

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 магістерської роботи

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістерський \_\_\_\_\_  
(другий (магістерський) рівень)

на тему *Оптимізація технологічних режимів деформації на неперервних станах холодної прокатки.*

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1361-омт

Щербань М.А.

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(шифр і назва)

Керівник Бєлоконь Ю.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Явтушенко А.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2022 року

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий магістерський 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

“ ” 12 2022 року

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

Щербань Микита Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Оптимізація технологічних режимів деформації на неперервних станах холодної прокатки.

керівник роботи (проекту) Белоконь Юрій Олександрович д.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від “02” 06 2022 року № 597-с

2. Строк подання студентом роботи (проекта) 14.12.2022

3. Вихідні дані до роботи (проекта) Оптимізація технологічних режимів деформації на неперервних станах холодної прокатки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналіз наукової інформації й стан проблеми. Обґрунтування задачі та методики дослідження. Обробка і обговорення результатів технологічних досліджень. Охорона праці при проведенні дослідження, Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Креслення, презентаційний матеріал 18 слайдах (на 18 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Розділ 2</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Розділ 3</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Розділ 4</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 03.09.2022

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>01.10.- 02.10.2022</i>	
2	<i>Реферат</i>	<i>02-04.10.2022</i>	
3	<i>Розділ 1</i>	<i>15.10- 27.10.2022</i>	
4	<i>Розділ 2</i>	<i>02.11- 14.11.2022</i>	
4	<i>Розділ 3</i>	<i>15-28.11.2022</i>	
5	<i>Розділ 4</i>	<i>28-08.12.2022</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>08.12.2022</i>	

Студент \_\_\_\_\_ М.А. Щербань  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Ю.О. Белоконь  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра обсягом 103 сторінок, містить 36 рисунків, 17 таблиць, 35 літературних джерел.

ТЕХНОЛОГІЯ, ПЛОЩИННІСТЬ, ПІДКАТ, ТОЧНІСТЬ, ПОПЕРЕЧНИЙ ПРОФІЛЬ, ХОЛОДНА ПРОКАТКА, ХВИЛЯСТІСТЬ, КОРОБЧАТІСТЬ, РІЗНОТОВЩИНІСТЬ, ЛИСТ.

Робота присвячена найбільш актуальній темі листопрокатного виробництва й устаткування - підвищенню точності і якості прокату, зокрема зниженню поперечної різнотовщинності, хвилястості і коробчатості листів. У роботі виявлені, розглянуті і проаналізовані найбільш характерні літературні джерела, що відносяться до проблеми одержання планшетної штаби правильного профілю. На цій основі визначені основні напрямки технічного розвитку в розглянутій області, проаналізовані переваги і недоліки кожного напрямку і перспективи його розвитку.

У процесі експериментального дослідження визначали передатні коефіцієнти, що характеризують зв'язок між певними параметрами процесу прокатки в однопрохідній двохвалкової кліті (тиск металу на валки, випередження металу й швидкість прокатки, товщина штаби до і після прокатки). Було проведене осцилографування тиску металу на валки в процесі прокатки на стані 260. Установлення передавальних коефіцієнтів досвідченим шляхом при прокатці карток.

У результаті проведення експериментальних досліджень були перевірені та підтверджені теоретичні формули, що характеризують зв'язок профілю і форми в процесі прокатки, що дозволяють аналітично визначити ступінь впливу технології збурювання на зміни різниці витяжок по ширині штаби.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ Й СТАН ПРОБЛЕМИ.....	7
1.1 Дефекти форми штаби при прокатці в нерегульованих клітках.....	7
1.2 Аналіз методів зменшення поперечної різнотовщинності й дефектів форми штаби при прокатці.....	10
1.3 Регулювання форми штаби.....	37
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧІ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	41
2.1 Теоретичне обґрунтування задачі дослідження.....	41
2.2 Устаткування для проведення дослідів.....	45
2.3 Методика вимірів зусилля прокатки.....	50
3. ОБРОБКА І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	55
3.1 Математичне планування експерименту.....	55
3.2 Експериментальні дослідження площинності штаби.....	70
3.3 Розрахунок показників форми штаби та коефіцієнта вирівнювання.....	81
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	86
4.1 Загальні положення охорони праці в лабораторії.....	86
4.2 Правила по техніці безпеки при роботі на прокатному стані.....	89
4.3 Пожежна безпека при роботі з електроустаткуванням і електроприладами.....	91
4.4 Безпека праці при готуванні та травленні шліфів.....	92
ВИСНОВКИ.....	95
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	97
ДОДАТОК А. Публікації за темою кваліфікаційної роботи .....	100

## ВСТУП

В наш час найбільш ефективним способом виробництва листів і штаб є прокатка на безперервних і напівбезперервних станах.

Частка листової продукції, що прокатується на цих станах, неухильно збільшується, що у великому ступені визначається значним ростом обсягу виробництва смугової сталі для трубної промисловості і холоднокатаного листового металу для енергомашинобудування, експортних замовлень, автомобільної промисловості, а також металовиробів широкого вжитку.

Разом зі збільшенням випуску листів, штаб значно розширюється їхній сортамент по розмірах і по марках металів, що прокатуються. Збільшується частка литців з низьколегованих сталей.

Забезпечення необхідної продуктивності і високої якості гарячекатаної смугової сталі може бути здійснене за рахунок модернізації існуючих станів і будівництва нових широкополосних станів.

Розвиток виробництва гарячекатаної широкополосної сталі і поліпшення її якості може бути успішно здійснене при проведенні широких теоретичних і експериментальних досліджень енергосилових параметрів технологічного процесу, умов, що визначають одержання необхідної геометрії смуг, створення надійного і економічного головного і допоміжного устаткування станів і їхньої автоматизації.

# 1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ Й СТАН ПРОБЛЕМИ

## 1.1 Дефекти форми штаби при прокатці в нерегульованих клітях

Основна проблема при прокатці штаби правильного профілю в поперечному перерізі полягає в забезпеченні в процесі роботи правильної форми позіху валків, тобто в збереження прямолінійності та взаємної паралельності утворюючих валків в осьовій площині. При абсолютно твердій установці валків, їхньому рівномірному нагріванні та зношуванні, цій умові в ідеалі можна було б задовольнити. Оскільки, однак, будь-яка реальна система має кінцеву твердість, насамперед виникає завдання компенсувати ті деформації, яким піддаються валки під дією зусилля прокатки. Далі, необхідно компенсувати нестабільність у часі й по довжині валка (ширині штаби) факторів, що впливають на форму позіху валків.

Отже, можна виділити три основних, істотно різних по своїй природі та по методах їхньої компенсації фактора, що викликають зміну форми позіху валків [1]. Це тиск металу на валки, розігрів валків і їхнє зношування. Розглянемо характер впливу цих факторів докладніше.

Тиск металу на валки у свою чергу визначається, за інших рівних умов, такими основними параметрами, як обтиснення і опір деформації. При безперервній прокатці, крім того, важливу роль грає натяг штаби.

Всі три параметри можуть бути нестабільні в часі та по ширині штаби. Для зручності аналізу можна розглянути кожний фактор як суму постійного середнього значення його та змінного відхилення від цього середнього значення (у функції двох величин: часу і координат по ширині).

Найбільш важливим серед названих можна вважати такий параметр, як обтиснення [2]. Цей параметр є функція вхідної товщини штаби та розчину валків. Збурюванням для цього параметра може бути вихідна різнотовщинність штаби. Якщо це поздовжня різнотовщинність, вона

спричиняє поздовжню же нестабільність обтиснення (при заданому розчині). Поперечна вихідна різнотовщинність викликає нерівномірність обтиснення по ширині штаби (навіть при правильній формі позіху валків). Що при цьому відбувається?

Нестабільне в часі обтиснення веде до коливань тиску металу на валки, а виходить, до коливань розчину валків і профілю позіху. Останнє, у свою чергу, впливає на величину обтиснення, але вже в напрямку його стабілізації. Таким чином, у наявності система з позитивним зворотним зв'язком, тобто система стійка.

Складніше справа з нерівномірністю обтиснення по ширині штаби. Подібним вищесказаному образом ця нерівномірність впливає тільки на один з компонентів деформації утворюючої хитка – на пружне сплющування, що по довжині бочки пропорційно погонному зусиллю (і отже, за інших рівних умов, питомому по ширині штаби обтисненню). Другий же і найважливіший компонент деформації – прогин валка при його пружному вигині, не зв'язаний настільки простою залежністю з характером його навантаження по довжині бочки. Іншими словами, пружна лінія валка при вигині за формою не подібна (не еквідистантна) епюрі розподіленому навантаженню на нього. У зв'язку із цим, регулювання істотно ускладнюється.

Тут доречно відзначити [3], що на профіль штаби не впливає паралельне переміщення хитке, викликуване деформацією опор, натискних механізмів, станини. Ці деформації, однак, істотні для поздовжньої різнотовщинності штаби. Зі сказаного, проте, не треба, що поздовжня і поперечна різнотовщинність пов'язані з незалежними друг від друга факторами. Ясно, що деформація будь-якого типу (вигин, розтягання, сплющування) у межах пружності суть наслідку того самого зусилля – зусилля прокатки, і виходить, проблеми їхньої компенсації, у всякому разі при дії змінної частини зусилля прокатки, взаємозалежні.

Другий параметр, від якого залежить тиск металу на валки – це опір деформації, або, по суті, температура розкату [4]. Цей параметр більше



інерційний у часі, чим попередній, а якщо змінюється, то монотонно, закономірно. Це дає можливість екстраполювати функцію температури та випереджати (попереджати) завдяки цьому регулюючий вплив. Найбільш характерним з погляду впливу на профіль штаби є перепад (лінійний) температури по ширині штаби, що викликає її серповидність. Досить типовим випадком є також більше низька температура крайок штаби в порівнянні з її серединою.

Нарешті, третій, найбільше важко регульований параметр – натяг [5]. Величина натягу між клітями залежить від діючі на штабу зусилля регулятора натягу, співвідношення швидкостей прокатки в сусідніх клітках, співвідношення обтиснень у тих же клітках. Природно очікувати, що величина ця найменш стабільна з розглянутих: адже коливання кожного з названих впливів спричиняє коливання натягу. Коливання натягу викликає зміна обтиснення, що у свою чергу впливає на натяг. Таким чином, і тут у наявності складна система регулювання зі зворотним зв'язком. Найбільш неприємна нерівномірність натягу по ширині штаби, що викликає нерівномірність обтиснення, а виходить, і витяжок по ширині штаби. Як ми вже відзначали, таке порушення режиму прокатки відразу відбивається на її площинності.

Таким чином, із трьох розглянутих параметрів, що визначають тиск металу на валки, два (обтиснення та натяг) взаємозалежні між собою, а третій – опір деформації (температура штаби) – автономний і значно більше інерційний [6].

