наведені на рисунку 3.





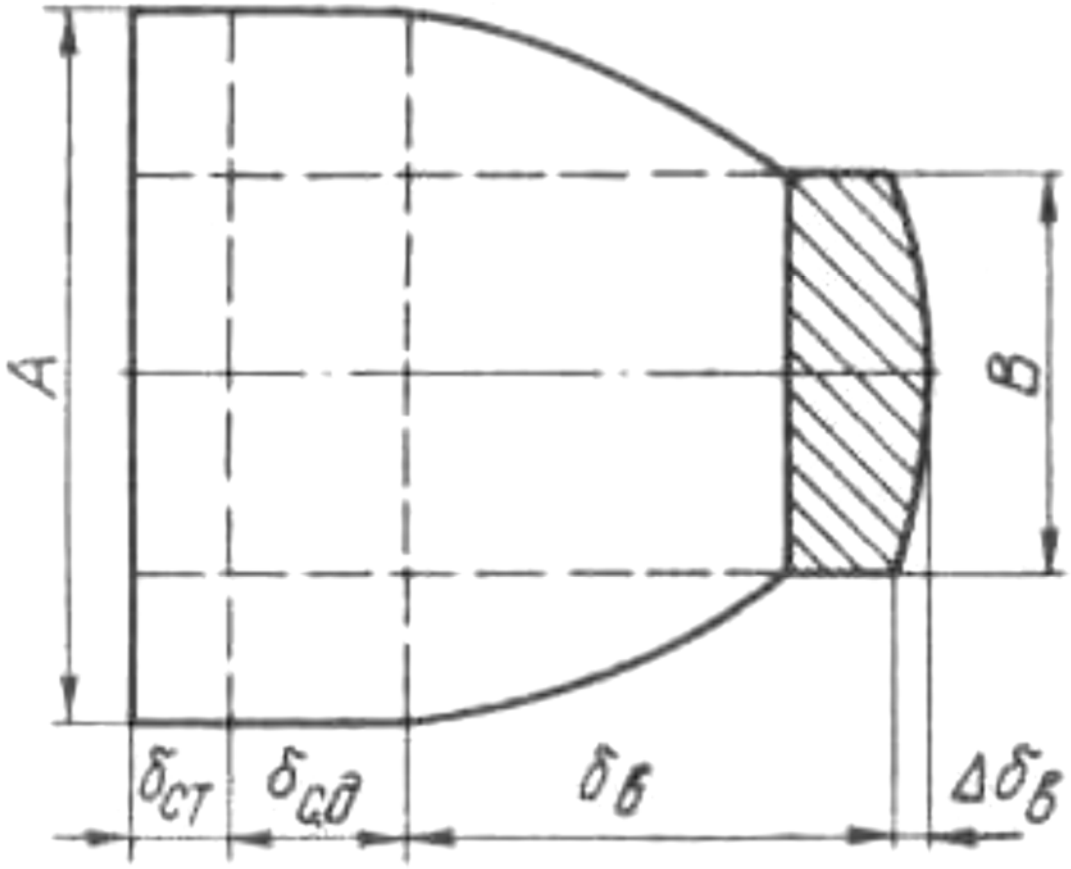
а б

Рисунок 3 – Хвилястість (а) і коробоватість (б) прокатаної штаби

Основною причиною відхилень геометричних параметрів від заданих значень є нестабільність умов деформації металу як по довжині, так і по ширині штаби. Для отримання якісного прокату необхідно забезпечити максимально рівномірний розподіл витяжки на всіх стадіях виробничого циклу — від виготовлення сляба до отримання готової холоднокатаної продукції.

На якість форми штаби впливають не лише параметри прокатування, але й подальші технологічні операції, зокрема дресирування, цинкування, лудіння, а також поздовжнє та поперечне різання. Особливо це стосується агрегатів, у яких здійснюється повторне змотування рулонів, оскільки в таких умовах можливе виникнення локальних пластичних деформацій, нерівномірно розподілених по ширині штаби.

Коливання товщини прокату в поздовжньому та поперечному напрямках безпосередньо пов'язані зі змінами середнього нормального контактного напруження металу на валки. Зміна цього параметра призводить до коливань пружних деформацій елементів робочої кліті та, відповідно, до зміни міжвалкового зазору. Загальна пружна деформація системи формується внаслідок деформації станини, з'єднувальних елементів і самих валків, представлена на рисунку 4.



A – відстань між опорами подушок валків; B – ширина листа;

$\delta_{ст}$, $\delta_{сд}$,$\delta_{в}$ – деформація станини, з’єднувальних деталей і валків

Рисунок 4 – Схема складових пружної деформації робочої кліті

Поздовжня різнотовщинність визначається сумарною пружною деформацією конструктивних елементів кліті та тією складовою деформації валків, яка залишається сталою по ширині штаби. Водночас поперечна різнотовщинність залежить від нерівномірного розподілу пружних деформацій уздовж бочки валка.

На профіль і форму штаби впливають як швидкодіючі, так і повільнозмінні фактори. До останніх належать початковий профіль валків, їх зношування та тепловий стан. Залежно від можливості впливу на них усі фактори поділяються на керовані та некеровані. Керованими вважаються

параметри, які можуть регулюватися безпосередньо під час прокатування, тоді як некеровані змінюються незалежно від дій оператора.

Нестабільність некерованих факторів або неправильне налаштування обладнання призводять до появи дефектів профілю, різнотовщинності та порушення форми прокату. Такі відхилення суттєво ускладнюють подальшу обробку металу. Наприклад, хвилястість і коробоватість негативно впливають на процес штампування, спричиняючи утворення зморшок та інших дефектів готових виробів. Серповидність штаби ускладнює змотування рулонів, формування труб і гнутих профілів, а також погіршує умови транспортування матеріалу.

Нерівномірність витяжки по ширині є також однією з причин аварійних зупинок прокатних та обробних агрегатів, що призводить до зниження продуктивності виробництва. Тому забезпечення стабільної геометрії тонколистового прокату є одним із ключових завдань сучасного прокатного виробництва.

Основними напрямами усунення геометричних дефектів є стабілізація параметрів підкату, підвищення жорсткості системи «кліть–валки», удосконалення профілювання валків та впровадження сучасних автоматизованих систем керування процесом прокатки. Значна увага приділяється системам автоматичного регулювання товщини, швидкості та натягнення штаби, які дозволяють зменшити поздовжню різнотовщинність і покращити показники площинності готової продукції.

Одним із природних механізмів вирівнювання форми штаби є саморегулювання деформації під дією натягнення. При виникненні нерівномірності витяжки по ширині збільшується питоме натягнення на окремих ділянках, що сприяє їх додатковому видовженню та частковому вирівнюванню деформації по всій ширині прокату.

У подальших підрозділах буде розглянуто сучасні методи автоматичного керування процесом холодної прокатки, а також

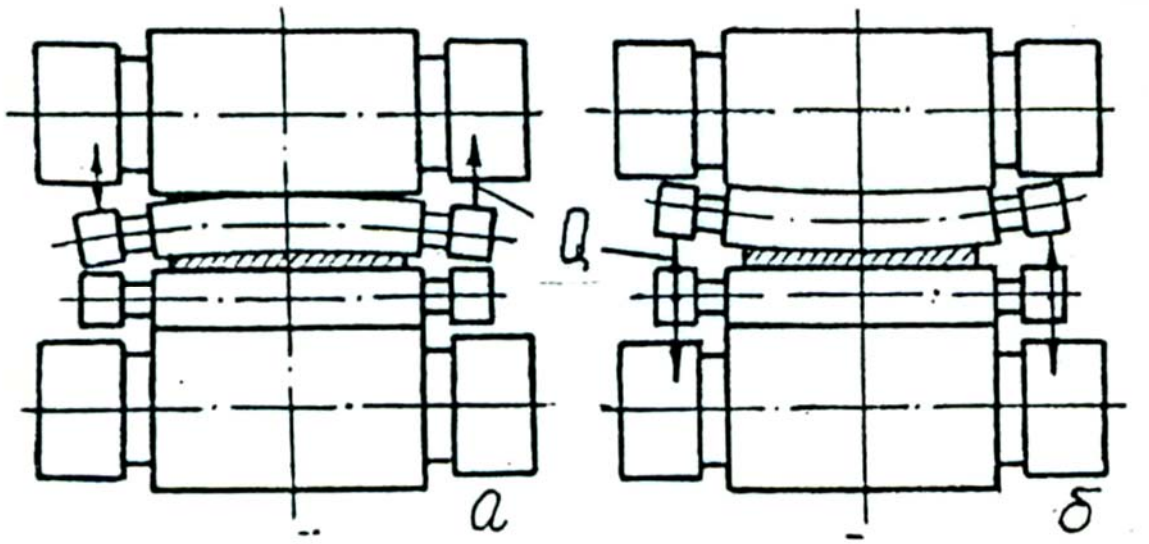
конструктивні рішення, спрямовані на підвищення стабільності геометричних параметрів тонколистового прокату.

1.3 Технічні засоби регулювання натягу та формування профілю штаби в процесі прокатки

Одним із найпоширеніших способів керування поперечним профілем штаби є раціональне профілювання бочок робочих та опорних валків. Правильно підібрана форма валків дозволяє змінювати міжвалковий зазор і забезпечувати необхідні геометричні параметри прокат.

Частково функції профілювання можуть виконувати багатосекційні системи охолодження робочих валків. Зміна подачі мастильно-охолоджувальної рідини на окремі ділянки поверхні валка дає можливість коригувати його тепловий профіль. Проте цей спосіб характеризується значною інерційністю, оскільки помітний ефект проявляється лише через 20–30 хвилин після зміни режиму охолодження [1].

Для оперативного регулювання міжвалкового зазору на сучасних станах широко використовують гідравлічні системи вигину робочих валків (рисунок 5). Їх дія полягає у створенні додаткових сил, які змінюють прогин валків і забезпечують коригування розподілу обтиснення по ширині штаби.



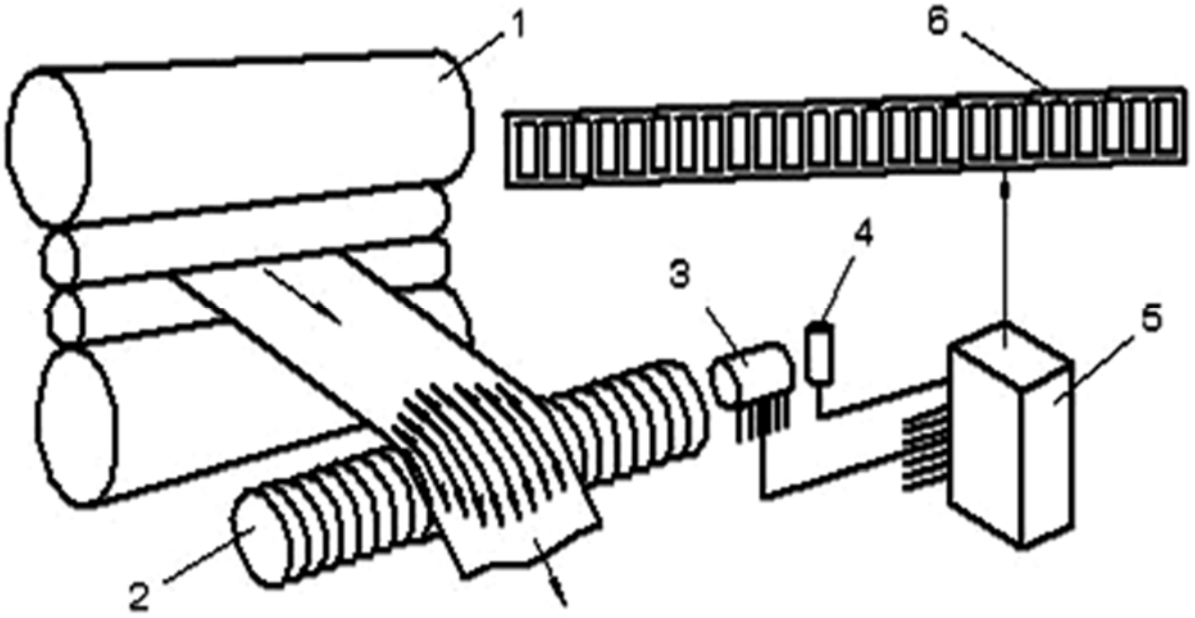
а – додатковий вигин; б – противигин

(Q – сила на торцях плунжерів гідроциліндрів)

Рисунок 5 – Схема дії гідравлічногообладнання на робочі валки

Додатковий вигин застосовують для зменшення коробоватості та зниження розтягувальних напружень на крайках штаби. Противигин, навпаки, сприяє усуненню хвилястості крайок шляхом зміни розподілу коефіцієнтів витяжки по ширині прокату.

Контроль форми штаби здійснюється за допомогою стресометрів, які дозволяють визначати розподіл поздовжніх розтягувальних напружень по ширині прокату (рисунок 6).



1 - прокатна кліть; 2 - ролик-стресометр; 3 - струмороз'ємний пристрій; 4,5 - електронний перетворювач; 6 – табло

Рисунок 6 – Схема механічного стресометра

Під час холодної прокатки на безперервних і реверсивних станах спостерігається нерівномірний розподіл поздовжніх напружень. Як показано на рисунку 7, максимальні значення напружень зазвичай виникають на крайках штаби, тоді як у центральній частині вони є нижчими. Різниця між крайовими та центральними зонами може досягати 100–160 Н/мм².

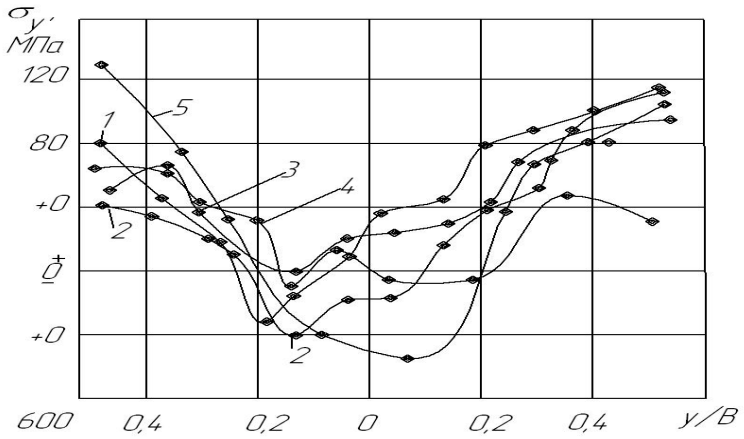


Рисунок 7 – Розподіл поздовжніх напружень в штабі при прокатуванні на реверсивному стані 1680 (1-4) і за кліттю 4 безперервного стану (5).

Нерівномірність розподілу натягнення впливає на контактний тиск у зоні деформації, пружне сплющування валків, коефіцієнти витяжки та кінцеву форму штаби. Для зниження цього негативного впливу поряд із системами противигину застосовують профільовані направляючі ролики.

Дослідження показали, що встановлення роликів із випуклим профілем твірної поблизу осередку деформації дозволяє створювати додаткове поле поздовжніх напружень, яке компенсує їх початкову нерівномірність по ширині штаби. Особливо ефективними виявилися ролики з випуклістю від 3 до 10 мм.

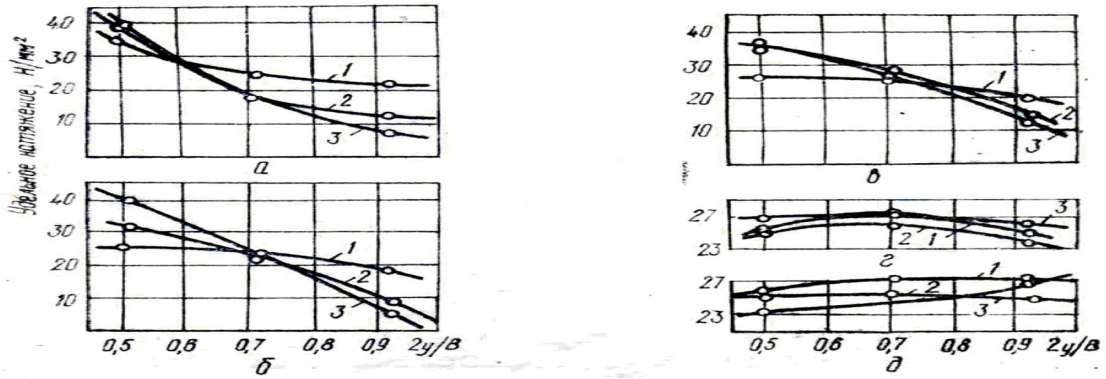


Рисунок 8 – Розподіл питомих поздовжніх напружень в штабі приL_d/B = 0,278 (а), 0,39 (б), 0,56 (в) 1,11 (г), 2 (д) і діаметральної випуклості ролика, мм ($2f_{\text{н.р.}}$): 1-0,5; 2-1,2; 3-3,0

Експериментально встановлено, що збільшення випуклості ролика сприяє вирівнюванню розтягувальних напружень по ширині штаби та зменшує нерівномірність витяжки. Крім того, застосування таких роликів дозволяє коригувати параметр δμ/μ, який характеризує різницю витяжок між центральною та крайовими зонами штаби.

Для оцінки взаємозв'язку між нерівномірністю витяжки та розподілом поздовжніх напружень використовують залежність:

$$\delta\sigma_H = aE\frac{\Delta\mu}{\mu}\left[16\left(\frac{2y}{B}-\frac{1}{2}\right)^4-\frac{1}{5}\right], \qquad (1)$$

де $\delta\sigma_H$ – різниця натягнення по ширині штаби між серединою і кромкою штаби;E – модуль пружності матеріалу штаби; B – ширина штаби (y = 0…B/2);a – коефіцієнт вирівнювання напружень (a = 1,2).

Розрахунки показують, що зі збільшенням нерівномірності витяжки зростає різниця поздовжніх напружень, що призводить до появи хвилястості або коробоватості прокату.

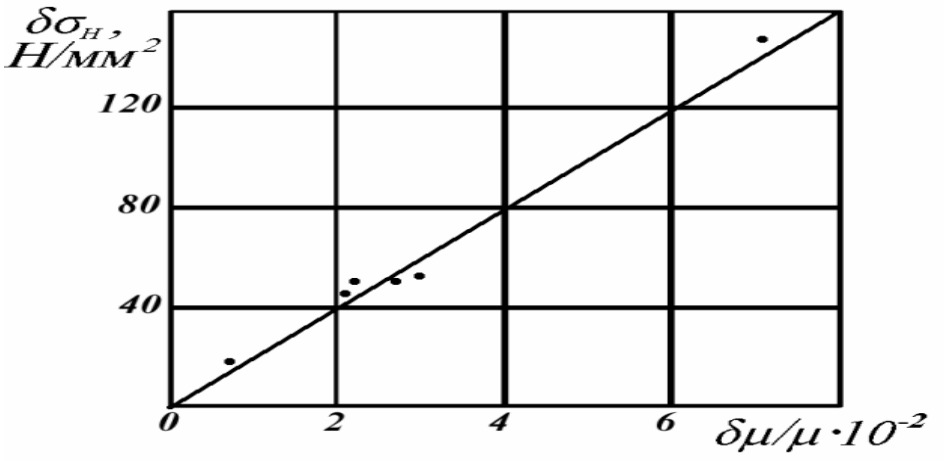


Рисунок 9 – Вплив відносної різниці коефіцієнтів витяжок по ширині штаби на нерівномірність розподілу поздовжніх розтягуючих напружень(штаба товщиною h = 0,8 ... 2,0 мм і шириною B = 1000 - 1420 мм, стан 1700)

Для визначення параметрів профільованих направляючих роликів використовують залежність:

$$\delta\sigma_{\text{Н}} = \text{aE}\frac{\text{E}\cdot S}{A_K^2}\left[1 + \frac{R_p}{S} - \frac{f_{HP}}{S}\right], \quad (2)$$

де S – відстань між твірною ролика та лінією прокатки; A_K – відстань між осями валків і ролика; f_{HP} –величина випуклості ролика; R_P – радіус ролика; Lp – довжина ролика; $2b_y$ – відстань від осі штаби до розглянутого поздовжнього перерізу.

Після перетворення рівняння необхідна величина випуклості ролика визначається за формулою:

$$f_{HP} = \frac{\delta\sigma_H \cdot A_K^2}{aE\cdot(S+R_P)}, \quad (3)$$

Якщо ширина штаби менша за довжину бочки ролика або необхідна лише часткова компенсація нерівномірності натягнення, використовують залежність:

$$f_{HP}^B = f_{HP}\left(\frac{B}{L_P}\right)^2, \quad (4)$$

де LP — довжина бочки ролика

Отримані результати свідчать, що величина випуклості ролика залежить від геометричних параметрів прокатного стана, ширини штаби та рівня нерівномірності поздовжніх напружень. Для більшості станів холодної прокатки рекомендована випуклість направляючих роликів становить 5-9 мм на радіус, а для роликів, розташованих перед моталкою, - 3–3,5 мм.

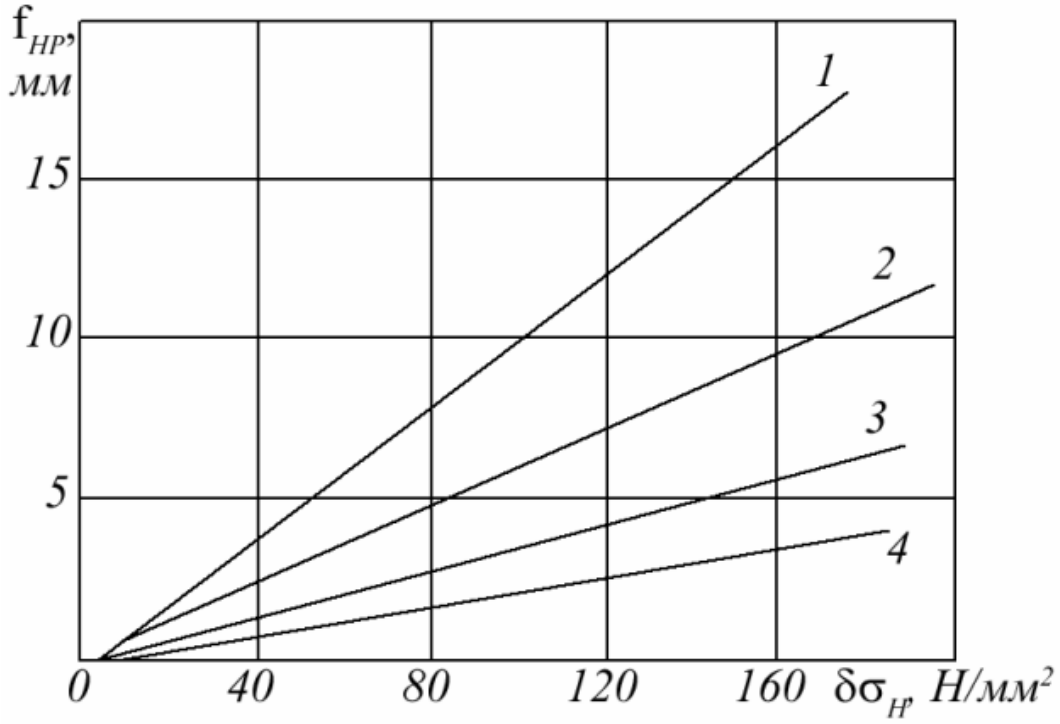


Рисунок 10 – Залежність необхідної випуклості направляючого ролика від нерівномірності поздовжніх напружень по ширині штаби при $2b_У/L_Р$: 1 – 1,0; 2 – 0,84; 3 – 0,6; 4 – 0,4 ($A_К$ = 2,0 м; $R_Р$ = 250 мм, S = 40 мм) [5]

Ефективність застосування профільованих роликів підтверджується результатами експериментальних досліджень розподілу поздовжніх напружень по ширині штаби. Встановлено, що максимальні значення напружень зосереджуються переважно в центральній частині штаби, тоді як на крайових ділянках вони є меншими. Залежно від умов прокатування різниця між напруженнями в центрі та на кромках може становити від 15 до 60 %, що суттєво впливає на формування площинності прокату та умови його подальшого змотування в рулон.