Два інших фактори, що впливають на профіль позіху – це термічна деформація валків і зношування валків.

Нерівномірність термічної деформації валків викликається різними умовами контакту зі штабою різних по довжині ділянок бочки, і різними умовами їхнього охолодження.

Нарешті, зношування валків – найменш закономірна та до того ж необоротна (на відміну від усіх раніше перерахованих) причина зміни профілю валка.

На закінчення цього розділу необхідно підкреслити, що площинність штаби пов'язана з рівномірністю обтиснення по ширині її, але рівномірність обтиснення не є необхідна умова одержання правильності профілю штаби [7]. У зв'язку із цим найважливішим фактором при одночасному рішенні обох завдань є профіль вихідної штаби. При значній товщині заготовлі проблема площинності не виникає, і в цих умовах можна ефективно регулювати профіль.

## **1.2 Аналіз методів зменшення поперечної різнотовщинності й дефектів форми штаби при прокатці**

Вище вже було сказано про те, що фактори, що викликають поперечну різнотовщинність (перекручування профілю) і непласкість штаби в даній роботі розбиті на дві групи: фактори постійного характеру і фактори змінного характеру.

Відповідно до цього назвемо методи та засоби усунення або часткової компенсації постійних факторів – статичними, а змінних факторів – динамічними. Основне істотне розходження між ними полягає в тому, що динамічні методи містять у собі систему регулювання з усіма властивими елементами: датчиком, блоком порівняння з еталонними характеристиками та блоком подачі сигналу на виконавчий механізм [8]. Можна думати, що тільки сукупне застосування статичних і динамічних методів та засобів дає можливість ефективно впливати на форму прокатуваного листа. Проте, дослідження цих методів і засобів повинне проводитися диференційовано.

Це тим більше справедливо, що статичні та динамічні методи реалізуються в часі по-різному. Якщо статичні методи є методи переважно попередньої компенсації можливих факторів, що обурюють, і реалізуються

до самого процесу прокатки, то динамічні методи реалізуються безпосередньо в процесі прокатки, тобто в часі слідом за статичною компенсацією.

Найпоширеніші й у той же час найбільш простий метод статичного впливу на профіль штаби – попереднє профілювання самих валків. Ідея методу надзвичайно проста: оскільки нас цікавить тільки робоче утворююче валка (тобто утворююча, що безпосередньо створює форму позіху валків), і при вигині валка вона деформується зовсім певним чином, можна попередньо зрадити відповідну форму валка так, щоб компенсувати цю деформацію. Нижче будуть більше докладна розглянуті конкретні форми втілення цієї ідеї, а поки обмежимося цією самою загальною інформацією.

Другим і більше універсальним статичним методом компенсації деформації валка є підвищення твердості валкової системи. Найпростішим прикладом цього методу є установка в кліті більше твердих (порівняно з робочими валками) опорних валків. Однак, при сучасних вимогах до точності прокатної штаби проста установка опорних валків виявляється вже недостатньою. Одним з ефективних методів підвищення твердості конструкції є її попередня навантаження.

Цей метод застосуємо й до валкової системи [9]. Варто підкреслити, що мова йде про попередню напругу саме валкової системи, а не всієї кліті, тому що на профіль прокатуваного листа, впливає деформація тільки одного елемента кліті: робочого валка. Обмовити це важливо тому, що відомо безліч схем попередньої напруги кліті (станини, натискного механізму, подушок), які компенсують поступальний зсув валка, але не перешкоджають його вигину. Сказане, однак, не означає, що регулювання поздовжньої й поперечної різнотовщинності штаби повністю взаємонезалежно. Докладніше це питання буде розглянутий нижче, що відповідає розділі роботи, де розглянуті й інші методи підвищення твердості валкової системи.

Зазначені два статичних методи профілювання спрямовані на компенсацію прогину робочого валка. Як уже вказувалося, однієї із причин,

що можуть викликати непласкість штаби, є перепад температур по її ширині.

Докладне вивчення цього питання показало, однак, що величини температурних коливань по ширині прокатуваних листів, недостатні для істотного впливу на поперечну різнотовщинність. Наприклад, при найгірших умовах, для випадку прокатки широких листів різниця температур по ширині листа досягає максимум  $100^{\circ}\text{C}$ . Цей перепад температур викликає додаткову різнотовщинність близько  $0,002$  мм, що практично можна в розрахунок не приймати.

Як уже говорилося, статичні методи впливу на профіль штаби здатні компенсувати лише постійну складову факторів, що обурюють. Для впливу на змінні фактори, що обурюють, необхідно використати такі методи, які допускають регулювання в часі, тобто по нашій термінології, методи динамічні. Строго говорячи, будь-який динамічний метод може працювати і як статичний у тому випадку, якщо фактор, що обурює, не міняється в часі. Принципове розходження між динамічними та статичними методами полягає в тому, що останні ні при яких умовах не можуть бути трансформовані в перші, тобто в динамічні, не можуть бути доповнені системою регулювання і не можуть, отже, реагувати на збурювання, що міняється в часі. У цей час значний розвиток одержав потужний метод динамічного впливу на профіль штаби – противигин валків. Сутність цього методу полягає в тому, що валок піддають примусовому вигину в напрямку, що забезпечує відновлення прямолінійності його робочої утворюючої. Зусилля, створювані системою противигину і впливають на валок, можуть регулюватися, так що система здатна стежити за збурюванням, що міняється в часі та компенсувати їх. Конструктивна реалізація систем противигину, при простоті основної ідеї, дає великий простір для інженерної фантазії, це відбилося в значному числі патентів, присвячених цьому питанню.

При всіх достоїнствах противигину властивий один недолік, щоправда, помітний лише при надзвичайному високому рівні вимог у точності профілю

штаби, характерному лише для самого останнього часу. Цей недолік полягає в тому, що противигин можна міняти профіль валка, так сказати, інтегрально, у цілому, що при зміні факторів, що обурюють, і функцій ширини штаби може виявитися не достатнім.

У зв'язку із цим останнім часом зріс інтерес до систем, що дозволяють впливати на профіль валка локально, тобто варіювати, видозмінювати саму схему протинавантаження валка, а не тільки величину протинавантаження. Ці системи засновані на локальному впливі безпосередньо на бочку валка й становлять значний інтерес. Вони освітлені в розділі звіту присвяченому іншим динамічним методам впливу на профіль штаби.

До цього ж розділу віднесено і цікаве напрямки динамічного впливу на профіль штаби, пов'язане із впливом на профіль бочки валка в процесі прокатки. Вище вже говорилося, що профілювання бочки валка є суцільно статичним, попереднім методом зменшення поперечної різнотовщинності штаби. Це дійсно так, якщо мова йде про додання бочки валка потрібної форми за допомогою, наприклад, механічної обробки. Але от з'явилася ідея впливати на порожній валок внутрішнім тиском і таким шляхом віддавати бочки валка необхідну опуклість. З'явилася можливість додати, здавалося б, суцільно статичному методу динамічні риси. Виник новий напрямок. Його перевага й недоліки, як, втім, і в інших напрямків, будуть на конкретних прикладах розглянуті нижче.

Далі, варто вказати на виникнення та розвиток принципово нових, способів прокатки, самою своєю природою помітно, що зменшує причини, появи різнотовщинності штаби і що дозволяють вишукати принципово нові методи регулювання її. Тут, у першу чергу, мова йде про процес прокатки-волокіння. До теперішнього часу цей спосіб запатентований у ряді закордонних країн на ряді із численними конструктивними рішеннями, призначеними для його реалізації.

Вище вже говорилося про нерівномірний по довжині, бочки тепловому розширенні валка, як про одній із причин появи поперечної

різновтовщинності. Як протитрута цій причині виник метод регульованого термічного впливу на профілі бочки валка, різні форми реалізації якого будуть розглянуті нижче.

Такі, загалом основні статичні й динамічні методи впливу на профілі штаби при прокатці.

У роботі [10] розроблена технологія виробництва тонких холоднокатаних штаб з поліпшеною площинністю за рахунок використання гарячекатаного підкату з регламентованими параметрами точності поперечного профілю.

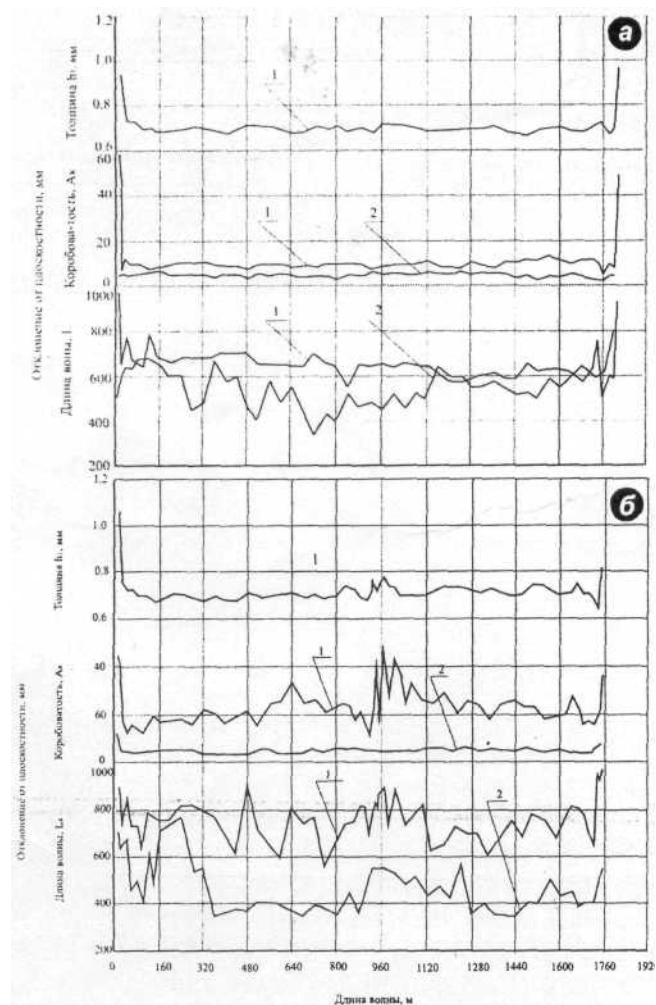


Рисунок 1.1 – Зміна товщини і відхилень від площинності по довжині штаби 0,7x1000 мм (сталь 08пс), прокатої з мінімальної (а) і з великий (б) непласкістю : 1 - після холодної прокатки: 2 - після дресировання

Аналіз отриманих даних (див. рис. 1.1) показав, що зміни товщини ( $h_1$ ) і характеристик непласкості ( $A_k$ ,  $L_k$ ) холоднокатаних штаб перебувають у

тісному взаємозв'язку. Будь-яке збурювання, що викликає зміну товщини штаби позначається на значеннях характеристик непласкості. Це особливо добре видно на рис. 1.1,б, де відхилення від площинності  $A_k$  і довжина хвилі коробчатості  $L_k$  практично повторюють характер зміни товщини штаби  $h_1$  по довжині рулону. У виконаних експериментах величина  $A_k$  на холоднокатаних штабах змінювалася в межах від 0 до 40-60 мм/м. Найбільші відхилення від площинності спостерігалися при прокатці кінців штаб. У такий же спосіб змінювалися і значення довжини хвилі. Як правило, довжина хвилі коробчатих або хвилястих ділянок штаби становила 500-800 мм, хоча спостерігалися випадки, коли довжина хвилі мала менші (0-500 мм) і більші (800-1200 мм) значення. Непласкість у вигляді коробчатості розташовувалася симетрично по середині, а у вигляді хвилястості - симетрично по краях штаби. Ширина ділянки непласкості становила 200-900 мм.