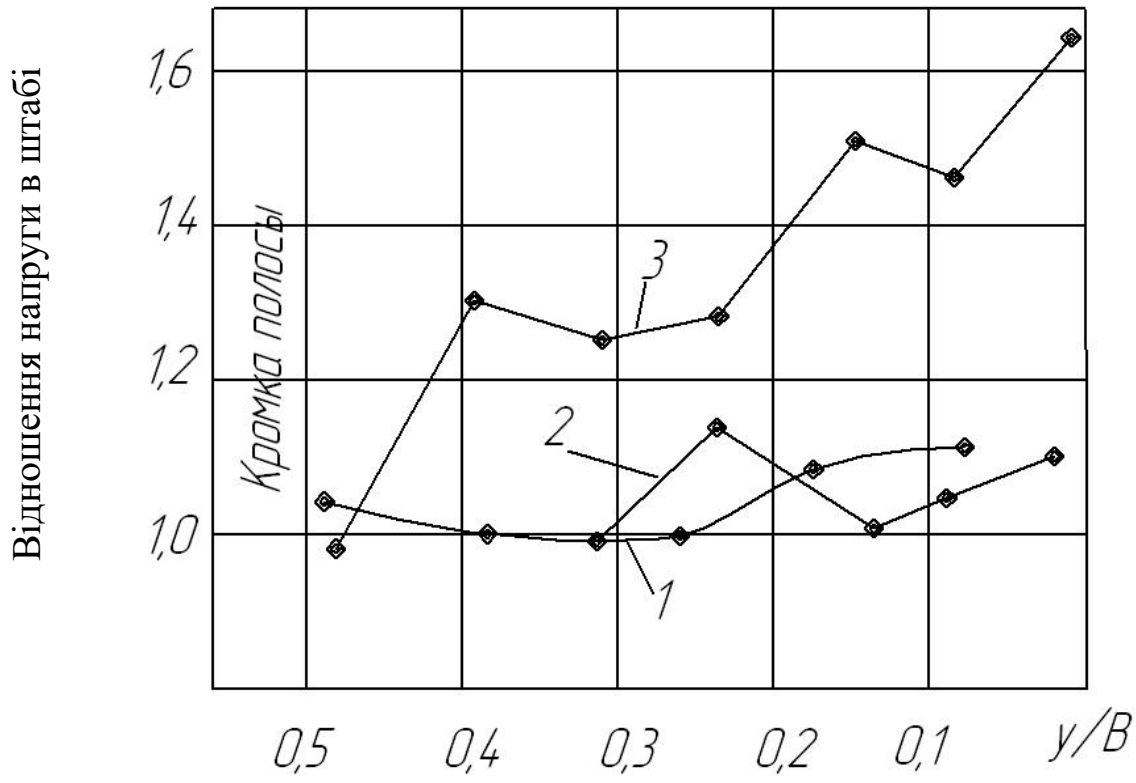
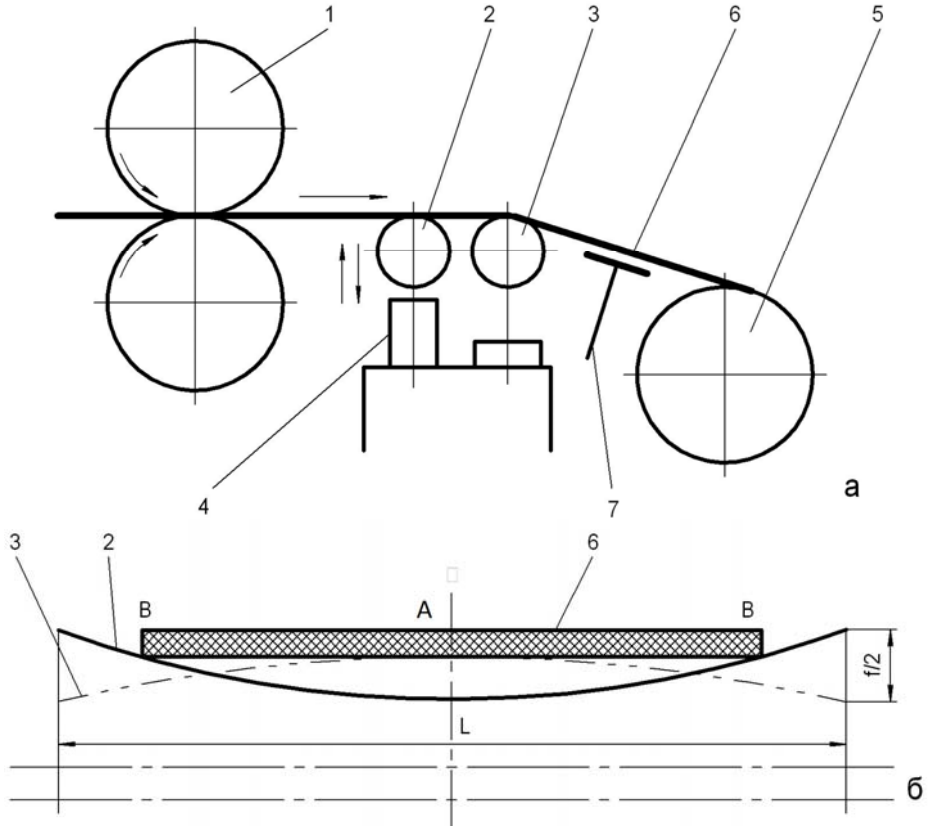


Рисунок 11– Відношення напружень по ширині штаби при її товщині h = 0,92-1,5мм після кліті 3 (1) і перед нею (2,3) [1]

Наведені дані підтверджують, що регулювання розподілу поздовжніх напружень є одним із найбільш ефективних способів покращення геометричних параметрів холоднокатаних штаб. Вирівнювання поля напружень сприяє зменшенню хвилястості крайок, коробоватості та інших дефектів форми, що підвищує якість готової продукції.

Подальшим розвитком засобів регулювання форми штаби стали системи з рухомими профільованими роликами (рисунок 12). Їх робота базується на сигналах від датчиків натягнення, які безперервно контролюють розподіл поздовжніх напружень по ширині штаби.

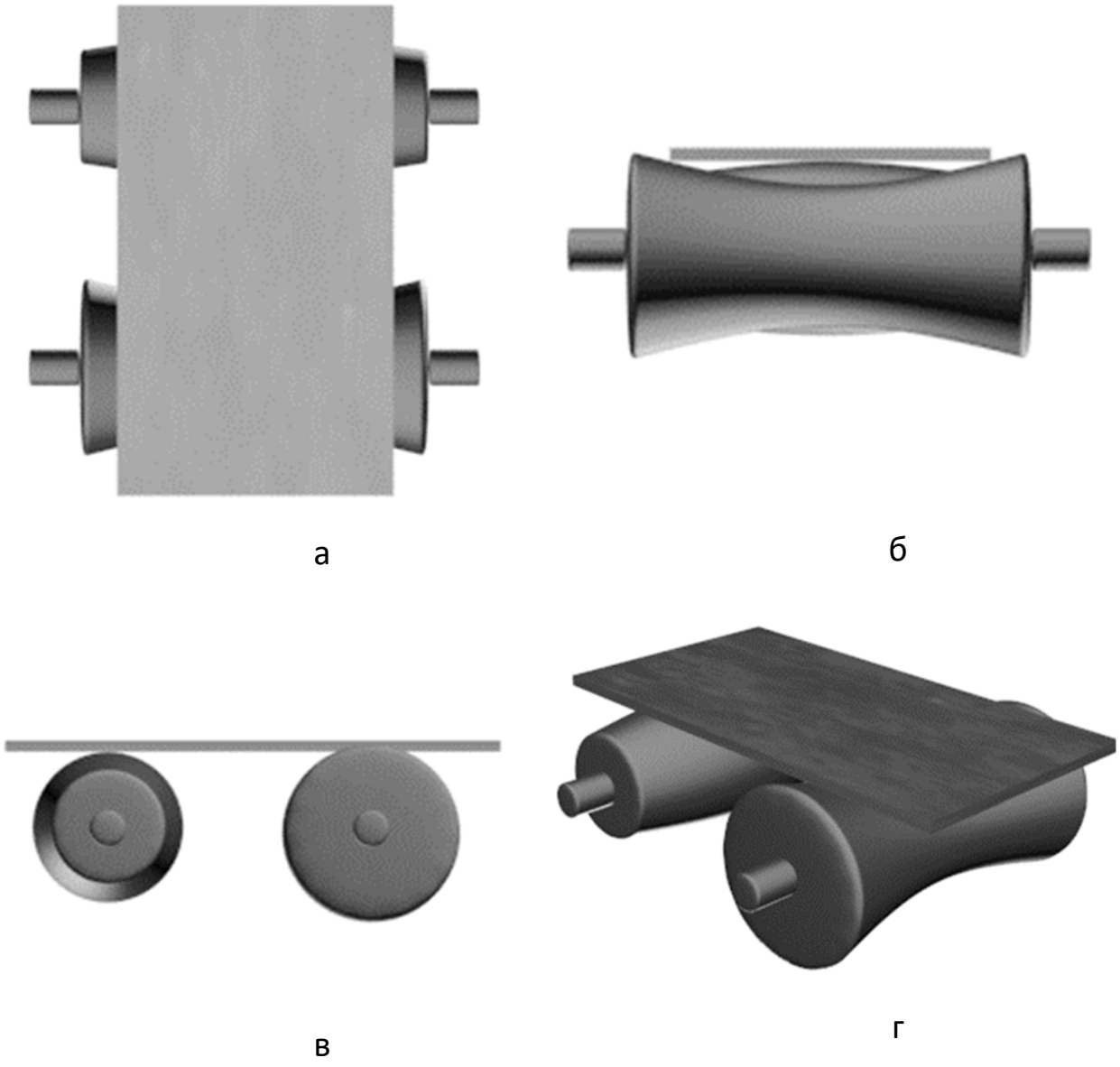


а - схема пристрою;б - схема контактування штаби з роликом

1 - чистова кліть; 2 - рухомий ролик; 3 - стаціонарний ролик; 4 - гідропривід; 5 - моталка; 6 - штаба; 7 - вимірювач напружень

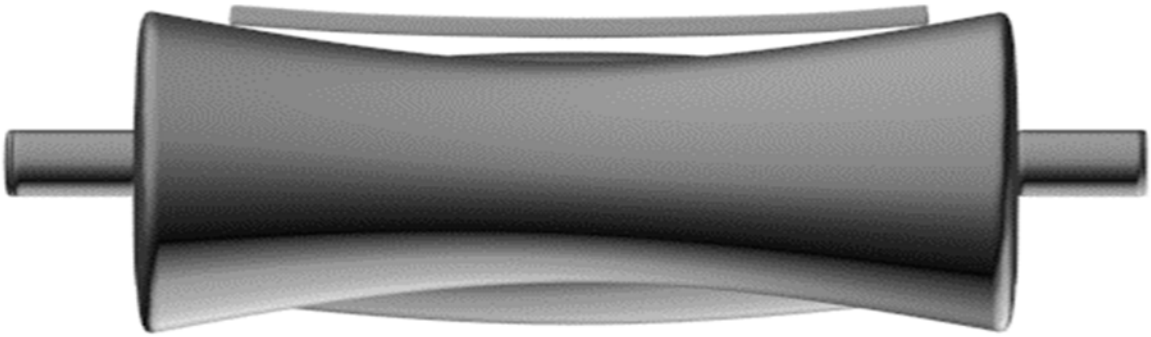
Рисунок 12 – Пристрій регулювання форми штаби під час прокатки

У разі виникнення підвищених напружень у центральній частині штаби ролик переміщується таким чином, щоб збільшити навантаження на крайові зони. Якщо ж максимальні напруження спостерігаються на крайках, положення ролика змінюється у протилежному напрямку. Завдяки цьому забезпечується вирівнювання епюри поздовжніх напружень і покращення площинності прокату.

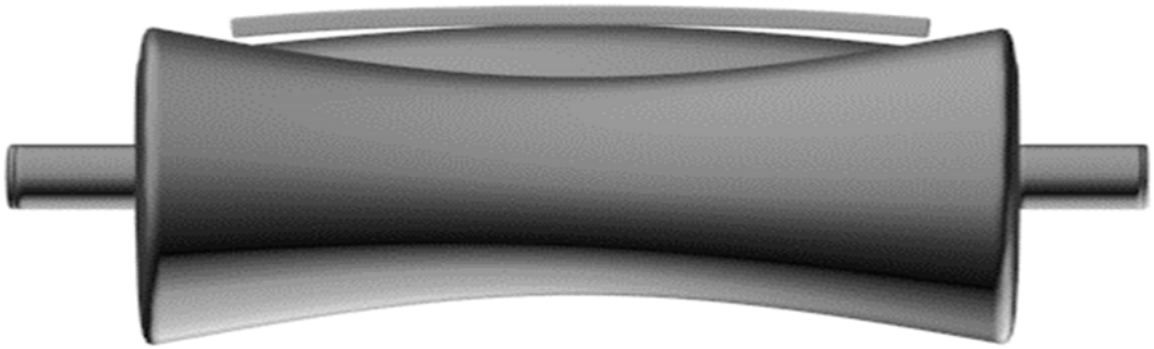


а –вид зверху; б –вид спереду; в – вид зліва; г – перспектива

Рисунок 13 а – Проекції обвідних роликів відповідно до рисунка 12



а



б

а –випуклий ролик опущений; б –випуклий роликпіднятий.

Рисунок 13б – Вид спереду обвідних роликів відповідно до рисунку 12

Таким чином, застосування профільованих направляючих роликів у поєднанні із сучасними системами контролю натягнення дозволяє ефективно знижувати нерівномірність розподілу поздовжніх напружень, покращувати форму штаби та забезпечувати рівномірне змотування рулонів, що позитивно впливає на якість готової продукції.

1.4 Дослідження поздовжніх напружень у штабі при використанні випуклого натяжного (обвідного) ролика

Під час розтягування штаби, яка контактує з випуклим обвідним роликом, поздовжні напруження по її ширині розподіляються нерівномірно. У центральній частині штаби вони мають вищі значення, ніж на крайках, що обумовлено різною величиною поздовжніх деформацій. Формування такого розподілу напружень після виходу штаби з кліті дозволяє знизити ймовірність обриву зварних швів рулонів на станах холодної прокатки та зменшити усадку ширини металу на станах гарячої прокатки. Для цього в міжклітьових проміжках доцільно використовувати натяжні або обвідні ролики з випуклим профілем бочки.

На основі отриманих теоретичних залежностей можна визначити різницю поздовжніх деформацій і напружень між центральною та крайовими зонами штаби, а також обґрунтувати вибір випуклості ролика та місця його встановлення в технологічній лінії.

Залежно від величини натягнення штаба може контактувати з роликом по всій ширині або лише на окремій її частині (рисунок 14).

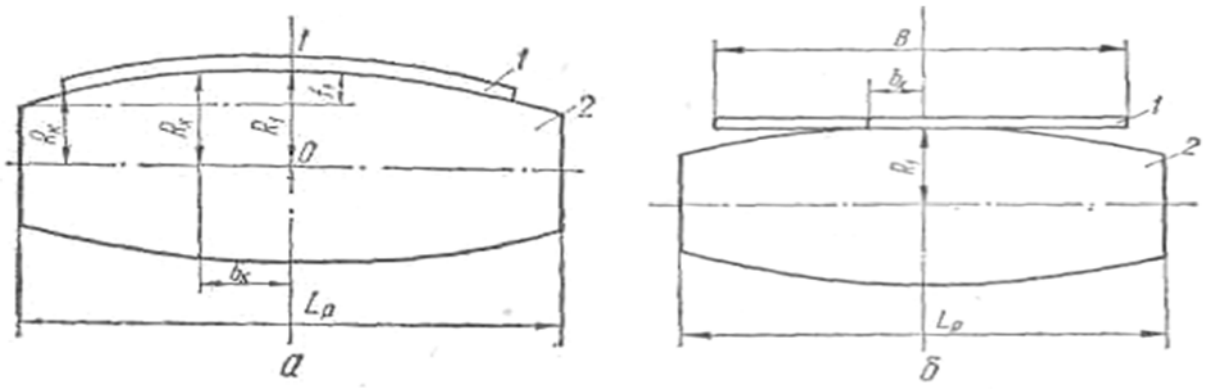


Рисунок 14– Схема контактування штаби з випуклим роликом по всій ширині (а) і частковий контакт (б)

Розглянемо випадок повного контакту штаби з роликом. Пружна деформація волокон при огинанні ролика пропорційна центральному куту φх, у межах якого розташована дуга контакту Їх (рисунок 15). Оскільки при випуклому профілі ролика величина кута зменшується від осі до крайок штаби, відповідно зменшується і деформація металу.

Різниця абсолютних деформацій між центральною частиною штаби та будь-яким поздовжнім перерізом визначається за формулою:

$$\Delta l_x = l_1 - l_x = R_1 \cdot \varphi_1 - R_x \cdot \varphi_x, \qquad (5)$$

де R_1, R_x– радіуси ролика по осі та в довільному перерізі; φ_1і φ_x– відповідні центральні кути; l_1і l_x – довжини дуг контакту.

Зміна радіуса вздовж бочки ролика описується залежністю:

$$R_x = R_1 - f_1 \cdot \frac{4 \cdot b_x^2}{L_p^2}, \qquad (6)$$

де f_1 – випуклість ролика по радіусу; b_x- відстань від осі штаби до розглядуваного перерізу; L_p–довжина бочки ролика.

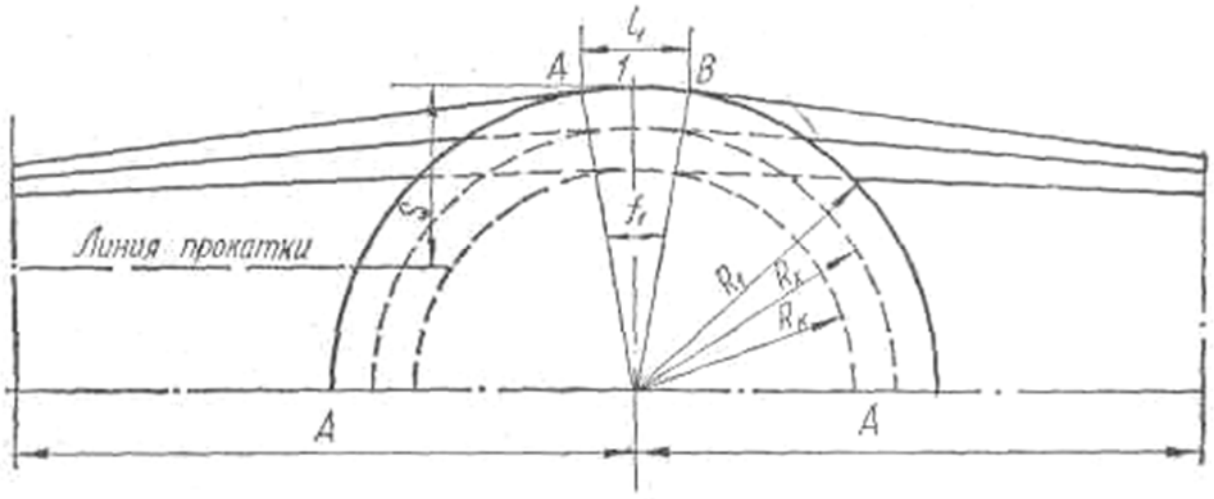


Рисунок 15– Схема до виведення розрахункових залежностей

Кути контакту визначаються виразами:

$$tg\varphi_1 \approx \varphi_1 = \frac{2s}{A}; \quad (7)$$

$$tg\varphi_x \approx \varphi_x = \frac{2}{A}(s - f_x) = \frac{2}{A}\left(s - 4f_1\frac{b_x^2}{L_p^2}\right), \quad (8)$$

де s – відстань від лінії прокатки до поверхні ролика; А - відстань від осі ролика до осі робочої кліті.

Після підстановки залежностей (6–8) у формулу (5) одержимо:

$$\Delta l_x = \frac{2R_1 s}{A}\left[1 - \left(1 - \frac{4f_1}{R_1}\cdot\frac{b_x^2}{L_p^2}\right)\right]\cdot\left(1 - \frac{4f_1}{s}\cdot\frac{b_x^2}{L_p^2}\right). \quad (9)$$

Відносна різниця деформацій по ширині штаби визначається:

$$\Delta\varepsilon_x = \varepsilon_1 - \varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{2A} = \frac{R_1 s}{A^2}\left[1 - \left(1 - \frac{4f_1}{R_1}\cdot\frac{b_x^2}{L_p^2}\right)\right]\cdot\left(1 - \frac{4f_1}{s}\cdot\frac{b_x^2}{L_p^2}\right), \quad (10)$$

де ε_1 іε_x – відносні деформації по осі та в довільному перерізі штаби.

З формули (10) випливає, що мінімальні деформації спостерігаються на крайках штаби, тоді як у центральній частині вони досягають максимальних значень.

Використовуючи закон Гука, різницю поздовжніх напружень по ширині можна визначити за формулою:

$$\Delta\sigma_x = \sigma_1 - \sigma_x = \Delta\varepsilon_x \cdot E, \quad (11)$$

де E – модуль пружності матеріалу штаби; $\sigma_1 i\, \sigma_x$ – напруги розтягання по осі штаби і в будь-якому перетині по її ширині.

Результати розрахунків наведено на рисунку 16.

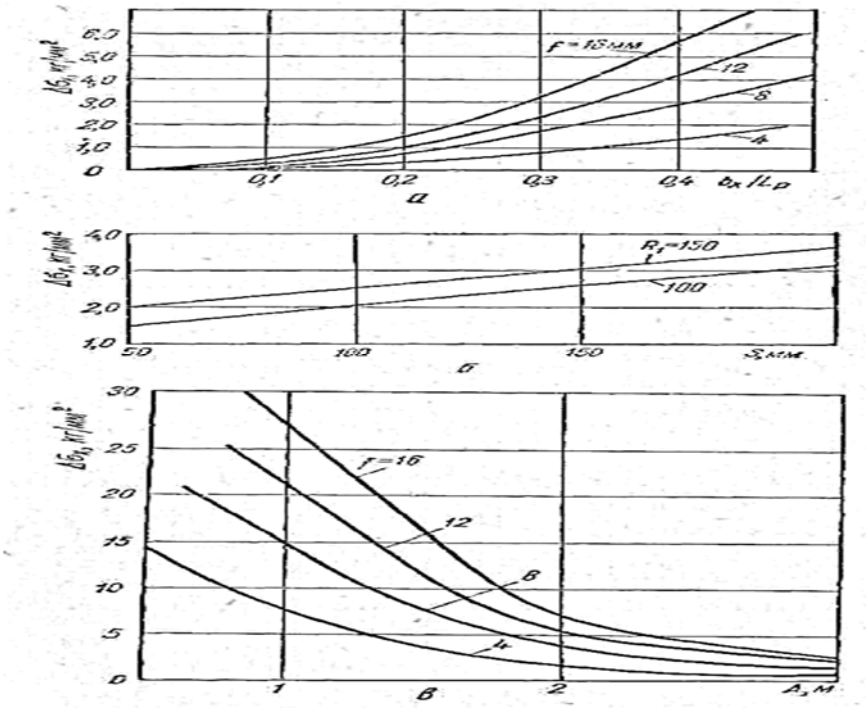


Рисунок 16 – Залежність $\Delta\sigma_x$ від b_x/L_p

$(a, R = 150$ мм$, s = 80$ мм$, A = 3$ м$)$, - залежність від відносної ширини штаби

$s(\text{б}, b_x/L_p = 0{,}3, f_1 = 12$ мм$, A = 3$ м$)$, - відстані до лінії прокатки;

$A(\text{в}, R_1 = 150$ мм$, s = 80$ мм$, b_x/L_p = 0{,}3)$ – відстані між роликом і кліттю

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням випуклості ролика та ширини штаби різниця між напруженнями в центрі та на крайках зростає. Аналогічний ефект спостерігається при наближенні ролика до робочої кліті та збільшенні його радіуса.

Під час прокатування широких штаб у гарячому та холодному стані максимальні поздовжні напруження зазвичай виникають на крайках. Використання випуклих обвідних роликів дозволяє знизити ці напруження та вирівняти їх розподіл по ширині металу. Необхідна величина випуклості визначається за формулами (10) та (11).

Для розширення можливостей регулювання доцільно передбачати можливість переміщення роликів уздовж напрямку руху штаби, тобто змінювати параметр (A).

Слід враховувати, що формули (10) і (11) описують розподіл напружень безпосередньо в площині осі ролика. У міру віддалення від ролика нерівномірність поступово зменшується, а на певній відстані напруження практично вирівнюються по ширині штаби.

Згідно з результатами досліджень [9], ця умова виконується при співвідношенні: $\Delta\sigma \to 0$ приL/B = 1,0 – 1,5,

де L – довжина ділянки, на якій зберігається нерівномірність напружень; B – ширина штаби. В інших умовах деформації це відношення може бути дещо іншим.

У загальному випадку: L = n·B,

де n – коефіцієнт пропорційності.

Тоді різниця напружень на довільній відстані від ролика визначається виразом:

$$\Delta\sigma_x^{'} = \Delta\sigma_x \cdot E \cdot \left(1 - \frac{L_y}{n \cdot B}\right), \qquad (12)$$

де L_y – відстань від осі ролика до розглядуваного перерізу штаби.

Таким чином, застосування випуклих натяжних роликів дозволяє ефективно регулювати розподіл поздовжніх напружень по ширині штаби, покращувати її площинність та знижувати ймовірність виникнення дефектів під час подальшої обробки металу.

2. Дослідно-розрахункове обґрунтування рішень

2.1 Удосконалення площинності холоднокатаного листового прокату

Якість листового прокату визначається точністю його геометричних параметрів. Відповідно до чинних стандартів продукцію класифікують за точністю виготовлення за товщиною (ВТ, АТ, БТ), шириною (ВШ, АШ, БШ) та довжиною (ВД, АД, БД), а також за характером крайки — обрізною (О) або необрізною (НО).

Одним із найважливіших показників якості холоднокатаної сталі є площинність. Згідно з вимогами ДСТУ 19904–90 листи та штаби шириною понад 500 мм поділяють на групи особливо високої (ПО), високої (ПВ), поліпшеної (ПУ) та нормальної (ПН) площинності. Граничні значення відхилень від плоскої форми наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 - Відхилення від плоскої форми холоднокатаної листової сталі

Амплітуда *А*, по групах, мм:	Ширина штаби, мм			
	1000	1000-1500	1500-1800	1800
ПО	4	5	6	8
ПВ	8	8	10	10
ПУ	10	12	15	15
ПН	12	15	18	20

Допустима серповидність штаби не повинна перевищувати 10 мм на довжині 3 м.

Площинність є одним із ключових показників технологічної придатності листової сталі для подальшої переробки. Наявність хвилястості або коробуватості гарячекатаного підкату погіршує якість зварних з'єднань, прискорює зношування роликів і може призводити до пошкодження поверхні металу під час змотування та розмотування рулонів. У процесі холодної прокатки дефекти форми ускладнюють заправлення штаби в кліть, сприяють утворенню складок та обривів, що негативно впливає на продуктивність обладнання.

Під час змотування неплощинної штаби формується рулон з нерівномірною щільністю витків, що підвищує ризик їх зварювання під час відпалу та виникнення дефекту «злам» при дресируванні. Крім того, відхилення форми спричиняють телескопічність рулонів, погіршують якість покриттів і ускладнюють роботу агрегатів різання.

Поліпшення площинності гарячекатаного підкату досягається завдяки правильному налаштуванню станів гарячої прокатки, використанню систем гідровигину валків, а також застосуванню дресирувальних і гнучко-розтяжних машин.

Результати досліджень на станах холодної прокатки 1700 показали, що оптимальним є режим, за якого у міжклітьових проміжках створюється незначна коробуватість штаби. У цьому випадку нерівномірність питомих натягів зазвичай перебуває в межах 30–150 Н/мм² і визначається залежністю:

$$\delta\sigma = \sigma_{ср} – (\sigma_{л} - \sigma_{п})/2 \qquad (13)$$

де $\sigma_{ср}$, $\sigma_{л}$,$\sigma_{п}$ — питомі натяги відповідно в центрі, на лівій та правій крайках штаби.

Аналіз експлуатації прокатних станів свідчить, що на стійкість процесу істотно впливають геометричні параметри валкової системи. Зі збільшенням діаметрів робочих та опорних валків зростає жорсткість кліті, зменшується вплив коливань сили прокатки на прогин валків і покращуються умови самовирівнювання деформації по ширині штаби.

Для регулювання площинності на сучасних станах широко застосовуються системи гідровигину робочих валків. Найбільший ефект їх використання спостерігається на останніх клітях безперервного стана. Проте навіть такі системи не завжди дозволяють усунути локальні дефекти форми.

Важливим фактором, що впливає на площинність, є температурна нерівномірність по ширині штаби. Нерівномірний розподіл тиску і сил тертя викликає різницю температур між центральними та крайовими зонами

металу.

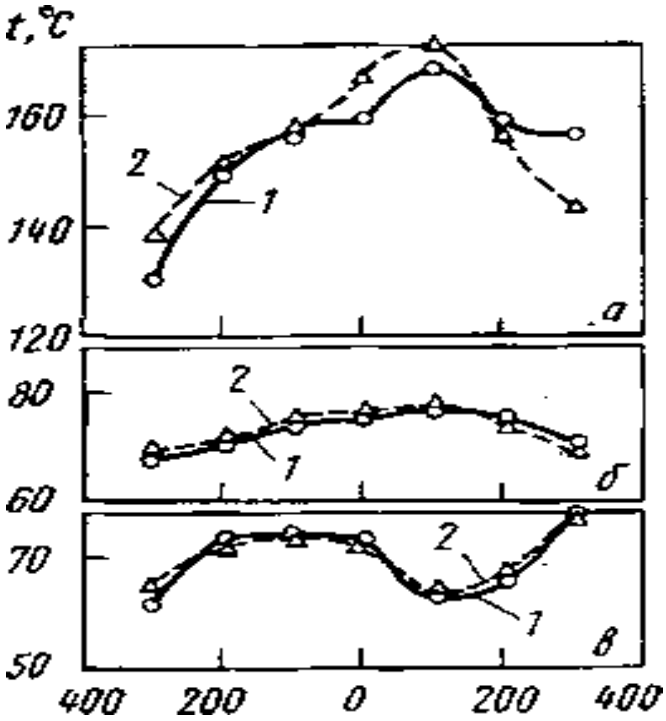


Рисунок 17 - Розподіл температури по ширині штаби на виході стана 1200 при прокатуваннівисококремністої сталі 3,1 % Si; 2,5—0,6/820 мм а й різних рулонів низковуглецевої сталі (СтЗкп, 2,5—0,5/810 мм) б; 1,2 — повторні виміри через 5—6 хв.

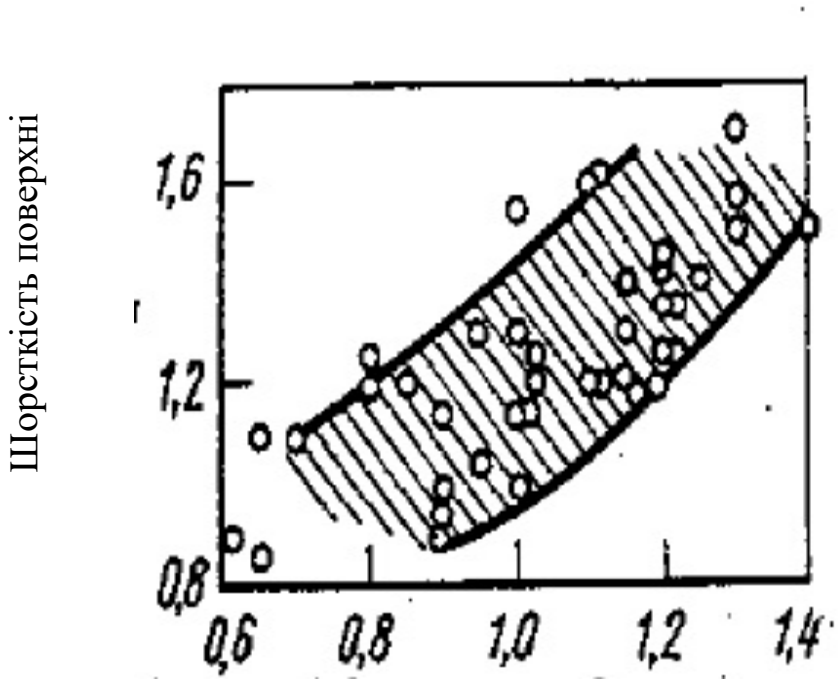
Для низьковуглецевих сталей різниця температур по ширині зазвичай становить 10–25 °С, а для високолегованих і кременистих сталей може досягати 30–60 °С. Внаслідок цього виникають додаткові термічні напруження:

$$\delta\sigma_t = -E\frac{\delta l}{l} = -E\delta t_{\text{п}}\alpha, \qquad (14)$$

де α — коефіцієнт лінійного температурного розширення сталі

За різниці температур 10–60 °С величина термічних напружень може

досягати 28,6–171,6 Н/мм², що суттєво впливає на результати контролю площинності.



Шорсткість поверхні холоднокатаної штаби Ra, мкм

Рисунок 18 - Розподіл температури по ширині штаби зі сталі Ст1кп типорозміру 2,5—0,65/1015 мм на виході 5-клітевого стана 1700; 1,2,3 — номера рулонів.

Для підвищення точності контролю необхідно враховувати температурну складову під час обробки сигналів систем вимірювання площинності. Одним із ефективних способів стабілізації температурного режиму є регульована подача емульсії в міжклітьові проміжки.

Суттєвий вплив на якість прокату має також теплове профілювання валків. Секційні системи охолодження дозволяють локально змінювати теплову опуклість валків і тим самим усувати окремі дефекти форми.

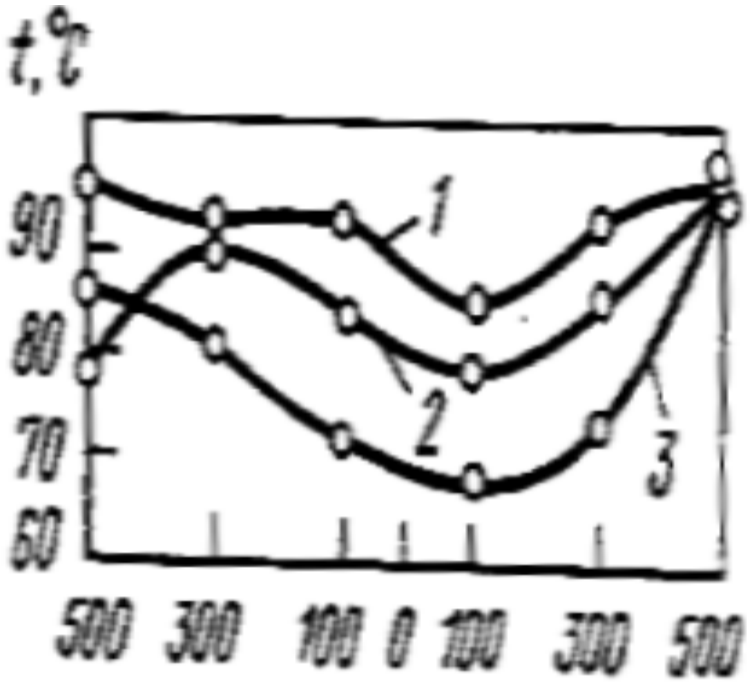


Рисунок 19 - Залежність нерівномірності температури по ширині штаби 2,5-0,6/820 мм із висококремністой сталі на виході 5-клетьового стана 1200 від нерівномірності питомого натягу у відповідних меж клітьових проміжках (*1—4)* і між п'ятою кліттю й моталкою *5;* суцільні лінії при швидкості 6 м/с; проектна —15 м/с.

Найкращі результати забезпечує комплексне використання систем гідровигину, автоматичного регулювання міжвалкового зазору та теплового профілювання валків. Такий підхід дозволяє компенсувати як швидкі коливання натягів, так і локальні дефекти форми.

Під час відпалу рулонів відбувається часткове вирівнювання внутрішніх напружень і довжин окремих ділянок штаби. Для оцінки нерівномірності натягу після відпалу використовується залежність.

$$\delta\sigma_A = \left(\frac{\pi \cdot A}{4\lambda}\right)^2 E, \qquad (15)$$

де A – амплітуда хвилі, λ – її довжина, E – модуль пружності матеріалу

Експериментальні дослідження показали, що невелика коробуватість штаби після холодної прокатки є більш стійкою до втрати площинності під час подальших технологічних операцій, ніж хвиляста форма.

Дресирування також є ефективним засобом покращення площинності, особливо при підвищених рівнях натягу. Однак за наявності локальних потовщень або дефектів профілю навіть багаторазові проходи не забезпечують повного усунення неплощинності. Тому висока якість готової продукції можлива лише за умови отримання рівномірного профілю ще на попередніх стадіях виробництва.

Для остаточного виправлення форми застосовують роликові правильні машини, правильно-розтяжні агрегати та установки знакозмінного вигину з розтяганням. Найбільш поширеним і технологічно доцільним способом є роликове правлення, яке дозволяє ефективно усувати хвилястість і коробуватість без значних втрат металу.

Отже, отримання холоднокатаної сталі високої та особливо високої площинності потребує комплексного підходу, що включає забезпечення якісного гарячекатаного підкату, оптимізацію профілювання валків, стабілізацію температурного режиму, застосування сучасних систем автоматичного регулювання та використання ефективних засобів правлення готової продукції.

2.2 Організаційно-виробнича характеристика цеху

Цех холодної прокатки №1 (ЦХП) призначений для виробництва холоднокатаної продукції з вуглецевих, легованих і нержавіючих сталей. Основна продукція цеху включає:

- холоднокатані листи розмірами 0,5–2,0 × 850–1500 × 1400–3800 мм;

- травлені гарячекатані листи розмірами 1,0–3,0 × 1000–1500 × 1800–4200 мм;

- холоднокатану штабу в рулонах шириною 850–1550 мм та товщиною 0,5–2,0 мм.

Виробництво здійснюється на безперервному чотириклітьовому стані 1680, двох реверсивних станах 1680 і 1200, двадцятивалковому стані 1700, а також на двох безперервних вузькоштабових чотириклітьових станах 450 і 650. Це обладнання забезпечує випуск листів, штаб і стрічок із різних марок сталі.

Для завершальної обробки продукції цех оснащений агрегатами дресирування, поздовжнього та поперечного різання. Це дозволяє виготовляти холоднокатаний прокат товщиною від 0,2 до 2,0 мм, шириною від 10 до 1500 мм, довжиною листів до 4000 мм та рулони масою до 14 т.

Структурно ЦХП складається з травильного, прокатного, термічного, дресирувального відділень, а також відділень нержавіючих сталей і жерсті. Загальна схема цеху наведена на рисунку 20.

Травильне відділення призначене для видалення окалини з поверхні металу перед подальшою обробкою.

Прокатне відділення забезпечує зменшення товщини металу до необхідних розмірів. До його складу входять безперервний чотириклітьовий стан 1680, реверсивні стани 1680 і 1200 та дільниця підготовки валків.

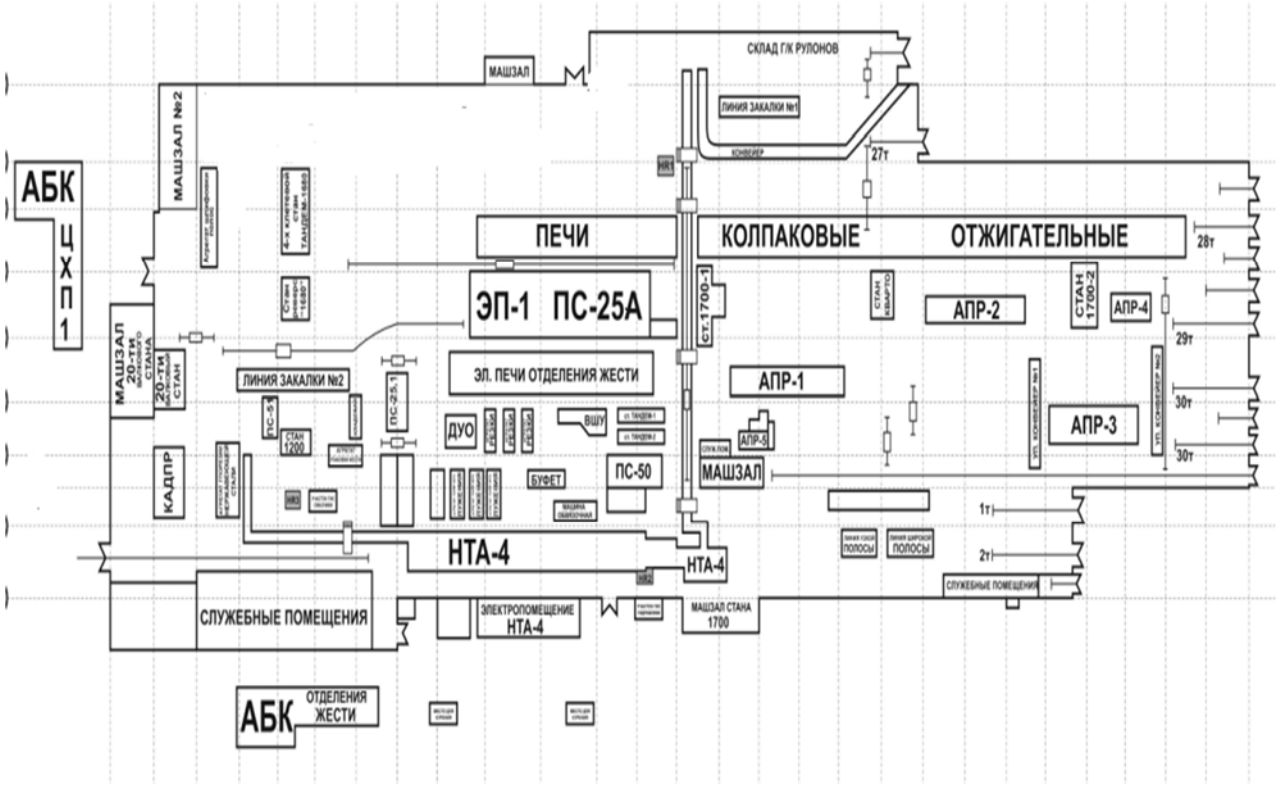


Рисунок 20 – План ЦХП ПАТ МК «Запоріжсталь»

Безперервний стан 1680 складається з чотирьох послідовно розташованих клітей кварто, кожна з яких містить два робочі та два опорні валки. До складу комплексу також входять розмотувач, моталка, поворотний стіл, приймальні та напрямні пристрої.

Реверсивний стан 1680 оснащений однією кліттю кварто, розмотувачем, моталкою, перекидачем і транспортними механізмами. Реверсивний стан 1200 включає чотиривалкову кліть, правильно-тягнучу машину, проводковий стіл, розмотувач та дві моталки.

Виробництво нержавіючого прокату здійснюється на спеціалізованому комплексі, до складу якого входять два безперервні гартувальні агрегати, травильний агрегат, установка для шліфування гарячекатаних штаб, двадцятивалковий стан, а також агрегати дресирування, правки та різання.

У термічному відділенні проводиться відпал холоднокатаних рулонів у ковпакових печах під захисною атмосферою. Максимальна маса садки становить 52 т (3–5 рулонів). Відділення налічує 249 стендів, об'єднаних у 16

автономних блоків із власними системами подачі газу, електроенергії, повітря та води.

Кожен стенд обладнаний циркуляційним вентилятором для забезпечення конвекції захисного газу та контрольно-вимірювальною апаратурою для підтримання необхідних режимів термообробки. Додатково експлуатуються 18 сучасних печей фірми «Ебнер», у яких відпалювання здійснюється в середовищі сухого водню. Це дозволяє отримувати прокат із високою чистотою поверхні, підвищеною пластичністю та корозійною стійкістю. Річна продуктивність цих печей становить близько 300 тис. т продукції.

Дресирувальне відділення включає два дресирувальні стани 1700-1 і 1700-2, три агрегати поперечного різання (АПР-1, АПР-2, АПР-3), агрегат поздовжнього різання АПР-4, стан кварто та пакувальні конвеєри. Дресирування забезпечує поверхневе зміцнення металу та зменшення хвилястості й коробуватості штаб.

Відділення жерсті складається з термічної та прокатної дільниць, на яких працюють два безперервні чотириклітьові стани 450 і 650.

Важливим елементом виробничого процесу є дільниця підготовки валків, обладнана верстатами для обдирання та шліфування валків, машиною для насічки поверхні, стендами для ревізії подушок і підшипників, а також стелажами для монтажу та демонтажу валкових комплектів.

Отже, ЦХП є багатофункціональним виробничим комплексом повного циклу, оснащеним сучасним прокатним, термічним і допоміжним обладнанням, що забезпечує виготовлення широкого сортаменту холоднокатаної продукції високої якості.

2.3 Технологічні особливості виготовлення тонколистової сталі

Якість холоднокатаної тонколистової сталі формується на всіх етапах виробничого процесу, починаючи з виплавки металу. Для отримання продукції з необхідними властивостями необхідно забезпечити точне дотримання хімічного складу сталі та запобігти утворенню поверхневих дефектів і неметалевих включень під час розливання. З цією метою широко застосовують безперервне лиття заготовок, що дозволяє підвищити однорідність структури металу, продуктивність виробництва та рівень автоматизації процесів.

Важливий вплив на механічні властивості, структуру та геометричні параметри майбутнього листа має гаряча прокатка. На сучасних широкосмугових станах використовуються оптимальні температурно-швидкісні режими та прискорена прокатка, що забезпечує стабільність властивостей металу по всій довжині штаби..

Технологічний цикл холодної прокатки включає такі основні операції:

- травлення;
- холодну прокатку;
- термічну обробку (відпал);
- дресирування;
- нанесення покриттів;
- різання та пакування готової продукції.

Для очищення поверхні гарячекатаних штаб від окалини використовується безперервний травильний агрегат НТА-4, введений в експлуатацію у 2014 році. Схему технологічної лінії наведено на рисунку 21.

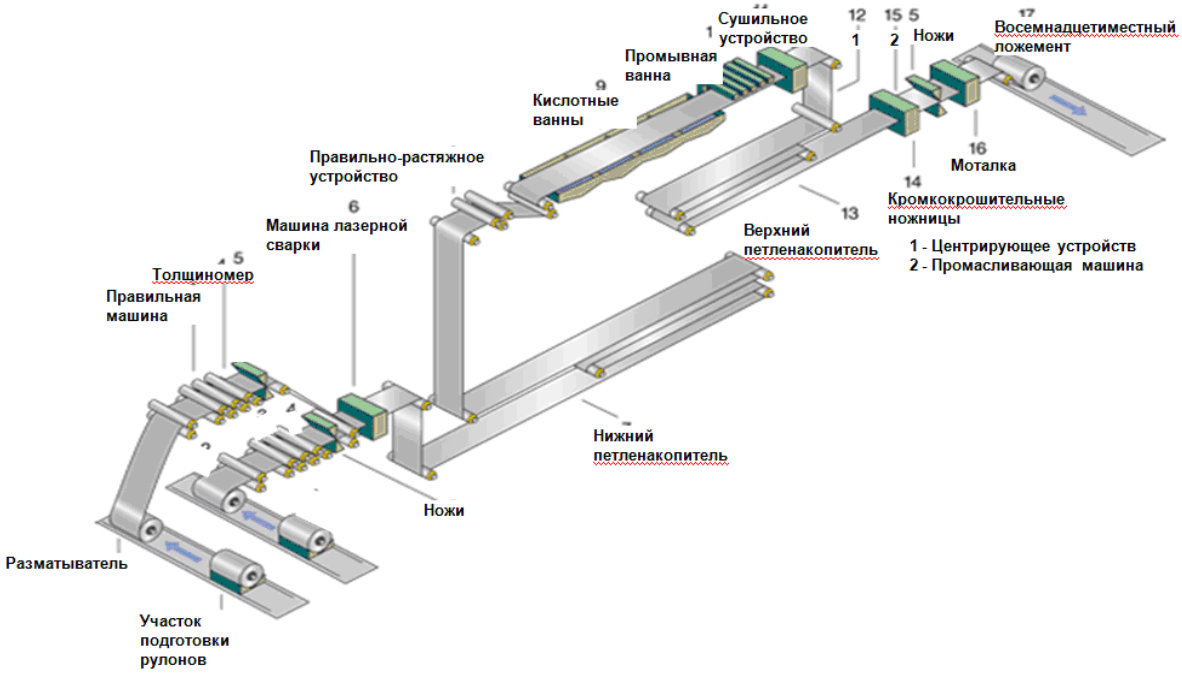


Рисунок 21 – Схема технологічної лінії НТА-4

На агрегаті обробляються рулони товщиною 1,0–6,0 мм і шириною 850–1500 мм із низьковуглецевих та конструкційних сталей.