З рисунку 1.2 видно, що поперечний профіль гарячекатаного підкату має симетричну, практично ідеальну «чечевицеобразну» форму. Після холодної прокатки і дресирування ця форма практично збереглася. Величина поперечної різнотовщинності холоднокатаного профілю ( $\delta h_1 = 0,02554$  мм) менше поперечної різнотовщинності гарячекатаного підкату ( $\delta h_0 = 0,09$  мм) приблизно в 3,5 рази.

З роботи [11] видно, що технологія холодної прокатки, заснована на використанні гарячекатаного підкату з регламентованими параметрами точності поперечного профілю, забезпечує масове виробництво штаб тонкого сортаменту (0,5 - 1,0 мм) безперервного чотирьохкліткового стану холодної прокатки 1680 з відхиленням від площинності до 6,0 мм/м. Така продукція відповідає вимогам високої групи площинності холоднокатаної листової сталі. Запропонована технологія реалізована в цей час у ручному режимі керування засобами впливу на профіль активних утворюючих робочих валків стану 1680. Для забезпечення більше високої стабільності й підвищення ефективності виробництва тонких холоднокатаних штаб з поліпшеною площинністю

передбачається оснастити останню кліть стану 1680 САРП. Матеріали даної роботи використані при розробці технічного завдання на проектування САРП.

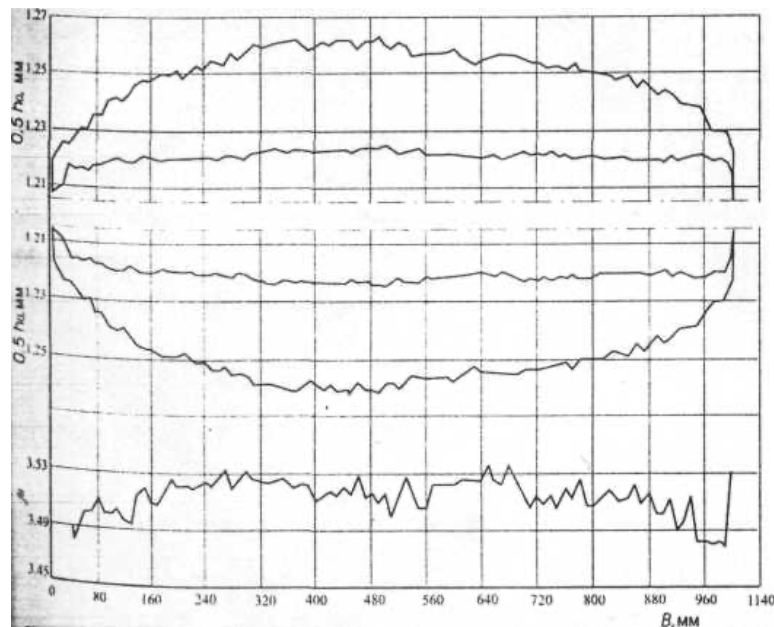


Рисунок 2 – Поперечні профілі гарячекатаного підкату 2,5x1000 мм ( $h_0$ ), холоднокатаної штаби 0,7x1000 мм ( $h_1$ ) і зміна сумарного коефіцієнта витяжки по ширині штаби.

У роботі [12] розглядається можливість керування тепловим профілем валків і площинністю штаб селективною подачею емульсії.

За допомогою представленої в роботі методики виконали комплекс розрахунків. На рисунках 1.3 і 1.4 показане розрахункова зміна температурного поля й теплового профілю робочих валків при прокатці на стані 2030 штаб за схемою 3,5 – 1,0x1025 мм зі сталі 08Ю.

Розроблений у роботі алгоритм може використатися як складова автоматичної системи керування площинністю штаб разом з іншими способами і засобами впливу, такими як перекіс валків у вертикальній площині, примусовий вигин, осьове зрушення валків і ін.



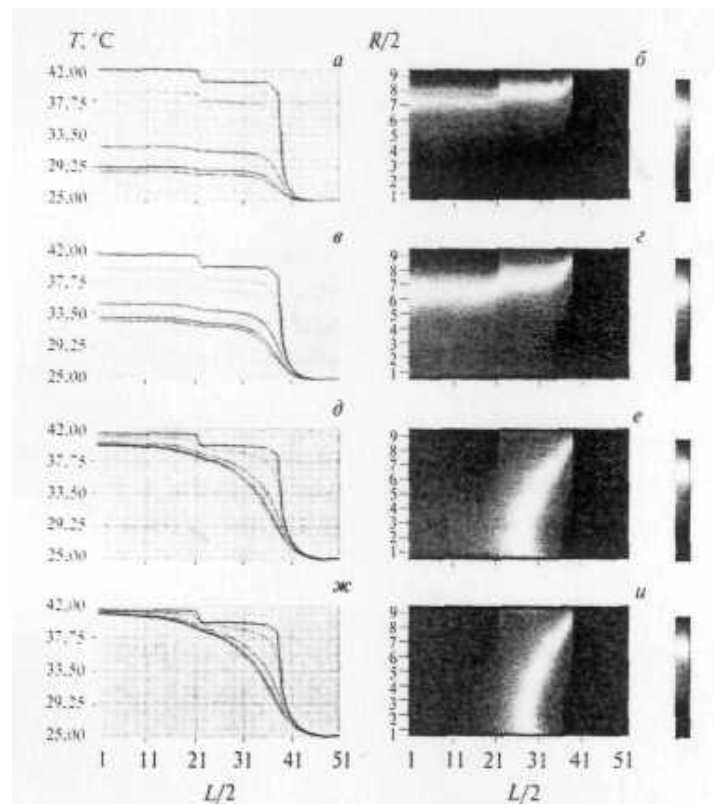


Рисунок 1.4 – Зміна температури (*а, в, д, ж*) і теплове поле (*б, г, е, и*) робочого валка після прокатки штаб: *а, б* – одного рулону, час прокатки 7 хв; *в, г* — трьох, 21 хв; *д, е* — шести, 42 хв; *ж, и* – дев'яти, 63 хв

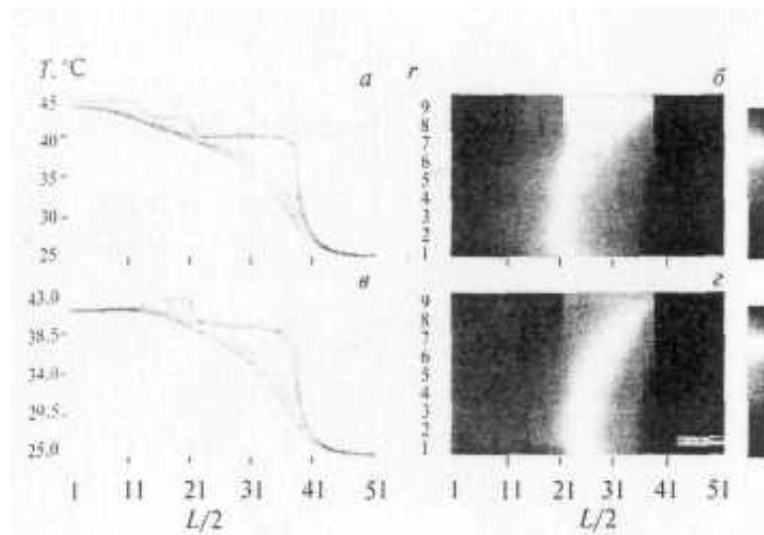


Рисунок 1.5 – Зміна температури (*а, в*) і теплового поля (*б, г*) після прокатки штаб за схемою 3,5 - 1,0x1025 мм зі сталі 08Ю в кліті 3 стани 2030 протягом 1,5 ч зі зменшеною подачею COP у внутрішню зону й підвищеної — у зовнішню (*а, б*) і навпаки (*в, г*); подача COP у проміжну зону не змінювалася

Алгоритм роботи базується на залежності запропонованої в роботі [13], однак це приводить до неконтрольованого дрейфу сумарної витрати СОР по всіх форсунках. У той же час, наприклад, постійний дрейф на збільшення загальної витрати СОР надалі обмежує діапазон його регулювання. Оптимальний ступінь подачі СОР пропорційний ширині прокатуємої штаби. Якби її ширина відповідала габаритам всіх зон подачі СОР, то оптимальне значення склало б 50 %, тому що в цьому випадку робоча крапка перебувала б у середині діапазону впливу й, отже, був би максимальним діапазон регулювання. Цей відсоток зменшується пропорційно відношенню ширини штаби до загальної довжини зон подачі СОР. Користувачеві програми надається можливість вводити цей відсоток, виходячи з рекомендацій або незалежно. При зміні сортаменту автоматично використовуються розрахункові рекомендовані системою значення витрати, при цьому забезпечується відключення подачі СОЖ за межами штаби. На цих ділянках валка, як правило, рекомендується передача додаткового тепла, щоб зменшити небажаний різкий перепад теплового профілю.