Основними операціями НТА-4 є:

- механічне руйнування окалини;
- кислотне травлення;
- промивання поверхні;
- сушіння штаби.

До допоміжних операцій належать обрізання дефектних кінців, зварювання рулонів, обрізка кромок, контроль якості поверхні, маркування та зважування продукції.

Видалення окалини здійснюється шляхом обробки поверхні солянокислотним розчином у режимі інтенсивного турбулентного травлення. При цьому відбуваються такі хімічні реакції:

$$FeO+2HCl=FeCl_2+H_2O$$

$$Fe_3O_4+6HCl+H_2=3FeCl_2+4H_2O$$

$$Fe_2O_3+4HCl+H_2=2FeCl_2+3H_2O$$

Процес травлення виконується у чотирьох послідовно розташованих ваннах, що працюють за принципом протитечії.

Після доставки рулонів із цеху гарячої прокатки вони проходять операції кантування, центрування та розмотування. Далі штаба подається через правильні машини, ножиці та лазерну зварювальну установку до накопичувача. Після механічного руйнування окалини в окалиноломачі метал надходить у травильні ванни, а після завершення процесу — до сушильної установки з температурою сушіння близько 120 °C.

На вихідній ділянці агрегату здійснюються обрізання кромок, контроль якості поверхні, маркування, видалення зварних стиків та змотування штаби в рулони. Перед намотуванням поверхню покривають антикорозійним мастилом І-20А або ANTICOR ST.

Під час холодної прокатки визначальними параметрами є ступінь обтиснення, швидкість прокатки, міжклітьові натяги та профілювання валків. Саме вони впливають на геометричну точність штаби, стабільність процесу та продуктивність стану.

Режими прокатки розраховуються автоматизованою системою керування до подачі штаби в стан, після чого оператор може вносити необхідні коригування. Для сталей із підвищеним вмістом вуглецю швидкість прокатки зменшують на 15–25 %, що дозволяє уникнути перевантаження обладнання та обривів штаби.

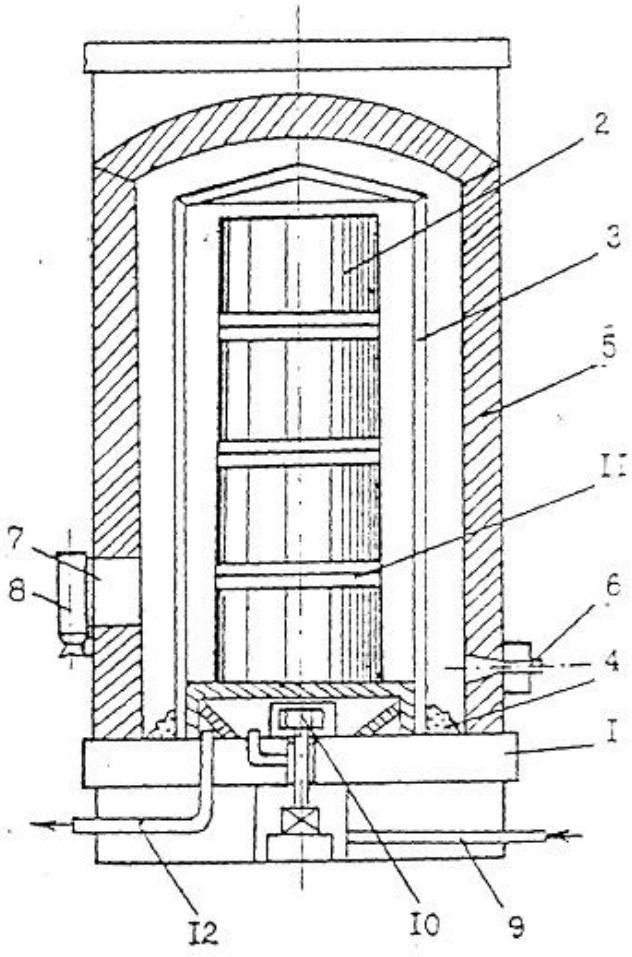
Для зниження сил тертя застосовують технологічні мастила та емульсії на основі мінеральних олив, рослинних жирів або спеціальних емульсійних складів. Система змащення працює за замкненим циклом із використанням фільтрів, сепараторів та охолоджувачів.

Особливу увагу приділяють стану робочих валків, які повинні поєднувати високу міцність і твердість. У процесі експлуатації валки регулярно шліфують і відновлюють їхню поверхню. Для покращення

захоплення металу в першій кліті поверхню валків додатково насікають дробом.

Після холодної деформації метал набуває підвищеної міцності, але його пластичність істотно знижується через наклеп. Для відновлення необхідних механічних властивостей застосовують рекристалізаційний відпал при температурі 630–690 °С.

Однією з найпоширеніших установок для відпалу рулонів є ковпакові печі, схема яких наведена на рисунку 22.



1 - стенд; 2 - стопа рулонів; 3 - муфель; 4 - пісковий затвор; 5 - переносної нагрівальний ковпак; 6 – інжекційний пальник; 7 - димове вікно; 8 - ежектор; 9 - труба для подачі захисного газу; 10 - вентилятор; 11 - конвекторна прокладка; 12 - труба для виходу захисного газу.

Рисунок 22 − Схема одностопної ковпакової печі для відпалу рулонів

Відпал у ковпакових печах характеризується високою продуктивністю, відносно низькими енерговитратами та можливістю забезпечення рівномірних властивостей металу по всій ширині рулону. Для сталі марки 08Ю ефективним є двоступеневий режим відпалу з витримкою при температурах 600 °С і 690 °С, що дозволяє підвищити вихід придатної продукції до 98 %.

Крім ковпакових печей, у виробництві широко використовують баштові та безперервні печі. Безперервні агрегати забезпечують високу продуктивність, стабільність структури металу та можливість автоматизації процесу термічної обробки.

Після відпалу та охолодження рулони надходять на дресирувальний стан. Дресирування являє собою легку прокатку з обтисненням 0,8–1,2 %, яка виконується за один прохід зі швидкістю 10–12 м/с. Основною метою операції є усунення площадки текучості, покращення якості поверхні та підвищення штампувальних властивостей металу.

Дресирування проводять у валках із насіченою поверхнею, що забезпечує шорсткість листа в межах $Ra = 1{,}5–1{,}8$ мкм. Така поверхня сприяє кращому утриманню мастильних матеріалів під час штампування, зменшує тертя та покращує якість формоутворення виробів.

Завершальними операціями виробництва є поперечне та поздовжнє різання рулонів, контроль якості та пакування готової продукції.

Отже, отримання холоднокатаної тонколистової сталі високої якості можливе лише за умови комплексного дотримання технологічних режимів на всіх етапах виробництва — від виплавки та гарячої прокатки до відпалу, дресирування та фінішної обробки металу.

2.4 Особливості здійснення прокатки на реверсивному стані 1680

2.4.1 Підготовка до роботи

Перед відновленням роботи реверсивного стана після ремонту, перевалки валків, тривалого простою або відсутності металу обслуговуючий персонал повинен виконати комплекс підготовчих заходів. Насамперед перевіряється технічний стан механічного обладнання та контрольно-вимірювальних приладів.

Прокатку дозволяється розпочинати лише за умови повної справності всіх вузлів стана. Перед заміною емульсії здійснюють промивання пресс-проводки гарячою водою, а після ремонтних робіт додатково очищують технологічне обладнання. Для контролю параметрів мастильно-охолоджувальної рідини відбирають проби емульсії з подальшим визначенням її концентрації. Одночасно проводиться візуальна перевірка стану відбійника емульсії.

2.4.2 Подача рулонів до стана

Транспортування рулонів до стана здійснюється електромостовим краном за допомогою спеціальної скоби. Рулони по одному встановлюють на приймальний похилий рольганг таким чином, щоб зовнішній виток був притиснутий до його поверхні.

Для запобігання пошкодженню крайок і поверхні металу забороняється переміщувати рулони ударами кранової скоби або іншими рулонами. З приймального рольганга рулон надходить на поворотний стіл, який здійснює його поворот на 90° та подає на перекидач.

Після нахилу перекидача рулон перекочується на опорні ролики колиски розмотувача. Обертання роликів забезпечує встановлення рулону в положення, зручне для захоплення кінця зовнішнього витка. Далі рулон фіксується бічними напрямними, а відгинач піднімає кінець штаби у верхнє положення для подальшого заправлення в тягнучі ролики.

2.4.3 Настроювання стана

Основною метою настроювання реверсивного стана є забезпечення необхідних параметрів готової продукції відповідно до вимог замовлення.

Під час налаштування необхідно забезпечити:

- отримання заданої товщини штаби;
- досягнення необхідної площинності по всій довжині металу;
- підтримання оптимального рівня натягу;
- дотримання встановлених режимів обтиснення відповідно до технологічної інструкції.

Правильне налаштування обладнання є важливою умовою стабільності процесу прокатки та якості готової продукції.

2.4.4 Установка валків у горизонтальній площині.

Після перевалки робочих або опорних валків, а також після тривалих простоїв стана необхідно виконати їх точне центрування в кліті. Для цього вальцювальник вмикає натискний пристрій і контролює рівномірність переміщення подушок верхнього опорного валка за показниками вимірювальних приладів.

У разі нерівномірного опускання однієї з подушок натискний пристрій вимикають, усувають причину перекосу та лише після цього продовжують налаштування.

Після досягнення навантаження на двигун натискного пристрою в межах 20–40 А виконують короткочасне прокручування робочих валків для перевірки обертання опорних валків. Якщо один із валків не обертається, притискання збільшують до навантаження близько 50 А, що забезпечує повний контакт між валками.

Після початку обертання всіх валків запускають стан та подають емульсію по всій довжині бочки валків. Характер проходження емульсії дозволяє оцінити правильність встановлення валків. При рівномірному зазорі

емульсія просочується по всій ширині валка, а при контакті валків відтискається від центру до крайніх ділянок.

Валки вважаються встановленими правильно, якщо відстані від країв бочки до зон виходу емульсії однакові з обох сторін.

У процесі прокатки додатковим критерієм правильності налаштування є напрямок руху переднього кінця штаби після виходу з кліті. Якщо метал рухається точно по осі прокатки, перекіс валків відсутній.

У випадку відхилення штаби від осі її положення коригують регулюванням натискних гвинтів:

- при зміщенні штаби вправо піднімають лівий або опускають правий гвинт;
- при зміщенні штаби вліво піднімають правий або опускають лівий гвинт.

Таке регулювання забезпечує стабільне проходження металу через кліть і сприяє підвищенню точності прокатки.

2.4.5 Завдання штаби в стан

Під час подачі переднього кінця зовнішнього витка рулону відгинач піднімається у верхнє положення. Одночасно під штабу підводяться два холості ролики, які притискають її до приводного тягнучого ролика. Далі передній кінець штаби подається на стаціонарний стіл, проходить через роликову прес-проводку та за допомогою тягнучих роликів вводиться у валки стана. Після цього колиска розмотувача опускається у нижнє робоче положення.

Під час заправлення штаби, перемотування або прокатки з обтисненням у першому проході бічні вертикальні проводки, розташовані після розмотувача та перед кліттю, налаштовують відповідно до ширини штаби.

2.4.6 Прокатка штаби з обтисненням у першому пропуску

Передній кінець штаби пропускають через підняту прес-проводку та вводять у розведені валки. Після виходу штаби з валків на 100–150 мм встановлюють необхідне обтиснення за допомогою натискних гвинтів, опускають верхній стіл прес-проводки та подають штабу до моталки на заправній швидкості.

Після заведення переднього кінця у зів барабана моталки створюється необхідний натяг і починається прокатка. Оператор головного поста вводить у роботу ізотопний товщиномір, за показаннями якого виконується налаштування кліті на задану товщину. Далі стан переводиться на робочу швидкість, а товщина штаби контролюється протягом усього проходу.

Прокатка здійснюється до номінальної товщини відповідно до вимог ДСТУ 19904-90, інших нормативних документів або технічних умов замовника.

Перед виходом заднього кінця рулону з розмотувача швидкість прокатки знижують до заправної. Стан зупиняють таким чином, щоб задній кінець штаби залишався на відстані 1,0–1,2 м від осі робочих валків.

Перед реверсуванням обов'язково розводять бічні проводки та піднімають прес-проводку. Після цього механізми стана переводяться на мінімальну швидкість, а штаба заправляється у праву моталку.

Після захоплення штаби правою моталкою та створення необхідного натягу старший вальцювальник перевіряє товщину ручним мікрометром і за потреби коригує налаштування стана. Після уточнення параметрів прокатка продовжується на робочій швидкості.

Коли на барабані моталки залишається 10–15 витків, швидкість зменшують до мінімальної. Прокатка триває до моменту, коли на барабані залишається приблизно 1,5 витка рулону. Після цього виконується реверсування і прокатка продовжується у зворотному напрямку.

Наприкінці кожного проходу перед зміною напрямку прокатки залишають запас необтисненої штаби довжиною 100–150 мм, що запобігає потраплянню потовщеної ділянки у валки.

Зупинка та сповільнення стана здійснюються автоматично безконтактною системою точної зупинки. У разі ручного керування оператори постів №22 і №23 контролюють довжину штаби за показниками продуктометрів та виконують необхідні записи.

Прокатка триває до досягнення кінцевої товщини металу. Кількість проходів повинна бути непарною, оскільки готовий рулон знімається з лівої моталки.

Після завершення прокатки відкривають зів барабана правої моталки, звільняють задній кінець штаби та розводять валки на величину, достатню для її безперешкодного виходу

2.4.7 Прокатка штаби з перемотуванням у першому пропуску

У цьому режимі передній кінець штаби на заправній швидкості пропускають через підняту прес-проводку та розведені валки до барабана моталки. Після заведення кінця у зів барабана виконується перемотування рулону без обтиснення.

Перемотування здійснюється при розведених валках і притиснутій прес-проводці. Після його завершення задній кінець штаби зупиняють на відстані 1,0–1,2 м від осі валків. Далі стан зупиняють, піднімають прес-проводку, встановлюють необхідне обтиснення валків та виконують заправлення штаби у моталку. Подальший процес прокатки здійснюється за схемою, наведеною у п. 2.4.6.

Особливу увагу під час прокатки приділяють контролю натягу штаби між кліттю та моталками. Натяг контролюють за показаннями амперметрів на постах керування №22 та №23. Максимальне значення струму не повинно перевищувати 800 А.

При прокатці штаби товщиною 0,5–0,7 мм в останньому проході натяг зменшують до 300–450 А для запобігання розриву металу. Зміна натягу повинна виконуватися плавно, без різких коливань. Перед реверсуванням його знижують, а після зміни напрямку поступово підвищують до необхідного значення.

Для вуглецевих сталей величина натягу в останньому проході повинна відповідати значенням, наведеним у таблиці 3, що дозволяє уникнути зварювання витків під час подальшого відпалу.

Таблиця 3 - Величина натягу штаби між кліттю й моталкою, що намотує, в останньому пропуску (для всього діапазону швидкостей)

Товщина штаби, мм	Натяг (А) для штаб шириною не більше	
	від 1000 до 1250	від 1250 до 1500
0,5	300	-
0,6	400	400
від 0,7 до 0,8	450	450
від 0,9 до 1,0	500	500
від 1,1 до 1,3	500	550
від 1,4 до 1,6	500	600
від 1,7 до 2,0	600	700

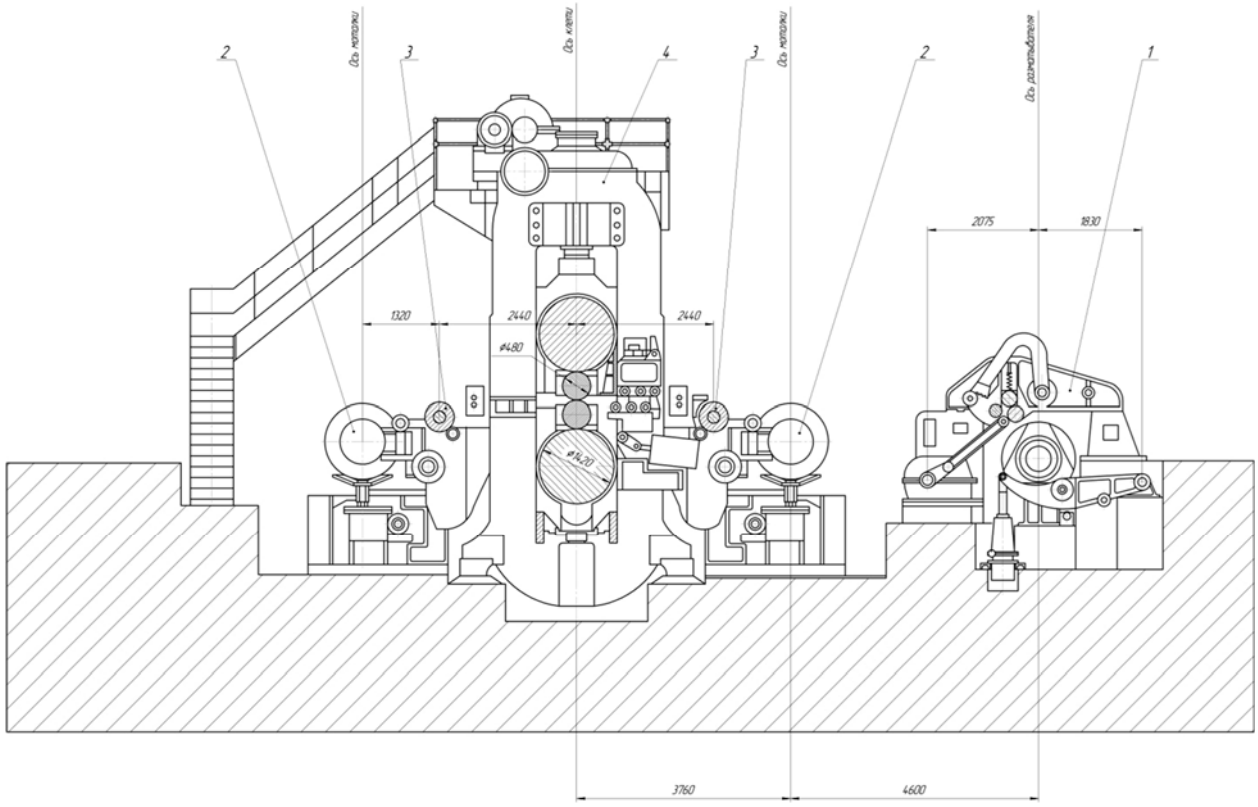
Після завершення прокатки рулон знімають з барабана лівої моталки та пакують гарячекатаною сталевою стрічкою товщиною 1,8–2,0 мм.

Оператор утримує рулон на столі знімача таким чином, щоб кінець штаби був притиснутий до його поверхні. Вальцювальник або його помічник пропускає пакувальну стрічку під рулоном, встановлює замок, виконує натягування стрічки та фіксує її кінці. Після перевірки якості пакування і відсутності людей у зоні приймального стелажа оператор нахиляє стіл та скидає рулон на приймальну позицію для подальшого транспортування.

3. Розрахункова частина

3.1 Технічні параметри та характеристика обладнання реверсивного стана 1680

Реверсивний стан 1680 включає робочу кліть типу «кварто» та комплекс допоміжного обладнання: підвідний похилий роликовий конвеєр, поворотний стіл, перекидач рулонів, розмотувач, роликову прес-проводку, дві барабанні моталки та пристрій для зняття рулонів. Загальний вигляд агрегату наведено на рисунку 2.



1 – розмотувач; 2 – моталки; 3 – обвідні ролики; 4 – робоча кліть.

Рисунок 23 - Реверсивний стан 1680

Привод робочих валків здійснюється від електродвигуна потужністю 1650 кВт (2250 к.с.) із регульованою частотою обертання в межах 300–600 об/хв. Передача крутного моменту відбувається через редуктор, суміщений із

шестеренною кліттю, з передаточним числом 3,21. Частота обертання робочих валків становить 93,5–187 об/хв.

Номінальний струм навантаження головного привода під час прокатки складає 3000 А.

Швидкісні характеристики стана:

- заправна швидкість – до 0,5 м/с;

- максимальна робоча швидкість – до 4,74 м/с.

Натискний механізм приводиться в дію двома електродвигунами потужністю по 60 кВт із частотою обертання 775 об/хв через редуктори з передаточним числом 1100:1. Швидкість переміщення натискних гвинтів становить 9,96 мм/хв.

Для забезпечення синхронної або незалежної роботи натискних гвинтів електродвигуни обладнані рознімною електромагнітною муфтою. Контроль їх переміщення здійснюється за допомогою продуктометрів, встановлених на постах керування №22 та №23.

Зрівноваження верхніх робочих і опорних валків забезпечується гідравлічною системою, яка працює під тиском 125 атм.

Робочі валки виготовлені суцільнокованими із загартованою поверхнею бочки, а опорні мають насадні бочки. Твердість поверхні валків за шкалою Шора (ОСТ 24.013.20-90) становить:

- робочі валки – 90–98 од.;
- опорні валки – 70–85 од.

Матеріали валків:

- робочі валки – сталь 60Х2СМФ;
- бочка опорних валків – сталь 9ХФ;
- серцевина опорних валків – сталь 40ХН2МА.

Таблиця 4 – Розміри валків реверсивного стана 1680

Найменування валків	Розміри, мм						Маса, т
	Бочки		Шийки		Трефи		
	Диаметр	Довжина	Диаметр	Довжина	Диаметр	Довжина	
Робочий	510/ 470	1680	260	250	250	260	3,32
Опорний	1420/ 1370	1760	890/ 734 конус	780	-	-	31,65

З обох боків робочої кліті встановлено дві моталки барабанного типу. Діаметр барабана кожної моталки становить 760 мм. Кожна моталка оснащена окремим електродвигуном потужністю 450 кВт. Частота обертання барабана змінюється від 28,5 до 104,37 об/хв.

Перед кліттю розташована роликова прес-проводка, яка складається із семи роликів діаметром 180 мм. Переміщення верхнього стола у вертикальному напрямку здійснюється пневмоциліндром діаметром 400 мм.

Для безперервного контролю товщини металу стан обладнаний двома радіоізотопними товщиномірами типу «РІУС ВТХ-3», розташованими по обидва боки робочої кліті.

Гідросистема високого тиску реверсивного стана працює при тиску масла 125 атм, що забезпечує стабільну роботу натискних і допоміжних механізмів агрегату.

3.2 Засоби контролю та вимірювальна апаратура

Контроль технологічних параметрів під час холодної прокатки металу на реверсивному стані 1680 здійснюється за допомогою комплексу контрольно-вимірювальних приладів. Використання сучасних засобів вимірювальної техніки забезпечує оперативний контроль режимів роботи обладнання, дотримання встановлених технологічних параметрів та стабільну якість готової продукції.

У процесі прокатки контролюються такі основні показники: товщина та ширина штаби, навантаження на електродвигуни головного привода, натискного механізму та моталок, діаметр і профіль валків, твердість та шорсткість їхньої поверхні, величина обтиснення, а також параметри системи насічки валків. Для вимірювання зазначених характеристик застосовуються амперметри, ізотопні товщиноміри, мікрометри, індикатори годинникового типу, твердоміри, профілометри, манометри та інші засоби контролю.

Перелік контрольованих параметрів, допустимих значень і відповідних засобів вимірювання наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 - Перелік засобів вимірювальної техніки, застосовуваних при холодній прокатуванні штаб на реверсивному стані 1680

Контрольовані параметри	Номінальне значення	Допустиме відхилення	Засоби вимірів	
			Найменування, тип	Межа виміру
1	2	3	4	5
Навантаження на двигун головного привода, А	не більше 3000	-	Амперметр М-367	0 - 8000
Товщина штаби, мм	0,5-2,0	Згідно НД	Ізотопний товщиномір «РІУС ВТХ-03» Мікрометр листовий МЛ-10	0,2-4,0 0-10
Величина опуклості бочки робочого валка, мм	-0,20 - +0,50	±0,01	Індикатор ІЧ-02 (пассометр)	0-2

Продовження таблиці 5

1	2	3	4	5
Навантаження на двигун натискного пристрою: при прокатуванні, А при настроюванні стана,А	н.б.300 20 - 50	-	Амперметр	0 - 500 0-1000
Діаметр бочки валка, мм	470-510	± 0,1	Мікрометр гладкий МК500, МК600	400-500 500-600
Величина опуклості бочки робочого валка, мм	- 0,20 + 0,50	±0,01	Індикатор ІЧ02 (пасометр)	0-2
Навантаження на двигун моталки (натяг штаби), А	не більше 800	-	Амперметр М-367	0-2000
Товщина штаби, мм	0,5–2,0	Згідно НД	Ізотопний товщиномір «РІУС ВТХ-03» Мікрометр листовий МЛ-10	0,2-4,0 0-10
Відстань між ризками при визначенні обтиснення, мм	500	-	Лінійка металева	0-1000
Твердість поверхні бочки валка, HSD	70 - 100	1,0 - 2,5	Твердометр Шора Д-2	0 - 120
Шорсткість робочих валків, мкм	4,0 - 5,0	-	Профілометр «Суртроник-3»	0-9,99
Тиск повітря при насічці робочих валків, атм	4,0 - 5,0	-	Манометр МП4-У	0 - 10
Ширина штаби, мм	940 - 1500	до +20	Рулетка вимірювальна РС	0-2000

3.3 Розрахунок режимів прокатки та визначення енергосилових показників процесу

Вихідними даними для розрахунку є штаба розміром 0,6×1030 мм зі сталі 08нс, яка прокатується на реверсивному стані 1680. Відповідно до технічних характеристик обладнання прийнято шорсткість поверхні робочих валків (R_a = 3,2) мкм, максимальну швидкість прокатки (V = 4,74) м/с та середній діаметр робочих валків 490 мм. Як мастильно-охолоджувальне середовище використовується емульсія мінерального мастила концентрацією близько 4 %.

Спочатку визначають сумарне відносне обтиснення та початкову товщину гарячекатаного підкату:

$$\varepsilon_{\Sigma} = x_a - x_{\text{в}} \cdot h,$$

де $x_a = 0.834$ і $x_{\text{в}} = 0.167$ - числові коефіцієнти

У результаті розрахунків отримано:

$$\varepsilon_{\Sigma} = 0.834 - 0.167\ 0{,}6 = 0.73$$

$$\text{H}_0 = \frac{h}{1 - \varepsilon_{\Sigma}} = \frac{0.6}{1 - 0.73} = 2.3 \text{ мм}$$

Сумарне абсолютне обтиснення становить:

$$\Delta \text{h}_{\Sigma} = \text{H}_0 - \text{h}_4 = 2.3 - 0.6 = 1.7 \text{ мм}.$$

Сумарне абсолютне обтиснення становить:

$$\Delta h_1 = 0.47 \cdot 1.7 = 0.80 \text{ мм}$$

$$\Delta h_2 = 0.29 \cdot 1.7 = 0.50 \text{ мм}$$

$$\Delta h_3 = 0.15 \cdot 1.7 = 0.25 \text{ мм}$$

$$\Delta h_4 = 0.09 \cdot 1.7 = 0.15 \text{ мм}$$

Перевірка:

$$\Delta h_{\Sigma} = 0.8 + 0.5 + 0.25 + 0.15 = \ 1.7 \text{ мм}$$

Знаходимо товщину штаби й відносне обтиснення по проходах:

$h_i = \ h_{i-1} - \Delta h_i$ $\qquad$ $\varepsilon_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{h_i}$

$h_1 = \ 2.3 - 0.8 = 1.5$ мм; $\qquad$ $\varepsilon_1 = \frac{2.3-1.5}{2.3} = 0.348$

$h_2 = \ 1{,}5 - 0.5 = 1.0$ мм; $\qquad$ $\varepsilon_2 = \frac{1.5-1.0}{1.5} = 0.333$

$h_3 = \ 1{,}0 - 0.25 = 0{,}75$ мм; $\qquad$ $\varepsilon_3 = \frac{1.0-0.75}{1.0} = 0.25$

$h_4 = \ 0{,}75 - 0.15 = 0{,}6$ мм. $\qquad$ $\varepsilon_4 = \frac{0.75-0.6}{0.75} = 0.20$

Знаходимо сумарне відносне обтиснення:

$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{h_0 - h_i}{h_0}$; $\qquad$ $\varepsilon_{\Sigma 1} = \frac{2{,}3-1{,}5}{2{,}3} = 0{,}348;$

$$\varepsilon_{\Sigma 2} = \frac{2{,}3 - 1{,}0}{2{,}3} = 0{,}565;$$

$$\varepsilon_{\Sigma 3} = \frac{2{,}3 - 0{,}75}{2{,}3} = 0{,}674;$$

$$\varepsilon_{\Sigma 4} = \frac{2{,}3 - 0{,}6}{2{,}3} = 0{,}739.$$

Після визначення абсолютних обтиснень розраховано товщину штаби та відносне обтиснення для кожного проходу. Отримані результати наведено в таблиці 6.

Таблиця 6 - Деформаційно - швидкісний режим прокатки штаби 2,3х0,6/1030 мм зі сталі марки Ст. 08 нс

Прохід	Товщина, мм		Обтиснення			Швидкість, м/с
	До проходу	Після проходу	Δh, мм	ε, %	εΣ, %	
1	2,3	1,5	0,80	34,8	34,8	3,50
2	1,5	1,0	0,50	33,3	56,5	4,00
3	1,0	0,75	0,25	25,0	67,4	4,74
4	0,75	0,6	0,15	20,0	73,9	4,74

Далі виконано визначення коефіцієнта тертя з урахуванням швидкості прокатки, ступеня деформації, шорсткості поверхні та температурного режиму процесу.

Коефіцієнт тертя дорівнює:

$$f = f_0 \cdot k_d \cdot k_n \cdot k_{см} \cdot k_t ,$$

де f0 – базовий коефіцієнт тертя; kd, kn, kсм, kt – поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиснення, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного змащення й початкову (перед проходом) температуру штаби.

Базовий коефіцієнт тертя дорівнює:

$$f_0 = 0,076 - 0,0019v + 0,031\left(Ra - 0,6\right)\left[\left(1,07 - 0,14v\right)^3 + 0,054v - 0.26\right]$$

Коефіцієнт kd дорівнює:

$$k_d = 0,5 + 1,77\varepsilon + 0,165R_n\left(1 - 3,33 \cdot \varepsilon\right)$$

Коефіцієнт k_v дорівнює: при $v < 8,0$ – $k_v = 1$;

Коефіцієнт k_nдорівнює:

$$k_{П} = 1{,}09 - 0{,}05 \cdot R_{an},$$

де R_{an} – шорсткість поверхні штаби.

Коефіцієнт k t визначимо по формулі

$$k_t = a + c\left(1{,}11 - 0{,}0044 \cdot t_{H}\right)^{n},$$

де tн – температура металу перед осередком деформації, °С; a, c, n – коефіцієнти, рівні для мінеральної емульсії та мастил:

$$a = 0{,}31 + 1{,}7 \cdot \varepsilon; \quad c = 1{,}2 - 2{,}8 \cdot \varepsilon; \quad n = 3{,}84 - 5{,}7 \cdot \varepsilon;$$

Коефіцієнт k см дорівнює: емульсія мінерального мастила – k см = = 1,0.

Для наведених вихідних даних (kсм =1,0; kv≈ 1; Rап = 3,2 мкм) одержимо:

$$f_0 = 0.076 - 0.0019 \cdot 3{,}5 \cdot (3.2 - 0.6) \cdot [(1.07 - 0.14 \cdot 3{,}5)^3 + 0.054 \cdot 3{,}5 - 0.26] = 0{,}079;$$

$$k_d = 0.5 + 1.77 \cdot 0.348 + 0.165 \cdot 3.2 \cdot (1 - 3.33 \cdot 0.348) = 1{,}03;$$

$$k_{\text{п}} = 1.09 - 0.05 \cdot 1.6 = 1{,}01.$$

Для нашого розрахунку в проході 1 приймаємо tн = 25°С. У наступних проходах початкову температуру штаби перед проходом варто приймати рівній кінцевій температурі tк у попередньому проході. Коефіцієнт kt:

$a = 0{,}31 + 1{,}7 \cdot 0{,}348 \approx 0{,}9;$

$c = 1{,}2 - 2{,}8 \cdot 0{,}348 \approx 0{,}23;$

$n = 3{,}84 - 5{,}7 \cdot 0{,}348 \approx 1{,}86;$

$$k_t = 0{,}9 + 0{,}23(1{,}11 - 0{,}0044 \cdot 25)^{1{,}86} = 1{,}13$$

Загальна величина коефіцієнта тертя становить (k_v≈ 1,0)

$$f = 0{,}079 \cdot 1{,}03 \cdot 1{,}01 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}13 = 0{,}09 .$$

Показник тертя дорівнює:

$f_{\text{п}} = 1{,}6f - 0{,}018 = 1{,}6 \cdot 0{,}09 - 0{,}018 = 0{,}13.$

За результатами розрахунків встановлено, що коефіцієнт тертя в процесі прокатки змінюється в межах 0,08–0,09, а показник тертя становить приблизно 0,12–0,13.

Наступним етапом визначено напругу плину металу. Для сталі марки 08нс розраховано вуглецевий еквівалент, базову напругу плину та її приріст унаслідок деформаційного зміцнення.

$$C_э = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4}.$$

Розрахунок показав, що зі збільшенням сумарного обтиснення відбувається закономірне зростання напруги плину металу, що обумовлено накопиченням деформаційного зміцнення в процесі холодної прокатки.

Для кожного проходу визначено:

- довжину дуги контакту;
- швидкість деформації;
- середній опір деформації металу;
- сили натягу;
- середню нормальну контактну напругу;
- силу прокатки;
- крутний момент;
- потужність приводу;
- температуру металу на виході з кліті.

Розрахунки виконано за наведеними залежностями.

Базове (вихідне після віджигу) напруга плину і його збільшення за рахунок зміцнення при $\varepsilon = 40\%$ відповідно рівні:

$$\sigma_{\text{те}}=210+263C_э; \qquad \Delta\sigma_{\text{т}}=209+460C_э.$$

для $\varepsilon_\Sigma = 0...0…0{,}4$

$$k_\varepsilon = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_\Sigma}{0{,}4}\right)^{1{,}5+C}$$

Напруга плину металу після проходу визначають по вираженню:

$$\sigma_{m1} = \sigma_{mo} + \Delta\sigma_m \cdot k_\varepsilon$$

Напруга плину розраховуємо при максимальному змісті хімічних елементів у сталі:

$$C_э = 0{,}08 + \frac{0{,}17}{24} + \frac{0{,}65}{6} + \frac{0{,}3}{40} + \frac{0{,}1}{5} = 0{,}22;$$

$$\sigma_{то} = 210 + 263 \cdot 0{,}22 = 268{,}63\ \frac{Н}{мм^2};$$

$$\Delta\sigma_т = 209 + 460 \cdot 0{,}22 = 311{,}54\frac{Н}{мм^2};$$

$$k_\varepsilon = 1 - \left(1 - \frac{0{,}348}{0.4}\right)^{1.75} = 0.96;$$

$$\sigma_{т1} = 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 0{,}96 = 567{,}77\frac{Н}{мм^2}.$$

У результаті впливу швидкості деформації й температури деформації напруга плину металу при холодній прокатуванні змінюється у порівнянні з отриманим. Відповідно до досліджень А. П. Грудєва і Ю. Б. Сігалова врахувати цей вплив пропонується спеціальними коефіцієнтами. Оскільки досліджували зміну напруги плину $\sigma_{0,2}$ без обліку ступеня деформації, то вираження для визначення σ_{T1} наприкінці осередку деформації варто записати таким чином:

$$\sigma'_{т1} = n_u \cdot n_t \cdot \sigma_{то} + \Delta\sigma_т \cdot k_\varepsilon$$

Напруга плину металу між проходами при відсутності деформації визначимо по формулі:

$$\sigma_{T1} = n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_m \cdot k_\varepsilon$$

Середній опір металу у осередку деформації дорівнює:

$$\sigma_\phi = 1{,}15\left[\sigma_{T(i-1)} + 0{,}67\left(\sigma'_{T1} - \sigma_{T(i-1)}\right)\right],$$

де $\sigma_{T(i-1)}$ - напруга плину металу перед проходом;$\sigma'_{т1}$ – напруга плину металу після проходу.

n_u та n_t визначаються з виражень:

$$n_u = 1 + 0{,}38\left(0{,}5 + \frac{\ln u}{13{,}8}\right)^2; \qquad n_t = 0{,}8 + 0{,}23\left(1 - \frac{t_н}{300}\right)^2.$$

Швидкість деформації визначаємо по вираженню:

$$u = \nu \cdot \varepsilon / l_c \ ,$$

де l_c – довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби.

Оскільки довжина дуги l_c поки невідома, її попередньо визначимо по формулі:

$$l_C = [1{,}3 + 4{,}1(\varepsilon_\Sigma - 0{,}2)^3]\sqrt{R\Delta h}.$$

Для прохода 1 маємо:

$$l_c = [1{,}3 + 4{,}1(0{,}348 - 0{,}2)^3] \cdot \sqrt{245 \cdot 0{,}8} = 18{,}4 \text{ мм};$$

$$u = 3500 \cdot \frac{0{,}348}{18{,}4} = 66{,}3\ c^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0{,}38\left(0{,}5 + \frac{\ln 66{,}3}{13{,}8}\right)^2 = 1{,}25;$$

$$n_t = 0{,}8 + 0{,}23\left(1 - \frac{25}{300}\right)^2 = 0{,}99;$$

$$\sigma'_{T1} = 1{,}25 \cdot 0{,}99 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 0{,}96 = 631{,}47 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{T1} = 0{,}99 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 0{,}96 = 565{,}96 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{\text{ф}} = 1{,}15[268{,}63 + 0{,}67(631{,}47 - 268{,}63)] = 588{,}50 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

Довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби дорівнює (сталеві валки):

$$l'_c = \frac{c + \sqrt{c^2 + 4R\Delta h\left(1 - c\frac{f_n}{2h_{cp}}\right)}}{2\left(1 - c\frac{f_n}{2h_{cp}}\right)};$$

$$\text{c} = \text{n}_{\text{ср}} \cdot \sigma_{\text{ф}} \frac{\text{R}}{47500};$$

$$\text{x}_2 = \text{n}_1 \cdot \sigma_{\text{ф1}} \frac{\text{R}}{95000};$$

$$l_c = l'_c + x_2,$$

де R – радіус твердого валка, R = 255 мм;$n_{ср}$ та n_1 – коефіцієнти, що враховують вплив середніх напруг натягу й напруги натягу переднього кінця штаби:

$$\text{n}_{\text{ср}} = 1 - \frac{\sigma_{\text{п}} + \sigma_{\text{з}}}{2\sigma_{\text{ф}}}; \qquad n_1 = 1 - \frac{\sigma_{П}}{\sigma_{ф1}},$$

де $\sigma_{\text{п}}$, $\sigma_{\text{з}}$ – напруги переднього й заднього натягів.

Напруги натягу змінюються в широких межах. Для реверсивного стана, для проходу 1 напруги рівні:

$$\sigma_З = 0{,}15\sigma_{Т0} = 0{,}15 \cdot 268{,}63 = 40{,}29\ {Н}/{мм^2};$$

$$\sigma_П = 0{,}15\sigma_{Т1} = 0{,}15 \cdot 567{,}77 = 85{,}16\ {Н}/{мм^2};$$

$$\sigma_{ф1} = 1{,}15\sigma'_{Т1} = 1{,}15 \cdot 631{,}47 = 726{,}20\ {Н}/{мм^2}.$$

$$n_{ср} = 1 - \frac{85{,}16 + 40{,}29}{2 \cdot 588{,}5} = 0{,}89;$$

$$n_1 = 1 - \frac{85{,}16}{726{,}2} = 0{,}88;$$

$$с = 0{,}89 \cdot 588{,}5 \cdot \frac{245}{47500} = 2{,}71 \text{ мм};$$

$$X_2 = 0{,}88 \cdot 726{,}2 \cdot \frac{245}{95000} = 1{,}65 \text{ мм}$$

$$h_{ср} = \sqrt{H \cdot h} = \sqrt{2{,}3 \cdot 1{,}5} = 1{,}86 \text{ мм}$$

Складова дуги контакту дорівнює:

$$l'_c = \frac{2.71\sqrt{2{,}71^2 + 4 \cdot 245 \cdot 0.8\left(1 - 2.71 \cdot \frac{0.13}{2 \cdot 1{,}86}\right)}}{2\left(1 - 2.71 \cdot \frac{0.13}{2 \cdot 1{,}86}\right)} = 16.3 \text{ мм}$$

Повна довжина дуги контакту дорівнює:

$$l_c = 16.3 + 1.65 = 17{,}9 \text{ мм},$$

що мало відрізняється від попереднього розрахунку й не вимагає перерахування.

Знаходимо енергосилові параметри прокатки. Середня нормальна контактна напруга дорівнює (f_n>0,12, C_H= 0,48)

$$p_{CP} = \sigma_Ф \left(n_{CP} + C_H \cdot f_П \cdot \frac{l_C}{h_{CP}} \right) \left(1 - \frac{x_2}{l_C} \right) + 0,5\sigma_Ф \cdot \frac{x_2}{l_C}$$

При $f_п$ = 0,13, коефіцієнт $C_H = 0,48$.Всі параметри відомі, то одержимо:

$$\text{P}_{\text{ср}} = 588,5 \cdot \left(0,89 + 0,48 \cdot 0,13 \cdot \frac{17,9}{1,86}\right)\left(1 - \frac{1,65}{17,9}\right) + 0,5 \cdot 588,5 \cdot \frac{1,65}{17,9} =$$

$$= 829,4\,{}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2}$$

Сила прокатки:

$$\text{P} = \text{P}_{\text{ср}} \cdot l_c \cdot B = 829,4 \cdot 0,0179 \cdot 1,03 = 15,3\ \text{МН}$$

Момент прокатки з урахуванням впливу натягу дорівнює (на двох валках)

$$M = 2\psi \cdot P \cdot l_C + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_3 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_3} \right)$$

де ψ – коефіцієнт положення рівнодіючих сил, при $\psi = 0,48$

$$\psi_{\text{c}} = \psi \left(\frac{l_d}{l_c} \right)^2 = 0.48 \left(\frac{\sqrt{245 \cdot 0,8}}{17,9} \right)^2 = 0.29$$

Крутний момент на двох валках дорівнює:

$$M = 2 \cdot 0.29 \cdot 15.3 \cdot 0,0179 + 2.3 \cdot 1030 \cdot 0,245 \cdot 40,29 \cdot$$

$$\cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{1,5}{2.3} \cdot 1 \cdot \frac{85,16}{40,29}\right) = 0,152\text{МН} \cdot \text{м}$$

Потужність на бочку валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot M \cdot \frac{V_1}{R} = 960 \cdot 0,152 \cdot \frac{3,5}{0,245} = 2083\text{кВт}$$

що менше потужності встановленого привода $N_{дв}$ = 4000 кВт.

Визначимо температуру t_K штаби на виході із кліті:

$$t_K = \varphi t_H + \Delta t ,$$

де $\Delta t -$ збільшення температури у осередку деформації по формулі А. П. Чекмарева й ін.:

$$\Delta t = 0{,}05m \cdot \left(p_{cp} + \sigma_{cp}\right) \ln H / h,$$

де m – коефіцієнт, для низьковуглецевої сталі дорівнює:

$$m = 2{,}2 - 0{,}65\left(\frac{t_H}{480} - 0{,}042\right)^{1{,}4}$$

Для наших умов одержимо:

$$m = 2{,}2 - 0{,}65 \cdot \left(\frac{25}{480} - 0{,}042\right)^{1.4} = 2{,}199;$$

$$\Delta t = 0{,}05 \cdot 2{,}199 \cdot (829{,}4 + 588{,}5) ln \frac{2{,}3}{1{,}5} = 6{,}7℃$$

$$t_к = \varphi \cdot \ 25 + 6{,}7 = 31{,}7℃ ,$$

де $\varphi -$ коефіцієнт, що враховує охолодження штаби на ділянці між проходами ($\varphi = 0{,}6...1{,}0$). У проході 1 коефіцієнт $\varphi = 1$.