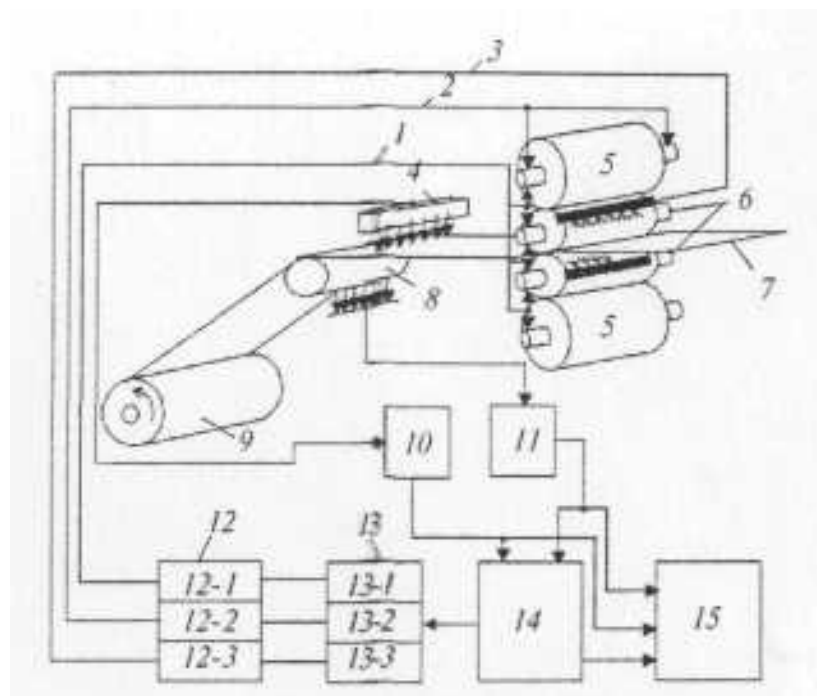


Рисунок 1.5 – Структурна схема керування площинністю штаби з урахуванням розподілу температури по її ширині: 5.6 — опорні й робочі валки; 7— прокатуєма штаба; 9— моталки;

Однак, як відзначається в роботі [14] в існуючих традиційних підходах фізики й механіки деформуемого твердого тіла було два принципово важливих недоліки:

1. Деформуєме тверде тіло, що є складною багаторівневою системою, описується в рамках однорівневого підходу: або тільки на макромасштабному, або тільки на мікромасштабному рівні. Ставиться некоректне завдання прямого переходу від мікромасштабного рівня до макромасштабного, не з огляду на широкого спектра самоузгоджених процесів втрати здвигової стійкості на нано-, мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях.

2. У теорії дислокацій були вирізані їхні ядра і розглядалися тільки пов'язані з дислокаціями поля внутрішніх напружень. Але в ядрі дислокації відбувається локальне структурне перетворення вихідних кристалічних ґрат на наномасштабном рівні.

У роботі [15] виконали статистичний аналіз показників якості штаб із чорних і кольорових металів, що дозволив установити діапазони змін ширини й різношириності, товщини і поперечної різнотовщиності, площинності, механічних властивостей, а також якість поверхні прокату. Установили області впливу технологічних змінних, розмірів і властивостей штаб на показники якості і стійкість прокатки.

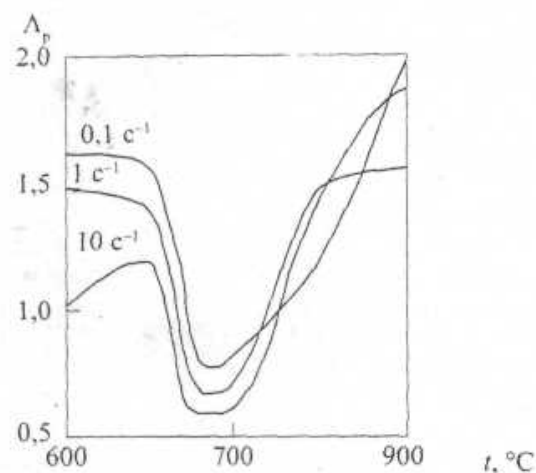


Рисунок 1.6 – Залежність температури і швидкості деформації від граничної пластичності багатолегованого сплаву Лмц 58-2

Упорядкування результатів теоретичних і експериментальних досліджень дозволило систематизувати основні закономірності формування показників якості і деформуємість штаб при прокатці й розробити блок-схему комплексного впливу керуючих впливів, що обурюють, на основні технологічно показники листової прокатки.

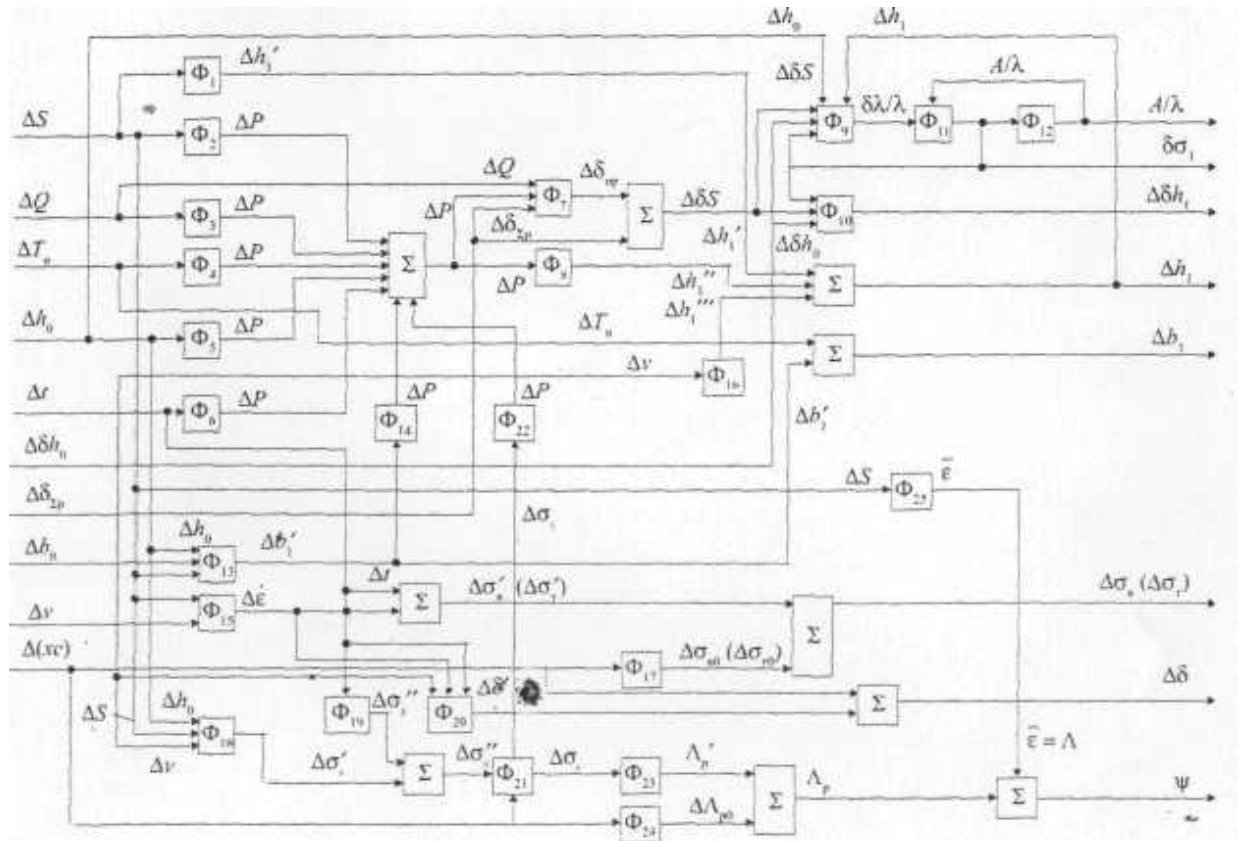


Рисунок 1.7 – Блок-схема керування розмірами, властивостями й деформуємість штаб при прокатці

На основі проведеного аналізу встановили, що для підвищення виходу придатного при прокатці сталевих штаб технологічні режими й початкове настроювання станів доцільно встановлювати за критерієм точності тонких штаб, а для багатолегованих сплавів кольорових металів як пріоритетний критерій варто приймати забезпечення пластичності прокату.

На базі розробленої в роботі [16] моделі алгоритму, у роботі [17] розробили алгоритм розрахунку й оптимізації контрольованого охолодження аркушів. Алгоритм реалізує рішення трьох основних завдань: *розрахунок* температури товстого листа в будь-якій крапці рольганга, що

відводить, при заданому настроюванні УКО. т. е. при заданих витратах води у верхніх і нижніх секціях: *вибір* оптимального настроювання УКО, яке забезпечує необхідну температуру кінця охолодження при заданих початковій температурі, швидкості руху листа й стратегії охолодження; *формування* базової матриці охолодження — таблиці, що містить дані по оптимальному настроюванню УКО при різних значеннях технологічних параметрів у діапазоні їх реально можливих змін у даній партії.

Відповідно до цих робіт у роботі [18] розробили базове програмне забезпечення, що включає користувальницьку програму для персонального комп'ютера й імітаційну модель. Користувальницька програма реалізована в середовищі Delphy-7 і дозволяє в діалоговому режимі визначити раціональні характеристики встаткування ділянки УКО. Імітаційна модель УКО товстолистого стану (пакет "Уколист") створена на базі пакета In Touch для стану 2800. Вона дозволяє моделювати різні стратегії охолодження залежно від технологічного регламенту виробництва високоякісних аркушів з урахуванням технічних можливостей і конструктивних особливостей устаткування. У роботі моделі імітується керування установкою УКО в реальному режимі часу зі зміною технологічних параметрів. Створена імітаційна модель може бути прийнята за основу для створення АСУ установок охолодження розкатів і аркушів у потоці товстолистових станів.

#### *Статичні методи впливу на профіль штаби при прокатці*

Загальна характеристика статичних методів впливу на профіль штаби при прокатці була дана вище. Тому перейдемо до конкретного розбору сутності, переваг і недоліків кожного із цих методів.

*Попереднє профілювання бочки валків.* Найпростішим і найбільше рано виниклим методом компенсації деформацій робочого валка є метод попереднього профілювання його бочки. Власне кажучи, сама по собі деформація (вигину або контактного сплющування) робочого валка не

викликала б занепокоєння, якби при цьому не спотворювалася форма його робочої утворюючої. Описуваний метод заснований саме на тім, що він не прагне запобігти або зменшити деформацію валка. Цим методом домагаються лише того, що в результаті цієї деформації форма робочої утворюючої хитка повинна бути по можливості наближена до прямолінійного. Для цього бочку валка в процесі його виготовлення надають, наприклад, шліфуванням, опуклу форму (тобто дійсно форму «бочки» у споконвічному значенні цього слова), причому величина опуклості профілю валка вибирається з урахуванням величини його можливої деформації.

Профілювання валків здійснюється під час переточувань (перешліфовок) на вальцетокарних або вальцешліфувальних верстатах [19]. У процесі профілювання бочкам валків надається форма певного тіла обертання: циліндра, параболоїда й гіперболоїда обертання (рис. 1.8 а, б), циліндра із двома (рис. 1.8 в) або із чотирма (рис. 1,8 г) усіченими конусами. (Довжина циліндричної ділянки валків (рис. 1.8 в, з) становить 20—50% довжини бочки). Відповідно до цим утворюючий бочки валка буде являти собою відповідно пряму, опуклу або ввігнуту параболу, гіперболу, циклоїду, опуклу або ввігнуту ламану лінію, симетричну щодо середини бочки. Та або інша форма утворюючої вибирається залежно від типу стана, величини вихідної (верстатної) опуклості (увігнутості), теплової опуклості та зношування валків, а також залежно від геометричних розмірів штаб і листів.

Валки одноклітєвих товстолистових станів дуо виготовляють опуклими або із циліндричною ділянкою посередині та скосами по краях (рис. 1.8 в, з). Величина опуклості (конусності) становить 1,0—2,0 мм.