Прохід 2. Визначимо параметри по алгоритму розрахунку для проходу 1:

$$f_0 = 0{,}076 - 0{,}0019 \cdot \ 4 + 0{,}031 \cdot (3{,}2 - 0{,}6) \cdot [(1{,}07 - 0{,}14 \cdot 4)^3 + +0{,}054 \cdot 4 - 0{,}26] = 0{,}076;$$

$$k_d = 0{,}5 + 1{,}77 \cdot 0{,}333 + 0{,}165 \cdot 3{,}2 \cdot (1 - 3{,}33 \cdot 0{,}333) = 1{,}03;$$

$$k_n = 1{,}09 - 0{,}05 \cdot 1{,}6 = 1{,}01.$$

Далі маємо (температуру $t_н$ приймаємо з розрахунку проходу 1 – $t_н$ = 31,7 °С при φ = 1,0):

a = 0,31 + 1,7·0,333 ≈ 0,88;

c = 1,2 – 2,8·0,333 ≈ 0,27;

n = 3,84 - 5,7(0,333 (1,94;

$$k_t = 0{,}88 + 0{,}27 \cdot (1{,}11 - 0{,}0044 \cdot 37{,}3)^{1{,}94} = 1{,}1$$

$$f \ = 0{,}076 \cdot 1{,}03 \cdot 1{,}01 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}1 = 0{,}09 \ .$$

$$f_{\text{п}} = 1{,}6 \cdot 0{,}09? \, 0{,}018 = 0{,}12.$$

Сумарне обтиснення у двох проходах дорівнює:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\text{H}_0 - h_2}{\text{H}_0} = \frac{2{,}3 - 1{,}0}{2{,}3} = 0{,}565$$

Вихідна напруга плину підкату $\sigma_{то}$ розраховано раніше й воно дорівнює $\sigma_{то}$ = 268,63 Н/мм^2. Зміцнення металу при ε_{Σ} = 0,4 також визначено раніше й воно дорівнює $\Delta\sigma_{то}$ = 311,54 Н/мм^2. Визначимо коефіцієнт зміцнення металу k_ε при ε_{Σ}> 0,4:

$$k_\varepsilon = 1 + 0{,}87(\varepsilon_{\Sigma} - 0{,}4)^{0.5} = 1 + 0{,}87(0{,}565 - 0{,}4)^{0.5} = 1{,}35;$$

$$l_c = [1{,}3 + 4{,}1(0{,}565 - 0{,}2)^3] \cdot \sqrt{245 \cdot 0{,}5} = 16{,}6 \text{ мм};$$

$$u = 4000 \cdot \frac{0{,}333}{16{,}6} = 80{,}3 \ c^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0{,}38\left(0{,}5 + \frac{\ln 80{,}3}{13{,}8}\right)^2 = 1{,}25;$$

$$n_t = 0{,}8 + 0{,}23\left(1 - \frac{31{,}7}{300}\right)^2 = 0{,}98;$$

$$\sigma'_{T1} = 1{,}25 \cdot 0{,}98 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 1{,}35 = 753{,}2 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{T1} = 0{,}97 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 1{,}35 = 686{,}0 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{\text{ф}} = 1{,}15[565{,}96 \cdot 0{,}97 + 0{,}67(753{,}2 - 565{,}96 \cdot 0{,}97)] = 791{,}7 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

Задній і передній натяг штаби в проході 2 й інші параметри рівні:

$$\sigma_{\text{З}} = 0{,}15 \cdot 565{,}96 = 84{,}9 \ {}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{\text{П}} = 0{,}15 \cdot 686{,}0 = 103{,}6 \ {}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2};$$

$$n_{\text{ср}} = 1 - \frac{84{,}9 + 103{,}6}{2 \cdot 791{,}7} = 0{,}88;$$

$$n_1 = 1 - \frac{103{,}6}{791{,}7} = 0{,}87;$$

Допоміжні параметри й довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби (валки сталеві):

$$\text{с} = 0{,}88\ 791{,}7 \cdot \frac{245}{47500} = 3{,}6 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\text{ф1}} = 1{,}15 \cdot 753{,}2 = 789{,}0 \ {}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2}.$$

$$\text{X}_2 = 0{,}87 \cdot 789{,}0 \cdot \frac{245}{95000} = 1{,}8 \text{ мм}$$

$$h_{\text{ср}} = \sqrt{\text{Н} \cdot h} = \sqrt{1{,}5 \cdot 1{,}0} = 1{,}22 \text{ мм}$$

$$l_c' = \frac{3{,}55\sqrt{3{,}55^2 + 4 \cdot 245 \cdot 0.5\left(1 - 3{,}55 \cdot \frac{0.13}{2 \cdot 1{,}22}\right)}}{2\left(1 - 3{,}55 \cdot \frac{0.13}{2 \cdot 1{,}22}\right)} = 16{,}0 \text{ мм}$$

$$l_c = 16{,}0 + 1.8 = 17{,}8 \text{ мм}$$

Знаходимо енергосилові параметри:

$$\mathrm{P_{ср}} = 791{,}7 \cdot \left(0{,}88 + 0{,}48 \cdot 0{,}12 \cdot \frac{17{,}8}{1{,}22}\right)\left(1 - \frac{1{,}8}{17{,}8}\right) + 0{,}5 \cdot 791{,}7 \cdot \frac{1{,}8}{17{,}8} =$$

$$= 1282{,}0\,{}^{\mathrm{Н}}/_{\mathrm{мм}^2}$$

$$\mathrm{P} = \mathrm{P_{ср}} \cdot l_c \cdot B = 1282{,}0 \cdot 0{,}0178 \cdot 1{,}03 = 23{,}4\mathrm{МН}$$

$$\psi_{\mathrm{c}} = \psi\left(\frac{l_d}{l_c}\right)^2 = 0.48\left(\frac{\sqrt{245 \cdot 0{,}5}}{17{,}8}\right)^2 = 0.19$$

$$M = 2 \cdot 0.19 \cdot 23{,}4 \cdot 0{,}0178 + 1{,}5 \cdot 1030 \cdot 0{,}245 \cdot 84{,}9 \cdot$$

$$\cdot 10^{-6}\left(1 - \frac{1{,}0}{1{,}5} \cdot 1 \cdot \frac{103{,}6}{84{,}9}\right) = 0{,}161\mathrm{МН} \cdot \mathrm{м}$$

Потужність на бочку валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot M \cdot \frac{V_2}{R} = 960 \cdot 0{,}161 \cdot \frac{4{,}0}{0{,}245} = 2528\mathrm{кВт}$$

$$m = 2{,}2 - 0{,}65 \cdot \left(\frac{45{,}9}{480} - 0{,}042\right)^{1.4} = 2{,}2;$$

$$\Delta t = 0{,}05 \cdot 2{,}2 \cdot (1282{,}0 + 791{,}7) ln\frac{1{,}5}{1{,}0} = 9{,}2℃$$

$$t_{\mathrm{к}} = 31{,}7 + 9{,}2 = 40{,}9℃$$

Прохід 3.

$$f_0 = 0{,}076 - 0{,}0019 \cdot\ 4{,}74 + 0{,}031 \cdot (3{,}2 - 0{,}6) \cdot [(1{,}07 - 0{,}14 \cdot 4{,}74)^3 +$$

$$0{,}054 \cdot 4{,}74 - 0{,}26] = 0{,}072;$$

$$k_d = 0{,}5 + 1{,}77 \cdot 0{,}25 + 0{,}165 \cdot 3{,}2 \cdot (1 - 3{,}33 \cdot 0{,}25) = 1{,}03;$$

$$k_n = 1.09 - 0.05 \cdot 1.6 = 1{,}01.$$

Далі маємо (температуру $t_н$ приймаємо з розрахунку проходу 2 – $t_н$ = 40,9°С при φ = 1,0):

a = 0,31 + 1,7·0,25 ≈ 0,74;

c = 1,2 – 2,8·0,25 ≈ 0,5;

n = 3,84 - 5,7(0,25 (2,42;

$$k_t = 0{,}748 + 0{,}5 \cdot (1{,}11 - 0{,}0044 \cdot 40{,}9)^{2{,}42} = 1{,}15$$

$$f \ = 0{,}072 \cdot 1{,}03 \cdot 1{,}01 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}15 = 0{,}09\ .$$

$$f_{\text{п}} = 1{,}6 \cdot 0{,}09 - 0{,}018 = 0{,}12.$$

Сумарне обтиснення в трьох проходах дорівнює:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\text{H}_0 - h_3}{\text{H}_0} = \frac{2{,}3 - 0{,}75}{2{,}3} = 0{,}674;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0{,}87(0{,}674 - 0{,}4)^{0.5} = 1{,}46;$$

$$l_c = [1{,}3 + 4{,}1(0{,}674 - 0{,}2)^3] \cdot \sqrt{245 \cdot 0{,}25} = 13{,}6 \text{ мм};$$

$$u = 4740 \cdot \frac{0{,}25}{13{,}6} = 87{,}2\ c^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0{,}38\left(0{,}5 + \frac{\ln 87{,}2}{13{,}8}\right)^2 = 1{,}26;$$

$$n_t = 0{,}8 + 0{,}23\left(1 - \frac{40{,}9}{300}\right)^2 = 0{,}97;$$

$$\sigma'_{T1} = 1{,}26 \cdot 0{,}97 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 1{,}46 = 781{,}7 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{T1} = 0{,}97 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 1{,}46 = 714{,}4 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{\text{ф}} = 1{,}15[686{,}0 \cdot 0{,}97 + 0{,}67 \cdot (781{,}7 - 686{,}0 \cdot 0{,}97)] = 855{,}2 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

Задній і передній натяг штаби в проході 3 й інші параметри рівні:

$$\sigma_{\text{З}} = 0{,}15 \cdot 686{,}0 = 102{,}9\ {}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2};$$

$$\sigma_{\text{П}} = 0{,}15 \cdot 722{,}0 = 108{,}3\ {}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2};$$

$$n_{\text{ср}} = 1 - \frac{102{,}9 + 108{,}3}{2 \cdot 714{,}4} = 0{,}88;$$

$$n_1 = 1 - \frac{108{,}3}{855{,}2} = 0{,}87;$$

Допоміжні параметри й довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби (валки сталеві):

$$\text{с} = 0{,}88\ 855{,}2 \cdot \frac{245}{47500} = 3{,}9 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\text{ф}} = 1{,}15 \cdot 714{,}4 = 821{,}5\ {}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2}.$$

$$\text{X}_2 = 0{,}87 \cdot 821{,}5 \cdot \frac{245}{95000} = 1{,}85 \text{ мм}$$

$$h_{\text{ср}} = \sqrt{\text{Н} \cdot h} = \sqrt{1{,}0 \cdot 0{,}75} = 0{,}87 \text{ мм}$$

$$l_c' = \frac{3{,}9\sqrt{3{,}9^2 + 4 \cdot 245 \cdot 0.25\left(1 - 3{,}9 \cdot \frac{0.13}{2 \cdot 0{,}87}\right)}}{2\left(1 - 3{,}9 \cdot \frac{0.13}{2 \cdot 0{,}87}\right)} = 13{,}4 \text{ мм}$$

$$l_c = 13{,}4 + 1.85 = 15{,}25 \text{ мм}$$

Знаходимо енергосилові параметри:

$$\text{Р}_{\text{ср}} = 855{,}2 \cdot \left(0{,}88 + 0{,}48 \cdot 0{,}12 \cdot \frac{15{,}25}{0{,}87}\right)\left(1 - \frac{1{,}85}{15{,}25}\right) + 0{,}5 \cdot 855{,}2 \cdot$$

$$\cdot \frac{1{,}85}{15{,}25} = 1476{,}8\ {}^{\text{Н}}/_{\text{мм}^2}$$

$$\text{Р} = 1476{,}8 \cdot\ 0{,}01525 \cdot\ 1{,}03 = 23{,}2\text{МН}$$

$$\psi_{\text{с}} = 0.48\left(\frac{\sqrt{245 \cdot 0{,}25}}{15{,}25}\right)^2 = 0.13;$$

$$M = 2 \cdot 0.13 \cdot 23{,}2 \cdot 0{,}01525 + 0{,}75 \cdot 1030 \cdot 0{,}245 \cdot 102{,}9 \cdot$$

$$\cdot 10^{-6}\left(1 - \frac{0{,}75}{1{,}0} \cdot 1 \cdot \frac{108{,}3}{102{,}9}\right) = 0{,}095\text{МН} \cdot \text{м}$$

Потужність на бочку валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot 0{,}0{,}95 \cdot \frac{4{,}74}{0{,}245} = 1763\text{кВт}$$

$$m = 2{,}2 - 0{,}65 \cdot \left(\frac{40{,}9}{480} - 0{,}042\right)^{1.4} = 2{,}192;$$

$$\Delta t = 0{,}05 \cdot 2{,}192 \cdot (1476{,}8 + 855{,}2) ln \frac{1{,}0}{0{,}75} = 7{,}4°\text{C}$$

$$t_{\text{к}} = 40{,}9 + 7{,}4 = 48{,}3°\text{C}$$

Прохід 4.

$f_0 = 0{,}076 - 0{,}0019 \cdot \ 4{,}74 + 0{,}031 \cdot (3{,}2 - 0{,}6) \cdot [(1{,}07 - 0{,}14 \cdot 4{,}74)^3 +$
$0{,}054 \cdot 4{,}74 - 0{,}26] = 0{,}072;$

$$k_d = 0{,}5 + 1{,}77 \cdot 0{,}2 + 0{,}165 \cdot 3{,}2 \cdot (1 - 3{,}33 \cdot 0{,}2) = 1{,}03;$$

$$k_n = 1.09 - 0.05 \cdot 1.6 = 1{,}01.$$

Далі маємо (температуру $t_н$ приймаємо з розрахунку проходу 3 – $t_н$ = 48,3°Із при φ = 1,0):

a = 0,31 + 1,7·0,2 ≈ 0,65;

c = 1,2 – 2,8·0,2 ≈ 0,64;

n = 3,84 - 5,7(0,2 (2,7;

$$k_t = 0{,}65 + 0{,}65 \cdot (1{,}11 - 0{,}0044 \cdot 48{,}3)^{2{,}7} = 1{,}13$$

$$f \ = 0{,}072 \cdot 1{,}03 \cdot 1{,}01 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}13 = 0{,}08\ .$$

$$f_{\text{п}} = 1{,}6 \cdot 0{,}08 - 0{,}018 = 0{,}12.$$

Сумарне обтиснення в чотирьох проходах дорівнює:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\mathrm{H}_0 - h_4}{\mathrm{H}_0} = \frac{2{,}3 - 0{,}6}{2{,}3} = 0{,}739;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0{,}87(0{,}739 - 0{,}4)^{0.5} = 1{,}51;$$

$$l_c = [1{,}3 + 4{,}1(0{,}739 - 0{,}2)^3] \cdot \sqrt{245 \cdot 0{,}15} = 11{,}8 \text{ мм};$$

$$u = 4740 \cdot \frac{0{,}15}{11{,}8} = 80{,}5\ c^{-1};$$

$$n_u = 1 + 0{,}38\left(0{,}5 + \frac{\ln 80{,}5}{13{,}8}\right)^2 = 1{,}25;$$

$$n_t = 0{,}8 + 0{,}23\left(1 - \frac{48{,}3}{300}\right)^2 = 0{,}96;$$

$$\sigma'_{T1} = 1{,}25 \cdot 0{,}96 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 1{,}51 = 793{,}5\ {}^{\mathrm{Н}}/_{\mathrm{мм}^2};$$

$$\sigma_{T1} = 0{,}96 \cdot 268{,}63 + 311{,}54 \cdot 1{,}51 = 727{,}8\ {}^{\mathrm{Н}}/_{\mathrm{мм}^2};$$

$$\sigma_{\text{ф}} = 1{,}15[714{,}4 \cdot 0{,}96 + 0{,}67 \cdot (793{,}5 - 714{,}4 \cdot 0{,}96)] = 872{,}2\ {}^{\mathrm{Н}}/_{\mathrm{мм}^2}.$$

Задній і передній натяг штаби в проході 4 й інші параметри рівні:

$$\sigma_{\text{З}} = 0{,}15 \cdot 714{,}4 = 107{,}2\ {}^{\mathrm{Н}}/_{\mathrm{мм}^2};$$

$$\sigma_{\text{П}} = 0{,}15 \cdot 738{,}0 = 110{,}7\ {}^{\mathrm{Н}}/_{\mathrm{мм}^2};$$

$$n_{\text{ср}} = 1 - \frac{107{,}2 + 110{,}7}{2 \cdot 872{,}2} = 0{,}88;$$

$$n_1 = 1 - \frac{110{,}7}{872{,}2} = 0{,}87.$$

Допоміжні параметри й довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби (валки сталеві):

$$c = 0{,}88\,872{,}2 \cdot \frac{245}{47500} = 3{,}9 \text{ мм};$$

$$\sigma_ф = 1{,}15 \cdot 727{,}8 = 837{,}0 \ {}^{Н}/_{мм^2}.$$

$$X_2 = 0{,}87 \cdot 837{,}0 \cdot \frac{245}{95000} = 1{,}88 \text{ мм}$$

$$h_{ср} = \sqrt{H \cdot h} = \sqrt{0{,}75 \cdot 0{,}6} = 0{,}67 \text{ мм}$$

$$l'_c = \frac{3{,}9\sqrt{3{,}9^2 + 4 \cdot 245 \cdot 0.15\left(1 - 3{,}9 \cdot \frac{0.12}{2 \cdot 0{,}67}\right)}}{2\left(1 - 3{,}9 \cdot \frac{0.12}{2 \cdot 0{,}67}\right)} = 12{,}0 \text{ мм}$$

$$l_c = 12{,}0 + 1.88 = 13{,}88 \text{ мм}$$

Знаходимо енергосилові параметри:

$$P_{ср} = 872{,}2 \cdot \left(0{,}88 + 0{,}48 \cdot 0{,}12 \cdot \frac{13{,}88}{0{,}67}\right)\left(1 - \frac{1{,}88}{13{,}88}\right) + 0{,}5 \cdot 872{,}2 \cdot$$

$$\cdot \frac{1{,}88}{13{,}88} = 1598{,}4 \ {}^{Н}/_{мм^2}$$

$$P = 1598{,}4 \cdot \ 0{,}01388 \cdot \ 1{,}03 = 22{,}9МН$$

$$\psi_c = 0.48\left(\frac{\sqrt{245 \cdot 0{,}15}}{13{,}88}\right)^2 = 0.09;$$

$$M = 2 \cdot 0.09 \cdot 22{,}9 \cdot 0{,}01388 + 0{,}6 \cdot 1030 \cdot 0{,}245 \cdot 107{,}2 \cdot$$

$$\cdot 10^{-6}\left(1 - \frac{0{,}6}{0{,}75} \cdot 1 \cdot \frac{110{,}7}{107{,}2}\right) = 0{,}062МН \cdot м$$

Потужність на бочку валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot 0{,}0{,}62 \cdot \frac{4{,}74}{0{,}245} = 1144\text{кВт}$$

$$m = 2{,}2 - 0{,}65 \cdot \left(\frac{48{,}3}{480} - 0{,}042\right)^{1.4} = 2{,}188;$$

$$\Delta t = 0{,}05 \cdot 2{,}188 \cdot (1598{,}4 + 872{,}2) ln \frac{0{,}75}{0{,}6} = 6{,}0\text{°C}$$

$$t_{\text{к}} = 48{,}3 + 6{,}0 = 54{,}3\text{°C}$$

Отримані результати свідчать, що найбільша сила прокатки виникає у другому та третьому проходах і становить понад 23 МН. Максимальна потужність головного приводу досягає 2528 кВт, що не перевищує встановленої потужності електродвигуна стана. У процесі прокатки температура штаби поступово підвищується від 25 до 54,3 °С внаслідок пластичної деформації металу.

Узагальнені результати розрахунку режиму прокатки наведені в таблиці 7.

Таблиця 7– Розрахункові параметри прокатки штаби 0,6 · 1030мм

№ проходу	h, мм	Δh, мм	$\sigma_ф$, Н/мм^2	l_c, мм	$P_ф$, Н/мм^2	P, МН	ψ	M, МН·м	N, кВт	V, м/с	$t_к$, °С	$f_п$
1	2,3	0,8	588,5	17,9	829,4	15,3	0,29	0,152	2083	3,5	31,7	0,13
2	1,5	0,5	791,7	17,7	1282,0	23,4	0,19	0,161	2528	4,0	40,9	0,12
3	0,75	0,25	855,2	15,3	1476,8	23,2	0,13	0,095	1763	4,74	48,3	0,12
4	0,6	0,15	872,2	13,9	1598,4	22,9	0,09	0,062	1144	4,74	54,3	0,12

Для наочного аналізу результатів побудовано графічні залежності зміни основних параметрів процесу прокатки (рисунки 24–31)

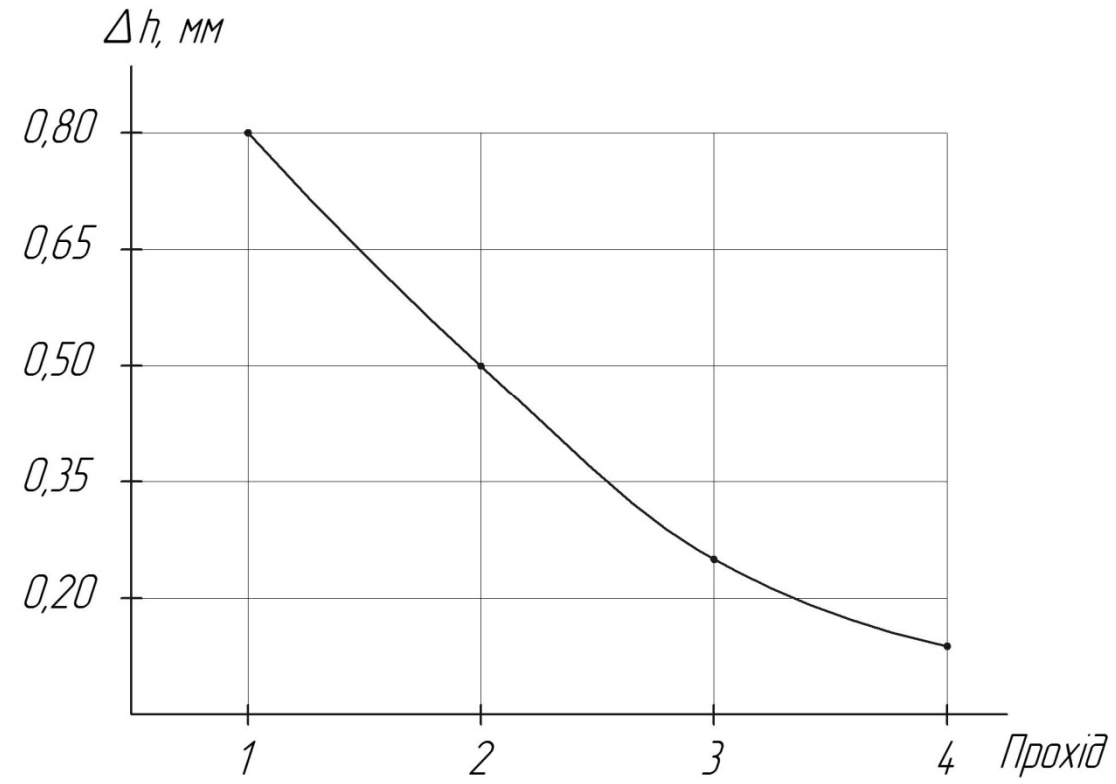


Рисунок 24 – Розподіл абсолютного обтиснення по проходах

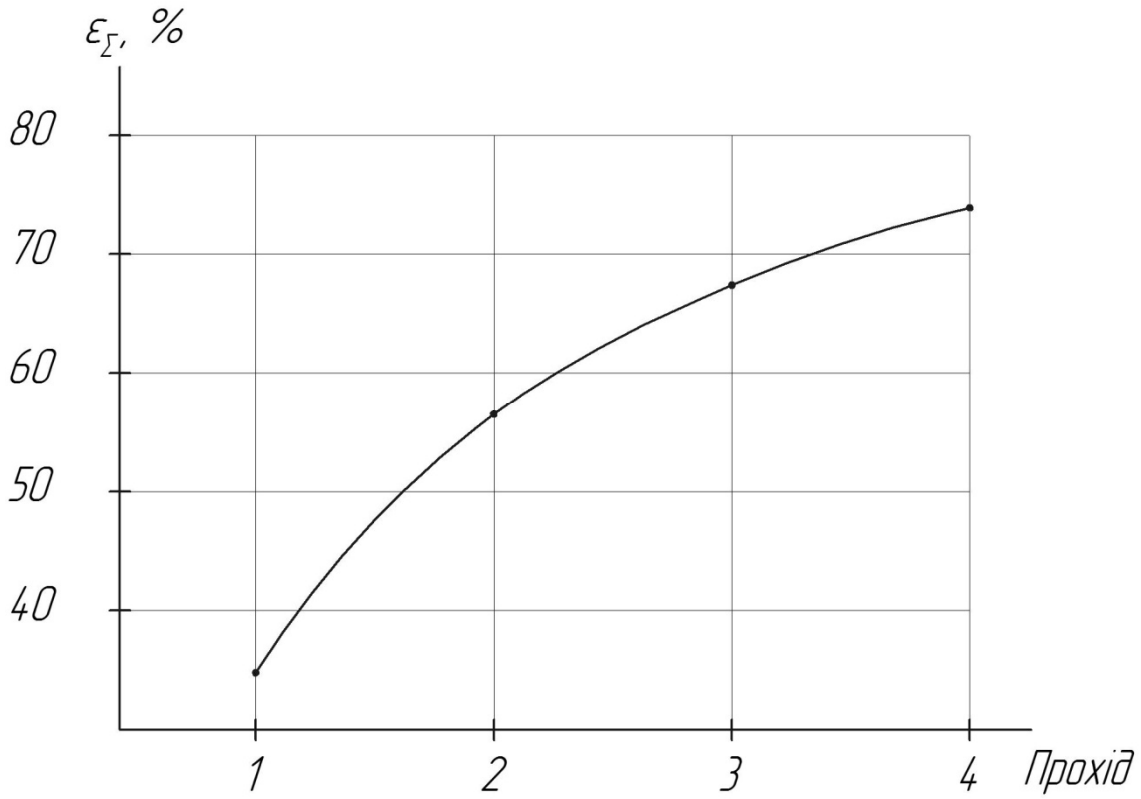


Рисунок 25 – Розподіл сумарного відносного обтиснення по проходах

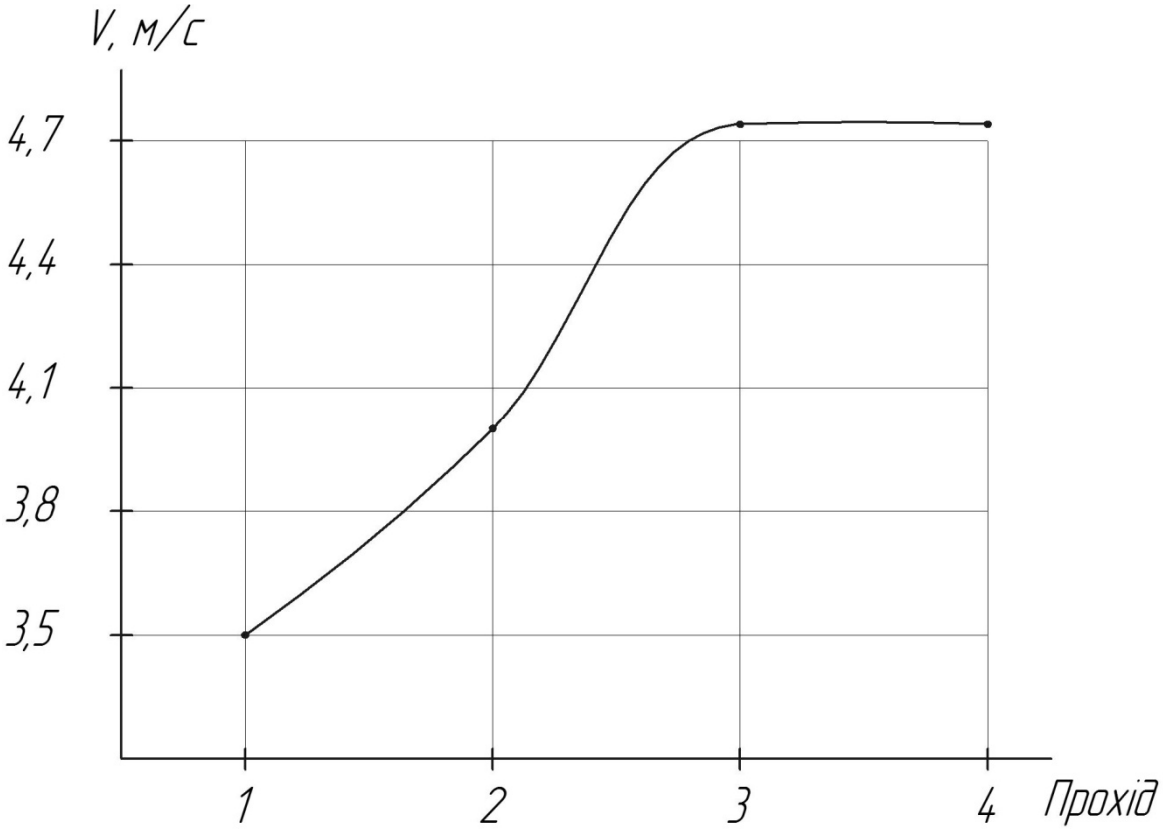


Рисунок 26 – Розподіл швидкості прокатки по проходах

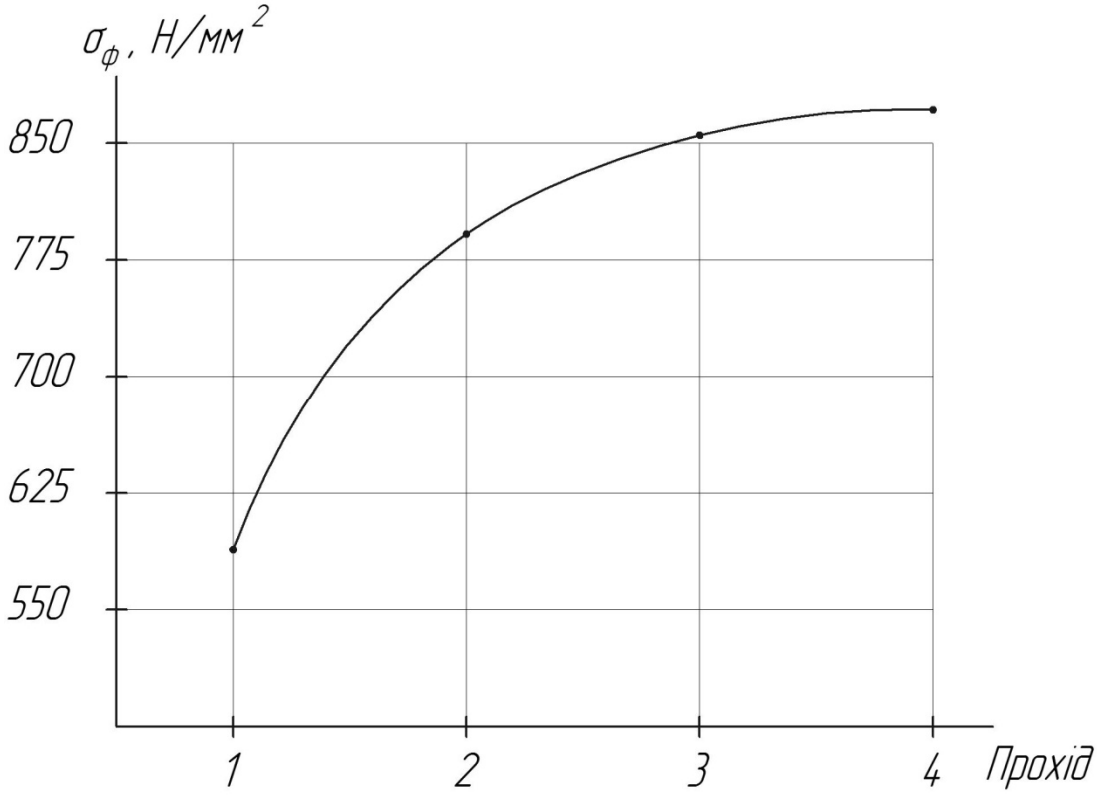


Рисунок 27 – Зміна середнього опору металу в осередку деформації

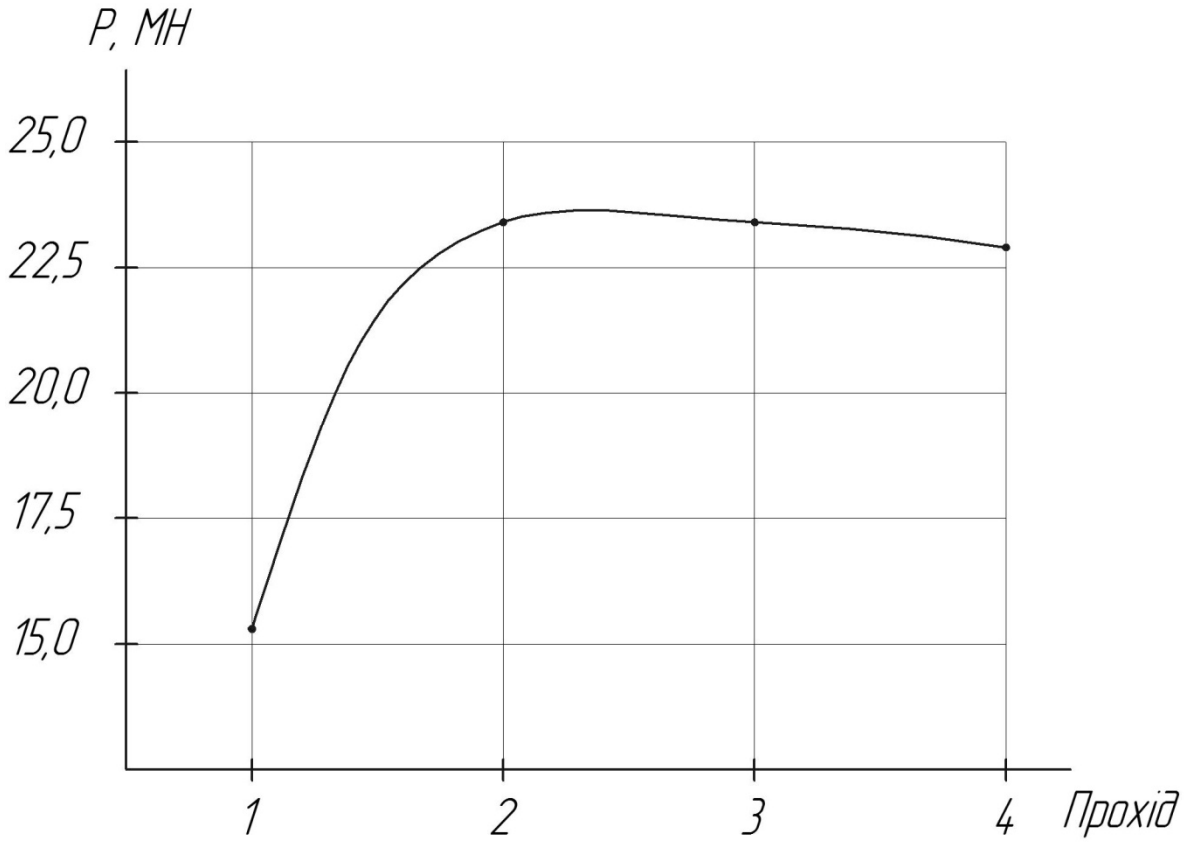


Рисунок 28 – Розподіл сили прокатки по проходах

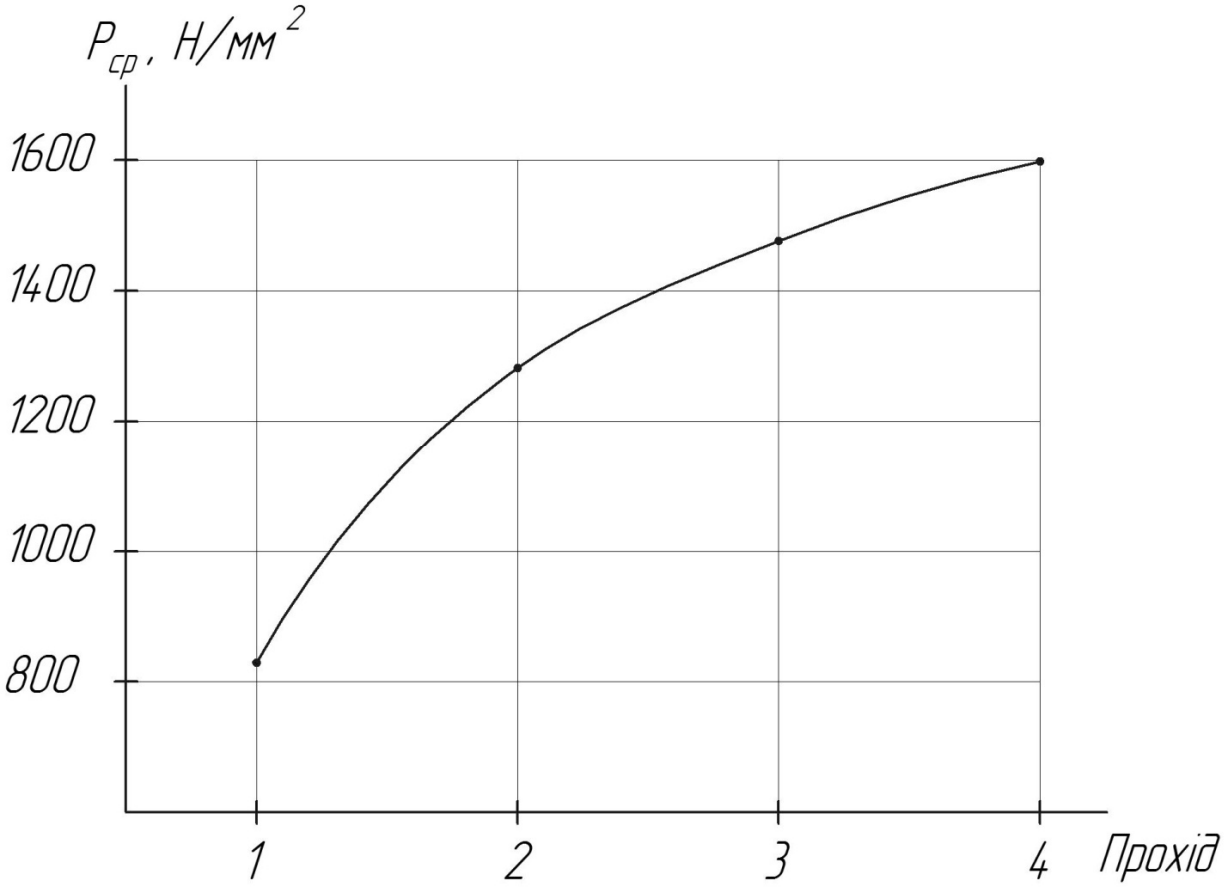


Рисунок 29 – Розподіл середньої нормальної контактної напруги

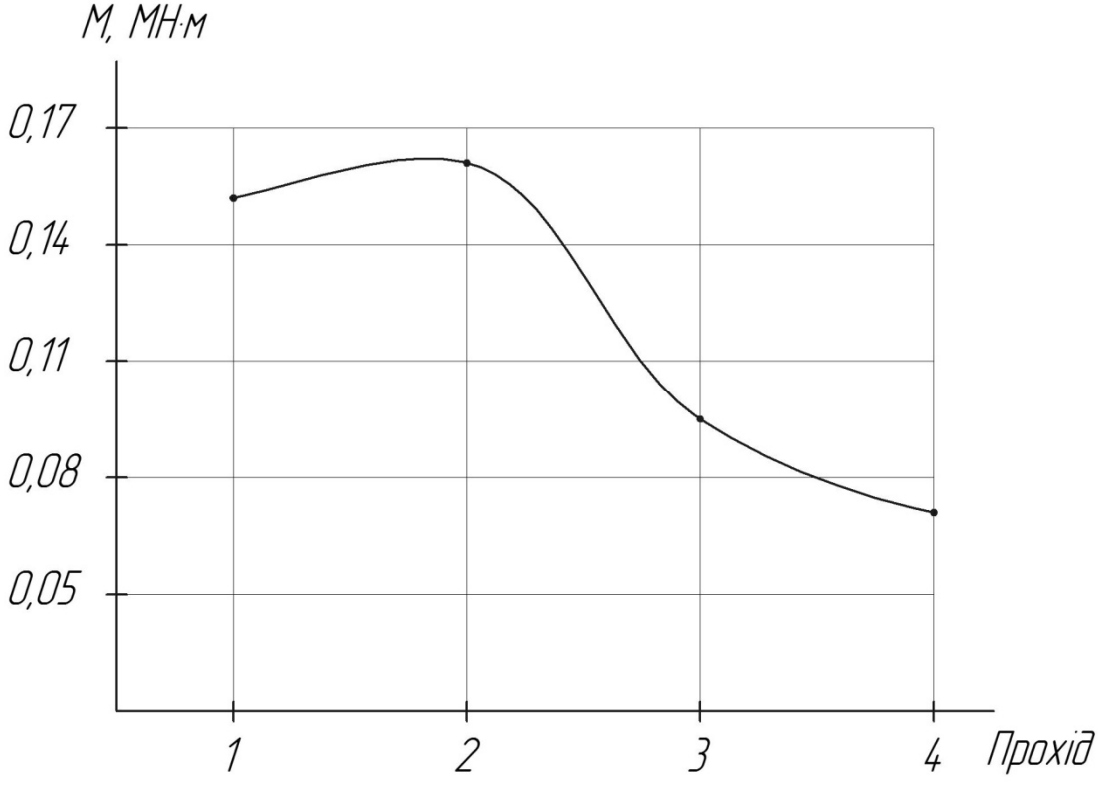


Рисунок 30 – Зміна крутного моменту по проходах

Розділ 4

Охорона праці та техногенна безпека

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів цеху холодної прокатки під час проведення досліджень

Робота в умовах прокатного виробництва характеризується наявністю комплексу шкідливих та небезпечних виробничих чинників, які можуть негативно впливати на здоров’я та безпеку працівників. До основних несприятливих факторів належать інтенсивне теплове випромінювання від технологічного обладнання (конвертерів, установок «піч-ківш», машин безперервного лиття заготовок), а також від розплавленого металу і шлаку. Значну небезпеку становлять газові та пилові викиди, що виникають під час продування конвертера, транспортування сипких матеріалів, заливання чавуну в конвертер і випуску сталі та шлаку [32].

До джерел підвищеної небезпеки в конвертерному цеху належать рухомі та обертові елементи машин і механізмів, вантажопідіймальне обладнання, потоки рідкого металу й шлаку, а також електротехнічне устаткування.

Технологічний процес прокатки сталі в супроводжується можливими викидами металу та шлаку. Під час продування утворюється значна кількість гарячих газів і дрібнодисперсного пилу, що погіршує санітарно-гігієнічні умови праці.

Основними джерелами теплового впливу є розплавлений метал, шлак, нагріті поверхні конвертерів, сталерозливних і чавуновозних ковшів, шлакових чаш, а також футерівка технологічних агрегатів. У розливному відділенні додатковим джерелом тепловиділення виступає метал, що надходить до машин безперервного лиття заготовок. Інтенсивність теплового випромінювання на робочих місцях може змінюватися в широких межах — від 300 до 9000 Вт/м². Найбільших теплових навантажень зазнає персонал під

час відбору проб металу, вимірювання температури, огляду та ремонту горловини конвертера [32].

У процесі продування, а також під час сушіння відремонтованих агрегатів і сталерозливних ковшів у виробничі приміщення можуть надходити токсичні гази. В окремих випадках їх концентрація перевищує встановлені санітарні нормативи. Найбільший вміст оксиду вуглецю та діоксиду сірки спостерігається на робочих майданчиках над діючими поблизу газопальникового обладнання котлів-утилізаторів.

Запиленість повітря робочої зони також є суттєвою проблемою. Концентрація пилу в конвертерних газах зазвичай становить від 50 до 300 г/м³. Основну частину пилових частинок складають оксиди заліза, вміст яких досягає 60–65 %. Крім того, пил містить оксиди марганцю, кремнію, кальцію, алюмінію та інші сполуки. Близько 80 % частинок мають розмір менше 0,5 мкм, що сприяє їх тривалому перебуванню в повітрі та поширенню на значні відстані [33].

Додатковими джерелами пиловиділення є шихтові матеріали та вогнетривка кладка ковшів, яка руйнується під час ремонтних робіт. У міксерних відділеннях пил і гази інтенсивно виділяються під час заповнення міксерів чавуном і його подальшого зливання. Встановлено, що на кожний метр кубічний чавуну, пропущеного через міксер, через аераційні ліхтарі в атмосферу надходить приблизно 60 г пилу та близько 370 г оксиду вуглецю.

Важливими несприятливими факторами виробничого середовища є також шум і вібрація. Джерелами шуму виступають, силові трансформатори, залізничні крани, транспортні механізми та інше технологічне обладнання. Залежно від виробничої ділянки рівень шуму може перевищувати 100 дБ. Вібраційні навантаження формуються переважно тими самими агрегатами, що генерують підвищений шумовий фон.

4.2 Розроблення заходів щодо захисту працівників від дії небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища цеху холодної прокатки.

Промисловий пил негативно впливає на організм людини, подразнюючи шкіру, слизові оболонки очей, органи слуху та дихання. Тривале перебування в запиленому середовищі може спричиняти розвиток професійних захворювань, зокрема силікозу, силікатозу, антракозу та інших патологій органів дихання [33].

Для зниження концентрації пилу та шкідливих газів у холодної прокатки цеху передбачено використання сучасних пилогазоочисних установок, а також ефективної системи припливно-витяжної вентиляції. Важливим заходом є герметизація технологічних операцій, пов’язаних із просіюванням, змішуванням і транспортуванням сипких матеріалів, а також застосування аспіраційних систем безпосередньо в місцях утворення пилу.

Одним із суттєвих виробничих факторів є підвищений рівень шуму. Його тривалий вплив може викликати погіршення слуху, а також негативно позначатися на роботі серцево-судинної та нервової систем. Для захисту персоналу від шумового навантаження здійснюється звукоізоляція постів керування, побутових і службових приміщень. Зменшення шуму від роботи насосів, електродвигунів та іншого обладнання забезпечується встановленням спеціальних звукоізолювальних кожухів із листової сталі товщиною 2–3 мм, внутрішня поверхня яких облицьовується звукопоглинальними матеріалами. Для зниження шуму в повітро- та газопроводах використовуються глушники.

Значну небезпеку для працівників становить надлишкове теплове випромінювання, яке може порушувати процеси терморегуляції організму та призводити до перегрівання. Для видалення надлишкового тепла в цеху застосовується природна аерація через два аераційні ліхтарі, розташовані на

покрівлі будівлі. Додатковим заходом поліпшення умов праці є організація повітряного душування на робочому місці конвертерника, що сприяє підтриманню допустимого теплового режиму та підвищенню комфортності праці.

4.3 Заходи з електробезпеки

Електрогосподарство цеху холодної прокатки включає широкий спектр обладнання. До його складу входять синхронні та асинхронні електродвигуни змінного струму, силові установки та інші електроприймачі з робочою напругою понад 1000 В, а також електродвигуни, системи керування, кранове обладнання й внутрішньоцехові електричні мережі напругою до 1000 В.

Основними елементами електрообладнання конвертерного виробництва є пічні трансформатори, автоматичні вимикачі, короткі електричні мережі, автоматизовані системи регулювання положення кисневої фурми та інші електротехнічні пристрої.

Потенційна небезпека ураження електричним струмом пов’язана з експлуатацією електроприводів, пускорегулювальної апаратури, підйомно-транспортних механізмів, електрифікованого внутрішньозаводського транспорту, зварювального обладнання, освітлювальних установок і ручного електроінструменту.

Під час роботи електродвигунів закритого типу існує ризик випадкового контакту з струмопровідними частинами, що підводяться до клемної коробки. У разі пошкодження ізоляції або відсутності належного захисту корпус двигуна може опинитися під напругою. Через значну площу контакту це створює підвищену загрозу тяжкого ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу [34].

Для електромереж напругою до 1000 В у киснево-конвертерному цеху застосовується чотирипровідна система трифазного струму з глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220 В. З метою забезпечення безпечної експлуатації використовуються спеціальні електрозахисні засоби: ізолювальні штанги для виконання робіт на високовольтних роз’єднувачах, ізолювальні кліщі для заміни запобіжників, а також діелектричні килимки зі спеціальної гуми. Для електроустановок до 1000 В товщина таких килимків становить 3–5 мм, а для установок понад 1000 В — 7–8 мм.

Одним із найефективніших способів запобігання ураженню електричним струмом є захисне заземлення. Тому всі металеві конструкції, корпуси машин, механізмів та електрообладнання цеху підлягають обов’язковому заземленню, що суттєво знижує ризик виникнення небезпечної напруги на їх поверхні [34].

4.4 Заходи з пожежної та техногенної безпеки

Відповідно до вимог пожежної безпеки окремі дільниці цеху холодної прокатки належать до різних категорій за рівнем вибухопожежної та пожежної небезпеки. Прокатне відділення і розливний проліт відносяться до категорії А, система очищення газів, міксерне відділення та завантажувальний проліт — до категоріїБ, а відділення підготовки шихтових матеріалів — до категорії Г.

Основними причинами виникнення аварійних ситуацій у конвертерному виробництві є контакт розплавленого металу або шлаку з водою чи вологими матеріалами, а також інтенсивний перебіг хімічних реакцій під час продування стана, розкислення та розливання сталі. Особливо небезпечними є вибухи фурм, які можуть супроводжуватися викидом розпечених газів, коксу та продуктів плавки на робочі майданчики. При

взаємодії з атмосферним повітрям ці речовини здатні займатися та утворювати потужні факели полум’я.

Для запобігання поширенню пожежі в конструкціях цеху використовуються негорючі будівельні матеріали. У місцях проходження газопроводів через підвальні приміщення встановлюються спеціальні дренажні пристрої, які виключають можливість проникнення газу всередину будівлі. Пожежне депо розташоване на відстані близько 4 км від виробничого об’єкта. Як протипожежні бар’єри застосовуються стіни з межею вогнестійкості 2,5 години, перекриття — 1 година, а також протипожежні двері, ворота, люки та вікна з аналогічним показником вогнестійкості.

Для своєчасного виявлення загорянь виробничі приміщення оснащуються автоматичними системами пожежної сигналізації. У їх складі використовуються теплові та димові пожежні сповіщувачі, зокрема типу С-2000-СМК. Біля евакуаційних виходів установлюються ручні пожежні сповіщувачі марки Болід ІПР-513-3А. Система забезпечує оперативне виявлення осередку займання та передачу світлових і звукових сигналів тривоги.

У приміщеннях з електротехнічним обладнанням передбачаються автоматичні установки порошкового та аерозольного пожежогасіння модульного типу. Їх призначення полягає у виявленні пожежі, передачі інформації черговому персоналу, подачі вогнегасної речовини в захищену зону та ліквідації займання на початковій стадії розвитку.

Особлива увага приділяється захисту кабельних споруд, оскільки вони належать до найбільш пожежонебезпечних елементів виробництва. Для цього кабельні тунелі та підвали обладнуються негорючими перегородками, протипожежними відсіками й автоматичною пожежною сигналізацією. Система включає датчики контролю, кабельні лінії зв’язку та приймально-контрольне обладнання. На практиці застосовуються переважно теплові та димові сповіщувачі, які монтуються під стелею приміщень.