Валки чорнових клітей дуо та кварто товстолистових станів звичайно виконують або із циліндричною бочкою, або з невеликою ввігнутістю.

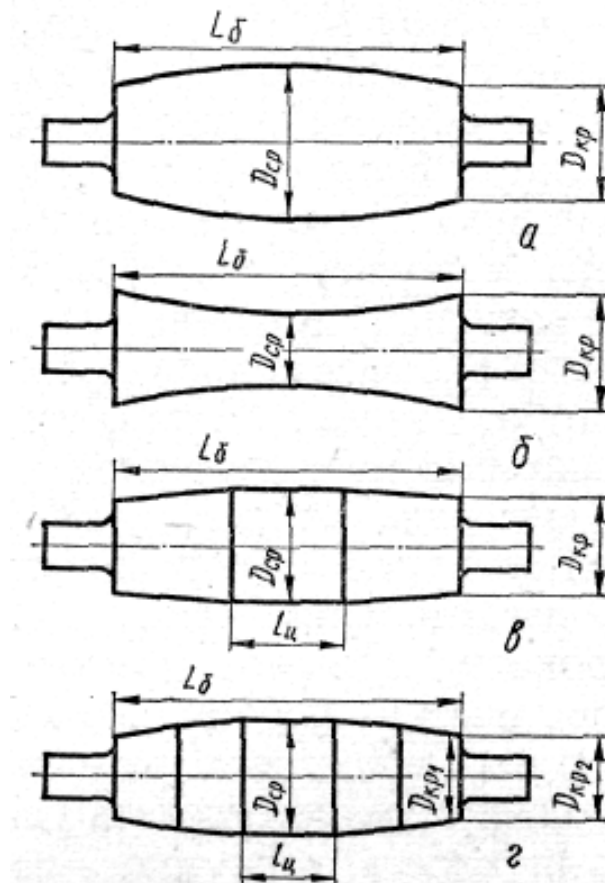


Рисунок 1.8 – Форма профільованих валків

Валки чорнових клітей тріо Лаута профілюють у такий спосіб:

- 1) всі три валки циліндричні, з наступною заміною всього комплекту;
- 2) всі три валки циліндричні, з наступними замінами середнього циліндричного валка опуклим. Опуклість останнього збільшується в міру виробітку крайніх валків, досягаючи 1,5—2,0 мм при останній установці;
- 3) верхній і нижній валки опуклі, середній — циліндричний, з наступними замінами середнього валка опуклим. Вихідна опуклість крайніх валків становить 0,1—0,5 мм; опуклість середнього валка збільшується в міру виробітку крайніх валків і досягає 1,5—2,0 мм.

Робітничі валки чистових клітей кварто товстолистових станів виконують із параболічною ввігнутістю, що досягає 0,4—0,5 мм, опорні — циліндричні або з невеликою ввігнутістю. Таке профілювання забезпечує стійкість розкату у валках при прокатці. Однак поперечна різновтовщинність

готового прокату виходить значної — не менш 0,15—0,25 мм (середина листа товща крайок).

Верхній і нижній валки чистових клітей тріо Лаута товстолистових станів виготовляють циліндричними або з невеликою опуклістю (0,1—0,5 мм). Середній валок має циліндричну бочку або бочку з невеликою опуклістю (0,2—0,5 мм). Іноді середній валок виконують із циліндричною ділянкою по середині (рис. 1.8, в). При цьому величина конусності досягає 0,2—0,5 мм. У міру виробітку валків замінюють тільки середній валок з поступовим збільшенням опуклості (конусності) до 2,0—3,0 мм. Таке профілювання сприяє скороченню кількості перевалок валків і зменшенню поперечної різнотовщинності прокатуваних листів.

На безперервних широкополосних станах профілюваними є тільки верхні робітники валки, а опорні та нижні робітничі валки всіх клітей — циліндричними. Найчастіше верхні робітничі валки чорнових і чистових клітей мають опуклість 0,05—0,45 мм (більші значення характерні для валків чорнових клітей). Робітничі валки чистових клітей деяких станів виконують циліндричними (в останніх клітях) або з увігнутістю до 0,2—0,3 мм (у початкових клітях), що забезпечує більшу стійкість штаби в процесі прокатки та кращу площинність готової продукції.

На станах холодної прокатки застосовують валки тільки з опуклим профілем. При цьому профілюють обоє робітничі або тільки один робочий валок, обоє опорних або тільки один опорний валок або один робочий (верхній) і один або два опорних хитка. Найчастіше профілюють тільки один верхній робочий валок з опуклістю 0,2—0,6 мм.

Для запобігання защемлення крайок штаби на деяких станах холодної прокатки опорні валки виготовляють із циліндричною ділянкою по середині та скосами по краях бочок (рис. 1.8 в). Довжина скосів становить 100—150 мм, а їхній діаметр на 1,5—3,0 мм менше діаметра середньої частини бочки.

Одночасно із профілюванням поверхні бочки валка їй надається і певний ступінь чистоти, необхідна для одержання штаб і листів з якісною поверхнею. Із



цією метою валки товстолистових станів обточивають на вальцетокарних верстатах. У всіх інших випадках валки шліфуються, причому валки станів холодної прокатки після шліфування полірують до дзеркального блиску або піддають насічці чавунним дробом для одержання матової поверхні.

Слід зазначити, що останнім часом у літературі з'явився опис нових, більше складних попередніх профілювань, з обліком виявленої при дослідженнях непараболічності теплового профілю валка. Остання викликається більше складним, чим параболічний, законом розподілу температури по довжині валка, причому найбільші відхилення від параболічного закону мають місце в зонах, що відстоять від краю бочки приблизно на  $1/6$  її довжини. Неврахування цієї обставини може приводити до підвищеного місцевого зношування бочки і до перекручування параболічності профілю, непереборному за допомогою звичайних динамічних методів регулювання.

Навпроти облік цієї обставини при попереднім профілюванні дозволяє одержати сумарний профіль валка правильної й регульованої форми.

У висновку не можна не згадати один досить своєрідний метод, якщо можна так сказати, «непрямої» профілювання опорних валків. Мова йде про взаємне перехрещування робочих валків у плані. При непаралельності осей робочого та опорного валків лінія їхнього контакту стає непрямою, опорний валок як би знаходить опукле профілювання. Ця ідея в сполученні із профілюванням робочого валка дозволяє встановлювати потрібний профіль позіху валка. Однак, для конструктивного виконання в прокатній клітці кварто вона все-таки досить складна.

Отже, можна констатувати, що попереднє профілювання валків, як робочих, так і опорних, а також сукупність тих і інших, є досить доступним методом статичної корекції профілю штаби. Як ми побачимо далі, найбільше поширення цей метод одержує в сполученні з іншими, переважно динамічними методами.

*Збільшення твердості робочих клітей.* Збільшення твердості робочих клітей кварто в цей час досягається двома способами:

1. Підвищенням твердості основних елементів робочих клітей.
2. Попередньою напругою робочих клітей.

Перший спосіб припускає збільшення твердості робочих клітей за рахунок збільшення розмірів окремих елементів кліті (діаметрів опорних валків, перетинів стійок станин і т.д.), а також за рахунок модернізації елементів кліті, наприклад, заміни підшипників кочення опорних валків на підшипники рідинного тертя. Збільшенню твердості сприяє також вибір оптимальних співвідношень окремих елементів кліті.

У більшості випадків досягнення необхідної точності штаби обмежується твердістю валкового вузла, тому при збільшенні твердості робочих клітей прагнуть насамперед підвищити твердість валкового вузла.

Підвищення твердості валкового вузла досягається за рахунок збільшення діаметрів робочого та опорного валків, а також за рахунок збільшення діаметра шейки опорного валка. Однак збільшення зазначених розмірів валків пов'язане зі збільшенням розмірів вікна станини, що викликає збільшення пружної деформації станини. Тому при підвищенні твердості кліті шляхом збільшення розмірів окремих елементів кліті повинні бути знайдені найбільш оптимальні співвідношення геометричних розмірів останніх.

Збільшення твердості робочих клітей за рахунок підвищення твердості їхніх окремих елементів має обмежені можливості та зв'язано зі значним збільшенням маси і габаритів робочих клітей. У багатьох випадках таке рішення є технічно недоцільним і економічно не вигідним.

Більше перспективним є другий спосіб збільшення твердості робочих клітей – створення попередньо напружених клітей. У цьому випадку збільшення твердості супроводжується зменшенням маси і габаритів робочих клітей.

Відмінною рисою попередньо напружених клітей є те, що перед прокаткою стійки станин, натискні гвинти, підшипники та подушки останніх

навантажуються зусиллями, величина яких порівнянна або перевищує величину тиску металу на валки. Під дією зусилля попереднього напруження (розпору) величина пружної деформації названих деталей кліті вибирається частково або повністю до захвата металу валками. У період захвата металу валками в процесі прокатки спостерігається лише «пружинення» кліті, викликане пружним подовженням при розвантаженні деталей, що розпирають (гвинтів, клинів і т.д.) і пружними деформаціями валкового вузла. деталі, що розпирають, мають більшу твердість, тому їхні пружні деформації в порівнянні із пружними деформаціями кліті невеликі, що сприяє зменшенню «пружини» кліті й, отже, збільшенню її модуля твердості.

Необхідно відзначити, що при попередньому навантаженні кліті пружна деформація валкового вузла не компенсується. У зв'язку із цим другий спосіб збільшення твердості клітей доцільніше застосовувати на станах з невеликою довжиною бочки, а також на діючих станах з невеликим перетином стійок станин.

Уперше принцип попереднього напруження був використаний у так званих безстанинних клітях (шведський патент). У безстанинних клітях подушки опорних валків з'єднані чотирма гвинтами, які сприймають зусилля прокатки та роблять установку потрібного зазору між ними. Зусилля попереднього напруження в безстанинних клітях більше тиску металу на валки. Внаслідок попередньої напруги, а також скорочення кількості та довжини навантажених деталей твердість клітки збільшується. Недоліком безстанинних клітей є складність синхронного привода гвинтів і складність перевалки валків.

На рисунку 1.9 представлена попередньо напружена кліть, розроблена фірмою «Хантер» (США). Вона складається з робочих валків 1, гідравлічного натискного пристрою 2, станин 3, опорних валків 4, клинових пристроїв 5, розташованих між подушками опорних валків, і привода клинів 6.