Первинними засобами пожежогасіння є хімічні пінні вогнегасники типу ОХП-10, вуглекислотні вогнегасники ВВ-2, ВВ-5, ВВ-8, а також пересувні установки ВВ-25 і ВВ-80 [35].

Для захисту будівель і споруд від атмосферних електричних розрядів передбачена система блискавкозахисту, виконана відповідно до чинних нормативних вимог. Як заземлювачі використовуються переважно залізобетонні фундаменти виробничих об’єктів, а функцію блискавкоприймачів виконує сталева сітка, розміщена на покрівлі будівель.

З метою забезпечення безпечної евакуації працівників у разі пожежі або іншої надзвичайної ситуації виробничі приміщення обладнуються евакуаційними виходами. Кількість таких виходів становить не менше двох, а ширина дверних прорізів перевищує 0,8 м, що відповідає вимогам нормативних документів з пожежної безпеки [35].

4.5. Розрахунок теплоізоляції поста керування

Під час розроблення заходів щодо захисту персоналу від теплового випромінювання необхідно враховувати реальну інтенсивність теплового потоку на робочих місцях. Інтенсивність теплового опромінення визначається за залежністю:

$$E = \frac{0{,}91 \cdot \sqrt{F}\left[\left(\frac{T_{випр}}{100}\right)^4 - A\right]}{r}, \qquad (4.1)$$

де Е - інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м²;;

F - площа випромінюючої поверхні, м²;

Твипр - температура поверхні джерела випромінювання, К;

r - відстань від центру випромінюючої поверхні до об’єкта, м;

А=110 коефіцієнт для суконного спецодягу [36].

Для кисневого місткістю 350 т площа горловини становить приблизно (F=19,55) м², а інтенсивність теплового випромінювання на робочому місці дорівнює (E=3000) Вт/м². Звідси температура зовнішньої поверхні стінки поста керування становить:

$$E = \frac{0{,}91 \cdot \sqrt{19{,}55} \cdot \left[\left(\frac{T_{випр}}{100} \right)^4 - 110 \right]}{1} = 3000 Вт/м^2, \Rightarrow T_{випр.} = 541 \text{ К} = 268 \text{ °С}.$$

Теплоізоляція поста повинна забезпечувати температуру внутрішньої поверхні стінки не вище $t_{ст.}$=35°С [36], Температура повітря всередині поста приймається $t_{вс.п.}$=25°, температура джерела випромінювання .= 268 °С, а товщина шару вогнетривкого матеріалу $\delta_в$=0,3м. Необхідно визначити товщину теплоізоляційного шару $t_{вс.п.}$.

Питомий тепловий потік через огороджувальну конструкцію визначається за формулою:

$$q = \alpha_1 (t_{ВИПР.} - t_{ЗОВ.СТ.}) = \frac{\lambda_B (t_{ЗОВ.СТ.} - t_{Ш.})}{\delta_B} = \frac{\lambda_I (t_{Ш.} - t_{СТ})}{\delta_I} = \alpha_2 (t_{СТ} - t_{ВС.П}), \qquad (4.2)$$

де α1 – коефіцієнт тепловіддачі від нагрітого повітря до зовнішньої поверхні стінки, Вт/(м²·К);

tзов.ст – температура зовнішньої поверхні;

tш – температура на межі вогнетриву та ізоляції;

λв, λі – коефіцієнти теплопровідності відповідно вогнетривкого та ізоляційного матеріалів;

α2 – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінки до повітря всередині поста.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі використовують вираз::

$$\alpha_2 = 9,5 + 0,0982(t_{ст.} - t_{вс.п.}) - 4,74 \cdot 10^{-4}(t_{ст.} - t_{вс.п.})^2 + 1,74 \cdot 10^{-6}(t_{ст.} - t_{вс.п.})^3; \quad (3.3)$$

Після підстановки вихідних даних одержимо:

$$\alpha_2 = 9,5 + 0,0982(35–25) – 4,74 \cdot 10^{-4}(35 – 25)^2 + 1,74 \cdot 10^{-6}(35 – 25)^3 =$$
$$= 10,5 \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Питомий тепловий потік через стінку поста:

$$q = \alpha_2(t_{ст.} – t_{вс.п.}) = 10,5\ (35 – 25) = 105 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Температура зовнішньої поверхні визначається з рівняння:

$$q = \alpha_1(t_{випр.} – t_{зов.пов.}); \quad (4.5)$$

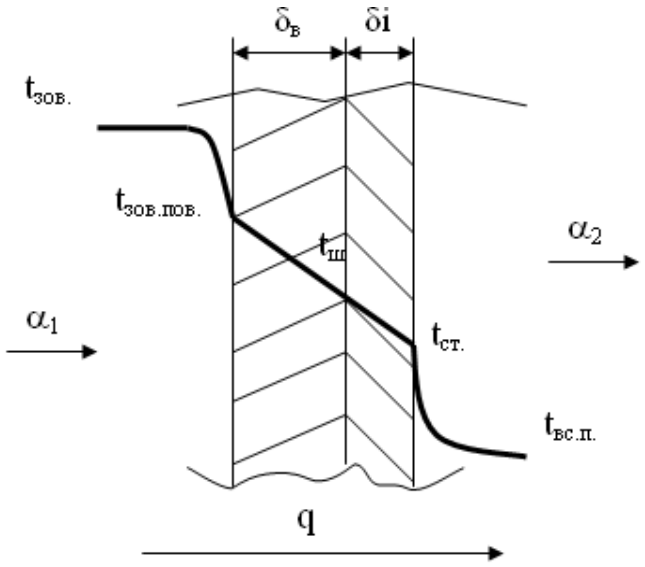
Звідки:

$$t_{зов.пов.} = t_{випр.} – q/\alpha_1 = 268 – 105/50 = 266\ ^{o}\text{C}. \quad (4.6)$$

Попередньо температуру на межі шарів вогнетриву та ізоляції приймаємо:

$$t_{ш} = 0,75(t_{зов.пов.} + t_{ст.}) = 0,75(266 + 35) = 169\ ^{o}\text{C}. \quad (4.7)$$

На рисунку 4.1 наведено схему теплотехнічного розрахунку стінки поста керування.



$\delta_в$,$\delta_і$ - товщина шару відповідно вогнетриву й ізоляції, м; $t_{зов.}$ – температура зовнішнього повітря, °С; $t_{зов.пов.}$ – температура зовнішньої поверхні поста керування, °С; $t_ш$ – температура між шарами вогнетриву й теплоізоляції, °С; $t_{ст.}$ – температура внутрішньої стінки поста, °С; $t_{вс.п.}$ – температура повітря всередині поста, °С; α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі відповідно від нагрітого повітря зовнішній стінці поста керування й від внутрішньої стінки повітрю усередині поста, Вт/м^{2}К; q - питомий тепловий потік через стінку, Вт/м^2.

Рисунок 4.1 - Розрахункова схема теплоізоляції поста керування.

Середня температура вогнетривкого шару становить:

$$t_в = 0{,}5(t_{зов.пов.} + t_ш) = 0{,}5(266 + 169) = 217{,}5\ ^oC. \quad (4.8)$$

Коефіцієнт теплопровідності вогнетривкого матеріалу визначається за формулою:

$$\lambda_в = a + b \cdot 10^{-4} t_в, \quad (4.9)$$

де для червоної цегли (a=0,466), (b=5,12) [36].

Після розрахунку отримуємо:

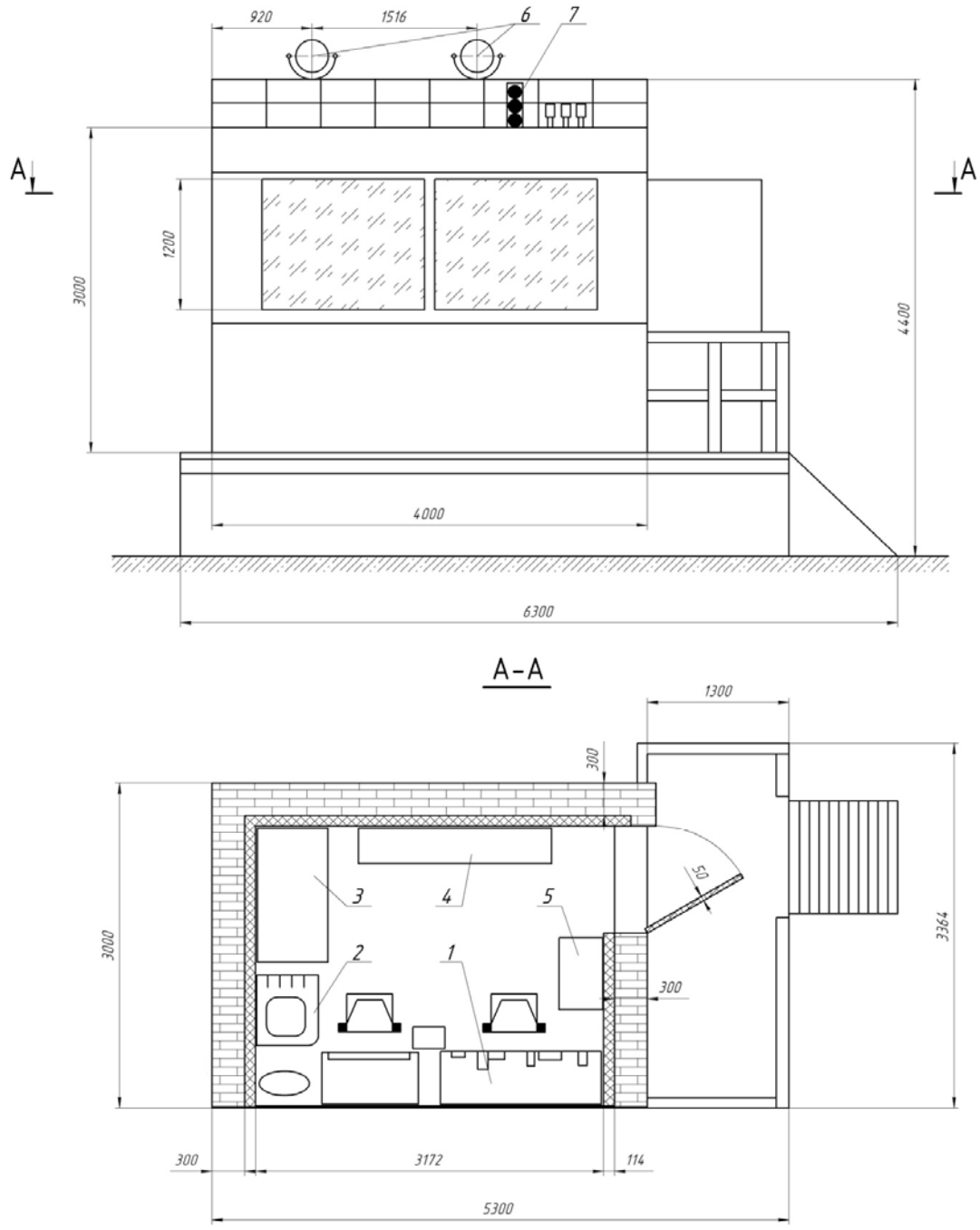
$$\lambda_в = 0{,}466 + 5{,}12 \cdot 10^{-4} \cdot 217{,}5 = 0{,}58\ Вт/мК.$$

Далі уточнюємо температуру на межі шарів із використанням рівняння питомого теплового потоку:

$$q = \frac{\lambda_В (t_{ЗОВ.ПОВ} - t_Ш)}{\delta_В}; \quad (4.10)$$

$$t_Ш = t_{ЗОВ.ПОВ} - \frac{q \cdot \delta_В}{\lambda_В} = 266 - \frac{105 \cdot 0{,}3}{0{,}58} = 211{,}7^\circ C. \quad (4.11)$$

Отримані результати свідчать, що для забезпечення нормативних умов праці необхідно обладнати пост керування конструкцією з червоної цегли та теплоізоляційним шаром зі скловолокна товщиною 0,13 м.



1 – пульт керування; 2 – умивальник; 3 – електротехнічна шафа; 4 – кондиціонер; 5 – робочий стіл із комп'ютером; 6 – прожектор; 7 – сигнальна система.

Рисунок 4.2 - Теплоізоляційний пост керування.

Для остаточного визначення товщини теплоізоляції розраховують середню температуру ізоляційного шару, його теплопровідність та необхідну товщину за рівнянням теплового потоку:

$$t_i = \frac{t_{Ш} + t_{СТ}}{2} = \frac{211{,}7 + 35}{2} = 123^{\circ} C. \qquad (4.12)$$

Для скловолокна коефіцієнти становлять (a=0,04) та (b=3) [36]. Тоді коефіцієнт теплопровідності ізоляції визначається за формулою:

$$\lambda_i = 0{,}04 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot t_i = 0{,}04 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 123 = 0{,}077 Вт / мК; \qquad (4.13)$$

$$\delta_i = \frac{\lambda_i (t_{Ш} - t_{СТ})}{q} = \frac{0{,}077(211{,}7 - 35)}{105} = 0{,}13 м. \qquad (4.14)$$

Отже, виконаний теплотехнічний розрахунок підтвердив доцільність застосування теплоізольованого поста керування зі стінами з червоної цегли та додатковим шаром скловолоконної ізоляції товщиною 0,13 м. Запропоноване рішення забезпечує зниження теплового навантаження на персонал і створює безпечні умови праці в зоні обслуговування кисневого конвертера.

4.5 Висновки

У ході аналізу умов роботи цеху встановлено, що основними джерелами виробничої небезпеки є рухомі та обертові елементи технологічного обладнання, вантажопідіймальні механізми, операції з транспортування вантажів, а також розплавлені метал і шлак. Додаткову небезпеку для персоналу створює електротехнічне обладнання, що експлуатується в цеху.

Відповідно до вимог пожежної та вибухопожежної безпеки розливний проліт належать до категорії А. До категорії Б віднесено систему очищення конвертерних газів, міксерне відділення та завантажувальний проліт, тоді як дільниця підготовки шихтових матеріалів класифікується як об’єкт категорії Г.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто проблему нерівномірності поздовжніх напруг по ширині штаби, що виникає при змотуванні її в рулон.

В роботі стисло надано описання цеху холодної прокатки (ЦХП), технологія виробництва холоднокатаних штаб на реверсивному стані 1680 в цеху холодної прокатки (ЦХП) меткомбінату «Запоріжсталь». Розглянуто основні технічні характеристики обладнання даного стана, досліджено основні типи профілювання валків та запропоновано нові, які дозволяють значно поліпшити процес прокатки шляхом зменшення різниці коефіцієнтів витяжки $\delta\mu/\mu$ по ширині штаби. Запропоновані деякі рекомендації щодо використання тих чи інших твірних валків в залежності від поперечного профілю гарячекатаного підкату при прокатуванні штаби на станах холодної прокатки. Також наданий опис існуючих технічних рішень для усунення нерівномірності поздовжніх розтягуючи напруг по ширині штаби при її прокатуванні на безперервних та реверсивних станах холодної прокатки.

Зокрема рекомендується встановлювати направляючі обідні ролики з випуклим профілем твірної в лінії станів холодної прокаткиза останньою кліттю стана перед моталками, що зменшить нерівномірність поздовжніх розтягуючи напруг та поліпшить змотування штаби в рулон,покращить якість поперечного перетину штаби і процес її змотування.

Завдяки застосуванню випуклих обвідних роликів може бути досягнуто вирівнювання поздовжніх напружень натягнення по ширині штаби зі зменшенням неплощинності і поліпшенням якості формування

рулона. Слід також очікувати деякий позитивний вплив ролика через штабу і на поле контактних напружень в осередку деформації кліті.

Пропозиції:

1. Продовжити експериментально-дослідовні дослідження зношування бочок обвідних (направляючих) роликів в залежності від кількості метражу прокатаного металу.

2. Для підвищення зносостійкості обвідних роликів провести роботу по гартуванню поверхневого шару.

3. Виготовувати та опробуватиролики зі сталі, яка підвищить зносостійкість та абразивостійкість.

4. Опробувати конструкцію з двома обвідними роликами один з яких є рухомим.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Середа Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.

2. *Середа Б.П.* Прокатне виробництво : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 312 с.

3. Василёв Я.Д., Сафъян М.М. Производство полосовой и листовой стали : учебник для вузов. Киев : Вища школа, Головное издательство, 1976. 192 с.

4. Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А. Горелик В.С. Технология прокатного производства : учебное пособие для вузов. Киев: Вища школа, Головное издательство, 1989. 311 с.

5. Сафъян М.М., Мазур В.Л., Сафъян А.М., Молчанов А.И. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство : учебник для вузов. Киев: Вища школа, Головное издательство, 1988. 351 с.

6. Жук А. Я., Малышев Г. П., Желябина Н. К., Клевцов О. М. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование : монография. /– Запорожье ЗГИА, 2008. 224 с.

7. Чащин В. В., В. А. Капитанов, Попов Е. С. Использование температурной математической модели при разработке технологии регулируемого охлаждения горячекатаной полосы в рулоне. *Производство проката.* 2008. № 8. С. 17-23.

8. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.

9. Середа Б.П. Термічна обробка металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 270 с.

10. Середа Б.П. Теорія будови рідкого, кристалічного та аморфного стану речовини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 238 с.

11. Середа Б.П. Металознавство і термічна обробка чорних і кольорових металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 302 с.

12. Дубовский Б. А., Никифоров Б. А., Радионова Л. В. Иследование влияния технологических параметров горячей прокатки на структуру низкоуглеродистых и низколигированных марок стали. Производство проката. 2006. №10. С. 15-20.

13. Іващенко О. В. Методичні вказівки до виконання організаційно-економічної частини дипломного проекту. Запоріжжя : Вид. ЗДІА, 2004. 31 с.

14. Жидецкий В. Ц., Джигирей В. С., Мельников А. В. Основы охраны труда. учебник. изд. 2-е, дополненное. Львов : Афиша, 2000. 350 с.

15. Ткачук К. Н., Иванчук Д. Ф., Сабарно Р. В., Степанов А. Г. Справочник по охране труда на промышленном предприятии. Киев : Техника, 1991. 285 с.

16. Панасейко С. П. Гигиена труда и производственная санитария : учебное пособие для студентов ЗГИА. Запорожье : ЗГИА, 2003. 232 с.

17. Панасейко С. П. Методические указания для курсового и дипломного проектирования по дисциплине «Охрана труда» (раздел «Вентиляция и кондиционирование»). Запорожье : ЗГИА, 2002. 45 с.

18. Пеклов А. А., Степанова Т. А. Кондиционирование воздуха. Киев : Высшая шк., 1978. 328 с.

19. Рижков В. Г. Електробезпека. Методичні вказівки до дипломного та курсового проектування, контрольних робіт і практичних занять для студентів ЗДІА спеціальності „Металургія чорних металів” спеціалізації „Охорона праці та екологія металургійного виробництва” денної та заочної форм навчання / Укл.: В. Г. Рижков. Запоріжжя, 2004. 60 с.

20. Welo T., Abtahi S., Skauvik I. An Experimental and Numerical Investigation of the Thermo-Mechanical Conditions on the Bearing Surface of

Extrusion Dies. *Proceeding of 6 International Extrusion Technology Siminar*. Chicago: Editors Express, 1996. Vol. 1. P. 101-106.

21. Hamzah H. Weld integrity on a die. Proceeding of the Seventh International Aluminium Extrusion Technology Seminar. Chicago: Editors Express, 2000. Vol. II. P. 273-275.

22. Muller K.B., Wegener J. Direct Extrusion of AA 6060 Through Dies With Coated Bearing Lengths. *Proc. of the Sixth International Aluminum Extrusion Seminar*. Chicago: Editors Express, 1996. Vol. 2. P. 147-153.

23. Devadas C., Celliers O. Metal Flow During the Extrusion Process. *Proc. of Fifth International Extrusion Technology Seminar*. Chicago: Editors Express, 1992. Vol. 1. P. 359-368.

24. Hardouin J-P. Bearing Length Calculation by Control of Metal Flow Pressure. *Proc. of Fifth International Extrusion Technology Siminar*. Chicago: Editors Express, 1992. Vol. 1. P. 291-303.

25. Sereda B., Belokon Y., Kruhliak I., Sereda D., Kruglyak D. The effects of grain size on mechanical properties of Ti-Al intermetallic alloy. *Математичне моделювання*. 2023. 1 (48). С. 88-96. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280148.

26. Belokon Y ., Zholobko B., Sahuliakin O., Kalashnik S. Analysis of the thermodynamic properties of special-purpose alloys for conditions of thermochemical pressing. *Математичне моделювання*. 2024. No 1 (50). С. 146-151. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(50)2024.305581.

27. Sheyko S., Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T. Thermoplastic processing of structural metallic materials. Experiments, theory and modeling. Cham: Springer, 2024. 112 p. ISBN 978-3-031-73895-1. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73896-8.

28. Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T., Krugliak D. Thermochemical pressing of special purpose materials : monograph. Riga : Baltija

Publishing, 2024. 156 p. ISBN 978-9934-26-508-2. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-508-2.

29. Бєлоконь Ю. О., Чейлитко А. О., Ільїн С. В., Воденнікова О. С. Теоретичні засади термохімічного пресування матеріалів спеціального призначення: монографія. Одеса : Гельветика, 2022. 148 с. ISBN 978-617-554-085-5.

30. Бєлоконь Ю. О., Кругляк Д. О., Калашник С. М., Сагулякін О. Є., Жолобко Б. О. Експериментальні дослідження процесів термохімічного пресування матеріалів спеціального призначення : монографія. Одеса : Гельветика, 2023. 154 с. ISBN 978-617-554-173-9.

31. Sereda B., Belokon Y., Krugliak D. Kinetics modeling in thermochemical pressing of powder intermetallic alloys. *Математичне моделювання*. 2022. 2(47). С. 90–97. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268399.

32. Belokon Y., Sereda D., Zholobko B., Sahuliakin O., Yavtushenko A. Modeling of local plastic deformation processes under extreme operating conditions. *Математичне моделювання*. 2024. No 2 (51). С. 169-176. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(51)2024.317635.

33. Бєлоконь Ю.О., Шапуров О.О., Гречаний О.М., Проценко В.М. Технології синтезу високоентропійних сплавів: сучасний стан і майбутні напрямки. *Металургія*. 2025. № 1(2025). С. 58-70. https://doi.org/10.26661/2071-3789-2025-1-06.

34. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Bondarenko Y., Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials.* (Brno, May 20 - 22, 2020). Brno, 2020. P. 440-445.

35. Бєлоконь Ю.О. Фізичні процеси при пластичній деформації : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 179 с.

36. Середа Б. П., Бєлоконь Ю. О., Оніщенко А. М. Теорія обробки металів тиском : навч.-метод. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 129 с.

37. Обробка металів тиском при нестаціонарних температурних умовах : монографія / Б.П.Середа, І.В.Кругляк, О.А.Жеребцов, Ю.О.Бєлоконь. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 252 с. ISBN 978-966-8462-15-3.

38. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с.

39. Цифрова трансформація безпеки праці у виробництві: ергономіка, виробнича санітарія та вентиляція, електро- та пожежобезпека / К. В. Бєлоконь, Є. А. Манідіна, А. В. Вагін, В. Л. Ситий // Цифрова трансформація промислового менеджменту: теорія і практика : кол. монографія / за ред.: В. Г. Воронкової, Н. Г. Метеленко. Львів ; Торунь : Liha-Pres, 2023. С. 717-799.

40. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА всіх спец. ден. та заоч. форм навчання / К. В. Бєлоконь, В. Г. Рижков, Ю. В. Куріс, Є. А. Манідіна ; ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 180 с.

41. Манідіна Є. Забезпечення безпеки технологічних процесів та обладнання під час проєктування металургійних цехів. Формування сучасних концепцій менеджменту організацій та адміністрування в умовах цифровізації : матеріали міжнар. н.-практ. конф., присвяч. 25-річчю створення каф. менеджменту орг. та упр. проектами, 23-24 вересня 2021 року / ред.-упоряд. В. Г. Воронкова. Запоріжжя : Гельветика, 2021. С. 675-679.

42. Манідіна Є. А., Грідяєв В. В. Пожежна безпека : курс лекцій для здобувачів ступеня вищ. освіти бакалавра спец. 263 "Цив. безпека" освіт.-проф. програми "Охорона праці". Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 313 с.