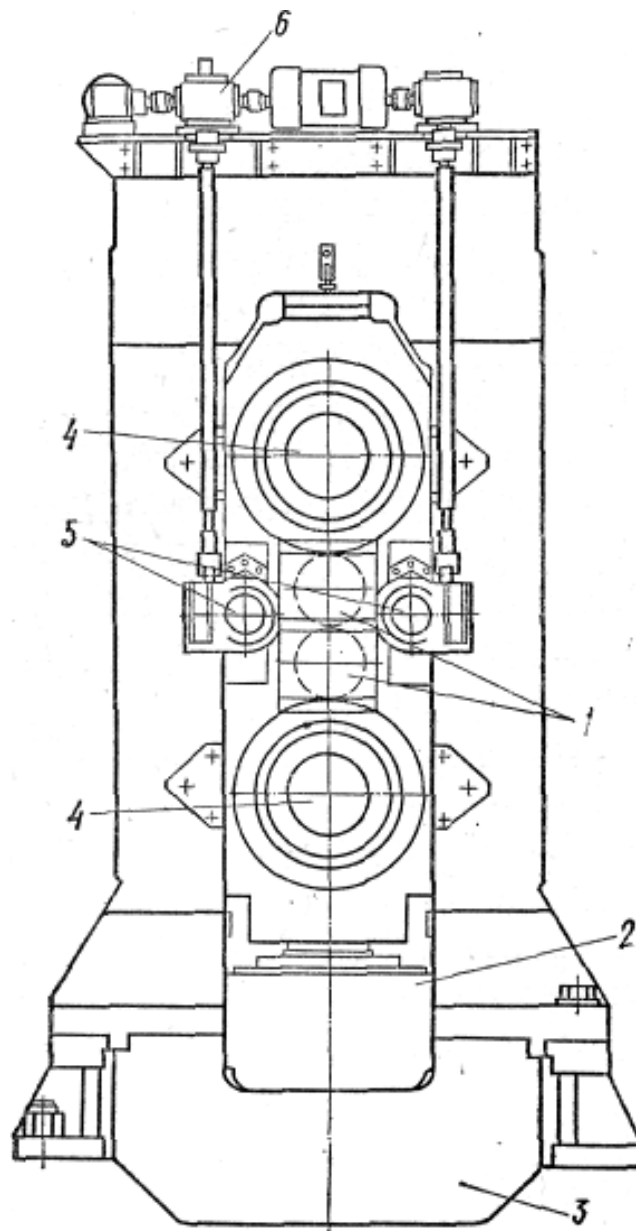
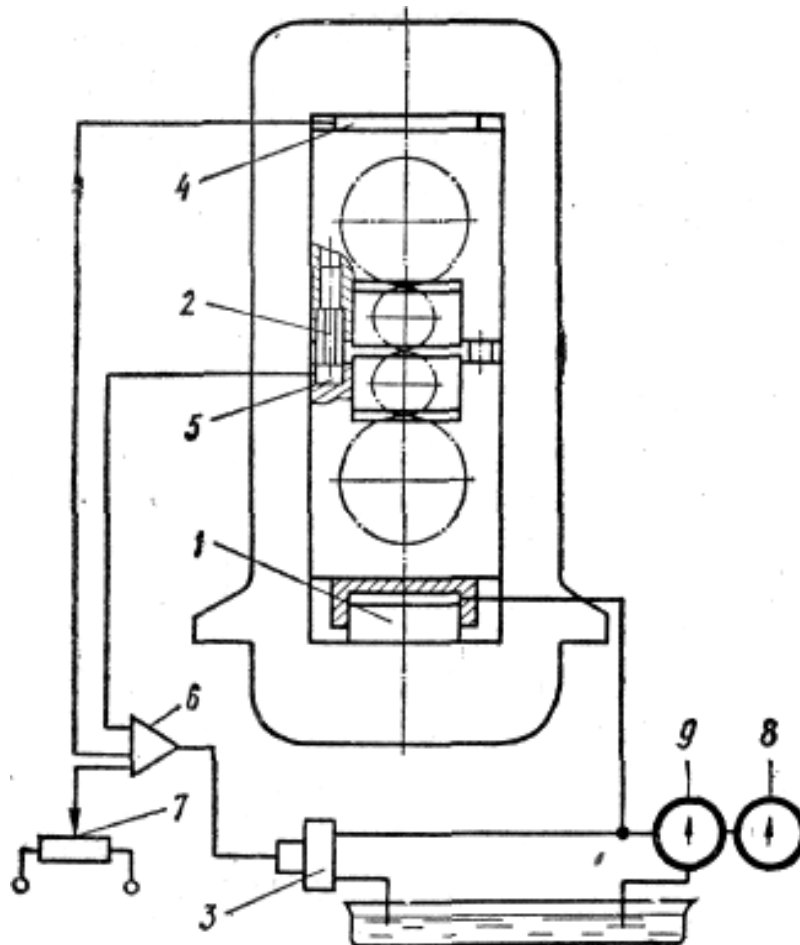


Рисунок 1.9 – Попередньо напружена кліть кварто фірми Хантер (США)

Установка розчину валків виробляється за допомогою клинових пристроїв, виготовлених з легованої сталі, а попередня напруга кліті здійснюється гідравлічним натискним пристроєм. При цьому стійкі станин розтягуються, а подушки опорних валків і клинових механізмів стискаються. Зусилля попередньої напруги приймається на 30-40% більше тиски металу на валки.

Великий практичний інтерес представляють попередньо напружені кліті кварто конструкції фірми «Леви» (Англія), що працюють у сполученні із

системою автоматичного регулювання товщини штаби. За рахунок попередньої напруги твердість робочих клітей даної конструкції збільшується на 40% [ ].



Рисунку 1.10 – Схема попередньо напруженої кліті з регульованим навантаженням фірми «Леви» (Англія)

На рисунку 1.10 представлена схема кліті фірми «Леви». Попередня напруга кліті створюється гідравлічним натискним пристроєм 1, розміщеним під подушками нижнього опорного валка. Тиск рідини в гідросистемі створюється насосом 9, що приводять у рух двигуном 8, і становить  $15 \text{ МН/м}^2$  (150 ат). Між подушками опорних валків розташовані чотири розпираючих гвинти 2, що забезпечують попереднє напруження кліті. Переміщення їх здійснюється від окремого привода. Зусилля під цими гвинтами вимірюються мездозами 5, а навантаження на кліть — мездозами 4. У процесі прокатки

величина зусилля під гвинтами, що розпирають, дорівнює різниці зусилля попереднього напруження і тиску металу на валки. При необхідності гвинти, що розпирають, можуть бути прибрані в подушки опорних валків і тоді розглянута кліть перетворюється у звичайну з гідравлічним натискним пристроєм.

Кліть фірми «Леви» працює в автоматичному режимі. Регулювання навантаження на кліть здійснюється зміною тиску рідини в гідросистемі за допомогою керуючого сервомеханізму 3. Робота сервомеханізму регулюється сигналами, що надходять від мездоз 4 і 5 через підсилювач 6 і систему порівняння 7. Описана система регулювання забезпечує чотири режими роботи кліті:

1. *Режим постійного тиску металу на валки.* При цьому режимі роботи попередня напруга кліті не застосовується. Підтримка постійного тиску прокатки забезпечує найбільш м'які характеристики «пружини» кліті. Такий режим потрібно при дресируванні та прокатці фольги, коли биття валків є основним чинником, що визначає величину поздовжньої різнотовщинності.

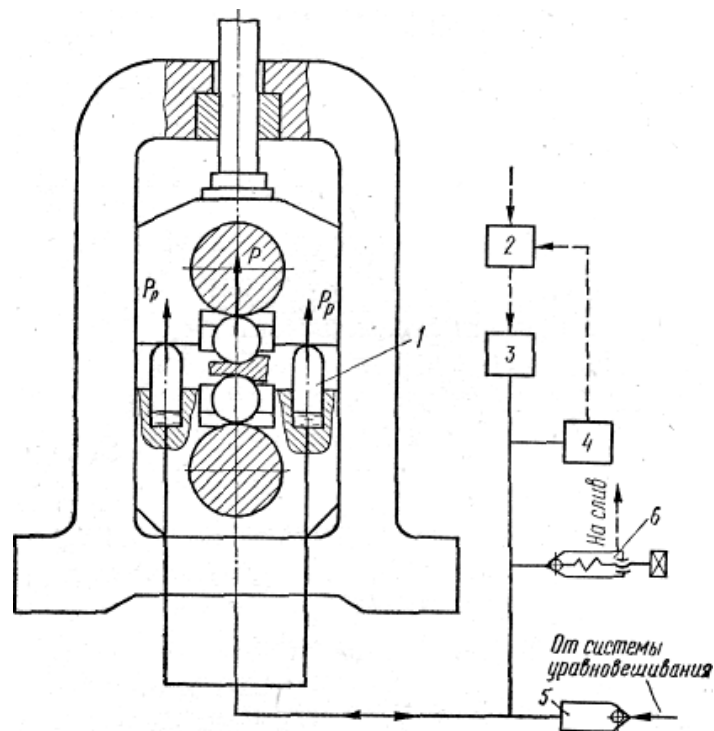
2. *Режим постійної напруги кліті.* Цей режим роботи передбачає застосування попередньої напруги кліті. Підтримування постійної напруги кліті забезпечує середню твердість кліті, що сприяє зменшенню впливу биття валків і коливання товщини підкату на товщину прокатуваної штаби.

3. *Режим постійного тиску на гвинтах.* При цьому режимі роботи, внаслідок попередньої напруги кліті, її твердість збільшується. Тому коливання товщини прокатуваних листів викликані пружними деформаціями подушок, гвинтів і станин, зведені до нуля. Вплив пружних деформацій валкового вузла на товщину прокатуваного листа не компенсується.

4. *Режим постійного зазору між валками.* Такий режим роботи застосовується, коли необхідна підвищена твердість кліті. При цьому використовуються обидві мездози кліті. За допомогою зворотного зв'язка від мездоз визначається і безупинно усувається відхилення від номінальної товщини штаби.

Істотним недоліком цих клітей є складність синхронізації переміщення елементів, що розпирають (клинів, гвинтів).

В останні роки ВНИИМетМашем запропонований новий спосіб напруги клітей кварто. Суть цього способу полягає в тому, що між подушками опорних валків устанавлюються досить потужні гідроциліндри *1*, що виконують роль елементів, що розпирають (рис. 4). Спосіб передбачає можливість роботи кліті в трьох режимах: постійної напруги кліті, постійного тиску на натискні гвинти та постійний зазор між валками.



Рисунку 1.11 – Схема напруг кліті конструкції ВНИИМетМаш

В режимі постійної напруги кліть працює в такий спосіб (рисунку 1.11). Після захвата штаби валками сигнал про наявність металу в них надходить у систему керування 2, що включає пристрій 3. Цей пристрій збільшує тиск у гідроциліндрах *1* до заданої величини розпору  $P_p$ , фіксуємоє реле тиску 4. При досягненні заданої величини тиску  $P_p$  реле 4 відключає пристрій 3 і кліть перетворюється в напружену. Надалі прокатка штаби

ведеться в попередньо напруженій кліті. Коли тиск у гідросистемі зменшується, що бракує обсяг масла надходить від системи зрівноважування через зворотний клапан 5.

Після виходу заднього кінця штаби з валків кліть розвантажується і подушки опорних валків зближаються, що викликає збільшення тиску масла в гідросистемі. У міру збільшення тиску масла спрацьовує запобіжний клапан 6 і зайве масло зливається в бак. При завданні у валки наступної штаби процес повторюється.

Через те, що напруга кліті виробляється після захвата штаби валками, зусилля напруги (розпору)  $P_p$  визначається з умови нерозкриття зазорів між подушкою і гідроциліндрами, що розпирають, не на весь тиск прокатки, а тільки на величину відхилення його від номіналу. Тому необхідне зусилля розпору при такій схемі напруги кліті в кілька разів нижче, ніж у напружених клітях інших конструкцій.

Розглянутий спосіб напруги дозволяє підвищити твердість звичайних клітей кварто без збільшення їхньої маси приблизно на 30% [ ].

Відомі й інші конструкції попередньо напружених клітей.

#### *Противигин і додатковий вигин як основний динамічний метод*

Цей метод, що складається в тім, що валки примусово згинають у напрямку, що забезпечує в результаті випрямлення робочої утворюючої хитке, уперше був реалізований на промисловому прокатному стані в США в 1960 р., і з тих пор завоював загальне визнання та одержав широкий розвиток.

Без перебільшення можна сказати, що за минулі роки цей метод став найпоширенішим у світовому прокатному виробництві, а по кількості виданих патентів він також не має собі рівних.

Загалом кажучи, ця обставина досить легко з'ясовна. Справді, якщо розглянути такий простий метод, як попереднє профілювання валка, то легко бачити, що на станах із широким сортаментом прокатуваних штаб потрібен



великий парк валків всілякого профілювання, причому з переходом на кожний новий вид штаби потрібно перевалювати валки, задовго до їхнього зношування, що досить не вигідно. У той же час противигин є досить гнучким методом регулювання поперечної різнотовщинності у всіляких умовах прокатки, причому це регулювання може бути досить легко автоматизовано.

Загалом кажучи, це достоїнство властиве динамічним методам впливу на профіль штаби, однак, противигин об'єднав у собі та інші достоїнства, властиві порізно різним із цих методів, тому якщо підсумувати їх, можна вказати на наступні переваги систем противигину:

1. Швидкодія, що дозволяє регулювати профіль штаби безпосередньо в процесі прокатки.
2. Можливість на тих самих валках вести прокатку штаб різної ширини, матеріалу, і з різними обтисненнями.
3. Можливість компенсації зміни профілю валків під впливом температури, тобто виключення необхідності попереднього підігріву валків після тривалої зупинки стана.
4. Можливість поступової компенсації зношування валків.
5. Зниження згинаючих напруг у бочку валків.
6. Можливість зменшення розмірів опорних валків.
7. Можливість використання системи одночасно і для автоматичного регулювання поздовжньої різнотовщинності (тобто в якості САРТ штаби).
8. Можливість застосування системи на діючих станах.
9. Можливість впливу як на опорні, так і на робочі валки.
10. Можливість двосторонньої компенсації профілю робочого валка.
11. Можливість автономного впливу, тобто без передачі додаткових зусиль на станину кліті.
12. Гарна відповідність пружної лінії валка, підданого противигину, і пружної лінії його вигину під дією зусилля прокатки (у вигляді симетричної рівномірно розподіленого навантаження).

Отже, переваги систем противигину численні й очевидні. Однак, як і всякий технічний напрямок, противигин має і свої недоліки. Ці недоліки наступні:

1. Ускладнення конструкції кліті, особливо при реалізації автономних систем противигину.
2. Ускладнення в багатьох випадках перевалки кліті.
3. Виникнення (у неавтономних системах) додаткових зусиль на кліть.
4. Необхідність посилення шийок валків, при противигині опорних валків.
5. Необхідність посилення підшипникових опор частково і в автономних системах противигину.
6. Необхідність подовження опорних валків (створення плеча) при їх противигині.

Розглянемо тепер основні принципові схеми противигину валків. Таких схем відомо три:

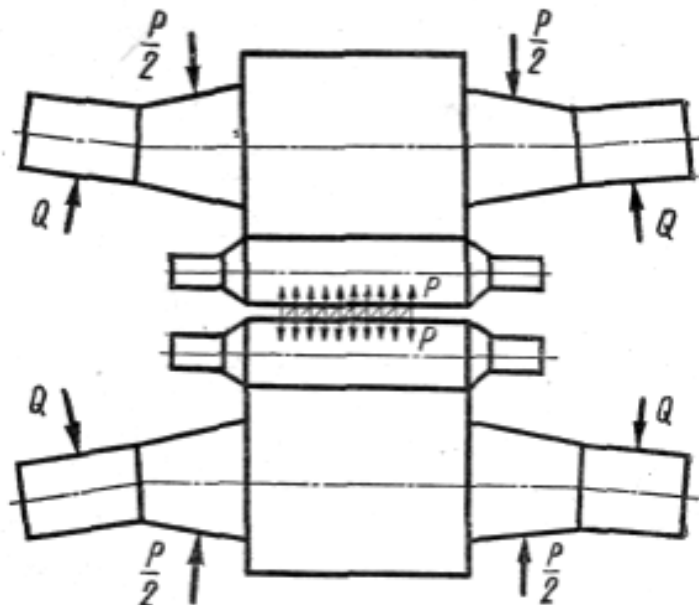
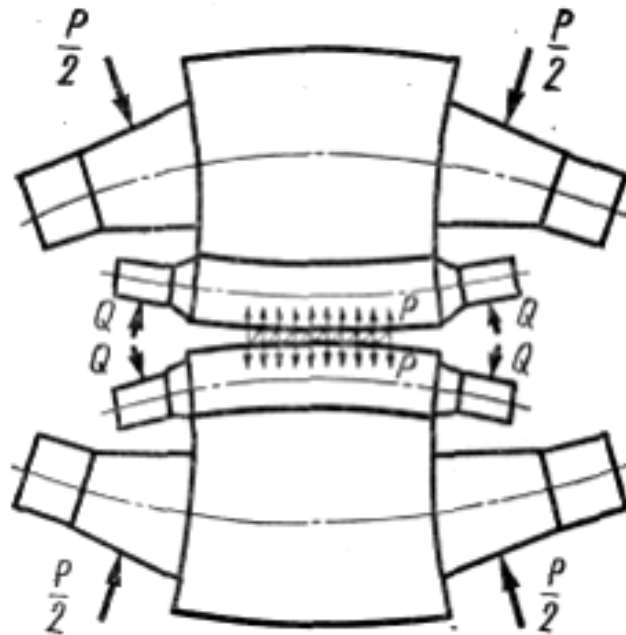


Рисунок 1.12 – Противигин опорних валків

Перша – противигин опорних валків (або робочих у кліті дуо) характеризується додатком розпирних зусиль до подовжених шийок опорних валків, так, що ці зусилля збігаються по напрямку із зусиллям прокатки (або

створення протівигинаючого моменту на шейках яким-небудь іншим способом). При цій схемі опорою валка є його основні підшипники, взаємодіючі через подушку з натискними гвинтами (рис. 1.12).



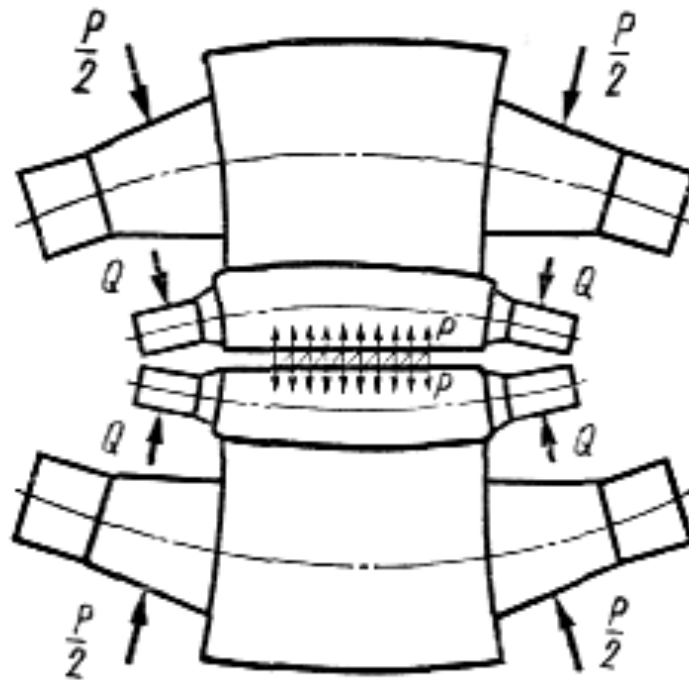
Рисунку 1.13 – Протівигин робочих валків

Інший характер носить протівигин робочих валків у кліті кварто. Опорою робочого валка в кліті кварто є не подушка його, а опорний валок, а при опуклому профілюванні опорного або робочого валків – середина опорного валка. Щодо цієї крапки й може бути здійснений протівигин робочого валка, у зв'язку із чим немає необхідності в подовженні його шийок, розпірати можна безпосередньо подушки робочих валків (рис. 1.13). Це значно простіше конструктивно і має ще та перевага, що при меншій твердості робочого валка і більшому плечі моменту потрібно менше розпірне зусилля. Однак, це зусилля практично у всіх випадках складається із зусиллям прокатки, що є несприятливим чинником, тоді як при протівигині опорних валків цього в ряді випадків вдається уникнути. Іншим недоліком другої схеми є підвищення питомого міжвалкового тиску по краях бочок робочого та опорного валків. Незважаючи на це, схема розпору подушок

робочих валків є більше ефективною в змісті впливу на профіль штаби, чим схема розпору подушок опорних валків, хоча в останньої є така фундаментальна перевага, як можливість використання її в якості САРТ (тобто для автоматичного регулювання поздовжньої різнотовщинності штаби), тоді як розпір робочих валків ускладнює таке регулювання.

У зв'язку із цим можна зробити вивід, що на товстолистових станах переважніше застосування другої схеми (протівигину робочих валків), на тонколистові ж станах, де при великій довжині штаби істотного значення набувають питання поздовжньої різнотовщинності, перевага повинне бути віддане протівигину опорних валків.

Нарешті, третя можлива схема вигину впливу на робочих валки полягає в тім, що взаємно розпирають подушки робочого та відповідного опорного валка. У цьому випадку опорою робочого валка, щодо якої виникає момент, є сама штаба, причому робочий валок вигинається в ту ж сторону, що й по дією зусилля прокатки, через що цей різновид вигину впливу на робітники валки одержала назву додаткового вигину (рис. 1.14).



Рисунку 1.14 – Додатковий вигин робочих валків

Саме собою зрозуміло, що ця схема може застосовуватися тільки в сполученні з опуклим попереднім профілюванням робочих валків. Оскільки в цій схемі розпір валків лише допомагає зусиллю прокатки, а не протидіє йому, ця схема ще більш ефективна відносно впливу на профіль штаби, до того ж вона знижує міжвалковий тиск і не передає зусиль на натискні гвинти і станини. Безроздільному поширенню цієї схеми перешкоджає, однак, її досить серйозний і органічний недолік: вона вимагає відключення системи противигину перед кожним виходом штаби їхніх валків і відповідно включення системи після кожного входу штаби у валки.

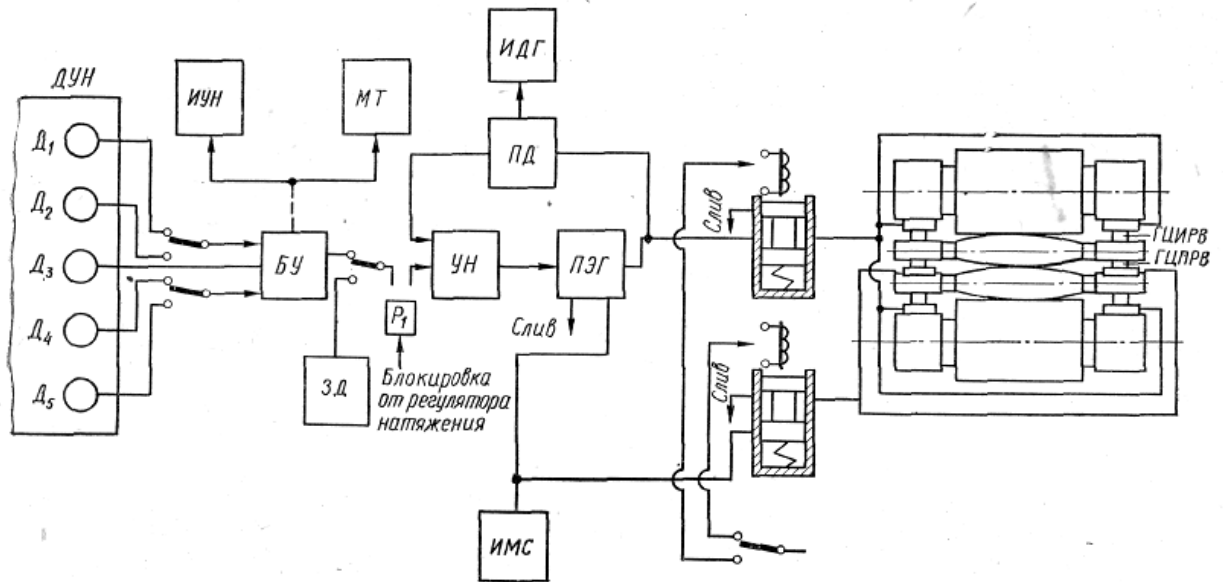
### 1.3 Регулювання форми штаби

Успішна робота систем автоматичного регулювання форми штаби залежить насамперед від ефективності оперативного контролю площинності в процесі прокатки. Прямий вимір неплоскостності штаби в промислових умовах важко і не забезпечує заданої точності. Тому для виміру контролю неплоскостності штаби користуються непрямими методами, заснованими на вимірі витяжок, швидкостей або питомих натягів по ширині. Найбільший практичний інтерес представляє метод контролю неплоскостності, заснований на зміні характеру розподілу питомих натягів по ширині штаби.

Регулювання форми штаби супроводжується обов'язковим (хоча й незначним) зміною її поперечного профілю. Тому системи автоматичного регулювання форми штаби відомі в літературі як системи автоматичного регулювання профілю і форми штаби (САРПФ). На рис. 1.15 наведена схема системи автоматичного регулювання профілю і форми штаби, для дрессировальних і безперервних станів холодної прокатки.

У розглянутій системі імпульсами для зміни профілю активної утворюючих валків служать сигнали від безконтактних магнітоанізотропних датчиків питомого натягу ДУН, розташованих під штабою, що рухається, на

ділянці між останньою кліткою стана і моталкою. Наприклад, однакові показники всіх п'яти датчиків питомого натягу  $D_1 - D_5$  свідчать про те, що вихідна штаба є рівною. Поява різниці натягів по ширині штаби свідчить про погіршення її форми, причому чим більше ця різниця, тим вище неплоскість.

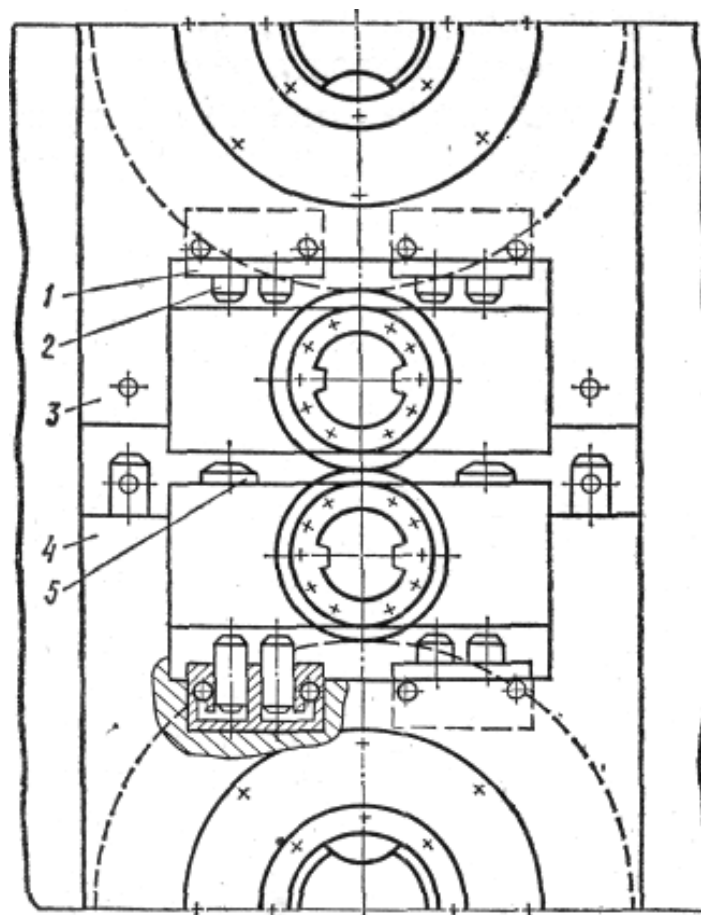


Рисунку 1.15 – Структурна схема електрогідравлічної системи автоматичного регулювання профілю і форми штаби (САРПФ)

Система САРПФ, представлена на рисунку 1.15, може працювати з автоматичним і ручним керуванням. З автоматичним керуванням система працює в такий спосіб. З появою неплоскості штаби з'являється різниця питомих натягів на виході ДУН. Ця різниця у вигляді електричного сигналу надходить на вхід блоку посилення і логічної обробки інформації БУ. Тут відбувається посилення і порівняння сигналів із заданим алгоритмом. Далі різниця сигналів датчиків питомого натягу надходить на вхід підсилювача небалансу ПН, в електрогідравлічному перетворювачі ПЕГ перетвориться в зміну тиску рідини в гідравлічних циліндрах ГЦПРВ або ГЦПРВ, що приводить відповідно до додаткового вигину або противигину робочих валків з метою зменшення неплоскості штаби. Зворотний зв'язок тиску рідини в

гідроциліндрах додаткового вигину (ГЦПРВ) або противигину (ГЦПРВ) робочих валків здійснюється за допомогою перетворювача тиску ПД із електричним виходом, сигнал якого надходить на вхід УН. Коли тиск рідини в гідравлічних циліндрах прийме значення, що виходить за межі діапазону регулювання, від реле тиску ІДГ загоряються сигнальні лампочки, що вказують, у яку сторону змінився тиск. У цих випадках повернення тиску робочої рідини в середину діапазону регулювання виробляється відповідним переміщенням натискних гвинтів. Постачання гідравлічної системи маслом здійснюється насосами джерела маслопостачання ІМП.

У випадку ручного керування системою сигнали на зміну тиску робочої рідини в гідравлічних циліндрах ГЦПРВ і ГЦПРВ подаються в УН від дистанційного задатчика тиску ЗД.



Рисунку 1.16 – Схема розташування гідравлічних циліндрів для вигину і противигину робочих валків

Регулювання профілю активної утворюючої в розглянутій системі виробляється за комбінованою схемою, тобто вигином і противигином робочих валків. Схема розташування гідравлічних циліндрів представлена на рис. 1.16. Додатковий вигин робочих валків здійснюється вісьма гідравлічними циліндрами 1 із плунжерами 2, розташованими в подушках 5 і 4 відповідно верхніх і нижнього опорних валків. Противигин робочих валків виробляється гідравлічними циліндрами 5, вмонтованими в подушках нижніх робочих валків.



## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧІ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Теоретичне обґрунтування задачі дослідження

Головна мета даного розділу – теоретично визначити показники форми листових зразків до і після прокатування, скласти рівняння зміни форми під час прокатування та віднайти коефіцієнти вирівнювання форми.

Завданням листової прокатки разом із процесами дресування та випрямлення є отримання штаб і листів пласкої форми, тобто без дефектів «хвилястість» і «коробчатість». В промислових умовах форму листів характеризують величиною відношення непласкості “ $a$ ” в мм до усталеної довжини “ $L$ ” в м, на якій ця непласкість виміряна. Але це співвідношення не показує, чи є лист або ділянка штаби хвилястими, пласкими або коробчатими, а також не бере до уваги ширину штаби.

З метою автоматичного регулювання форми штаб показник форми повинен характеризувати пласкість прокатуваного металу в цілому, тобто він повинен бути функцією усіх розмірів штаби, що змінюються під час прокатування.

Щоб отримати узагальнений показник форми (рис. 2.1), розглянемо два поперечних розрізи листа. Якщо достоту виміряти довжину поздовжніх дільниць поміж перерізами на краях та по середині листа, то виявиться, що для плаского листа ці величини будуть однаковими, для неплаского – навпаки, різними. Причому, чим значнішою буде різниця цих довжин, тим більшим буде відхилення форми листа від пласкої. Відхилення форми листа від пласкої при одній і тій же відносній різниці довжин збільшується зі зменшенням ширини листів  $b$ . Тому форму листів  $\Phi_l$  узагальнено можливо оцінити відношенням різниці довжин по середині  $l_c$  та по краях листа  $l_k$  до середньої довжини  $l$  і ширини листа  $b$  на дільницях поміж перерізами листа, тобто:

$$\Phi_l = \frac{l_c - l_R}{b \cdot l} \quad (2.1)$$

$$l = \frac{l_c - l_k}{2} \quad (2.2)$$

Таким чином, показник форми листа  $\Phi_l$  буде позитивним для коробчатого, від'ємним для хвилястого і дорівнюватиме нулю для плоского листа.

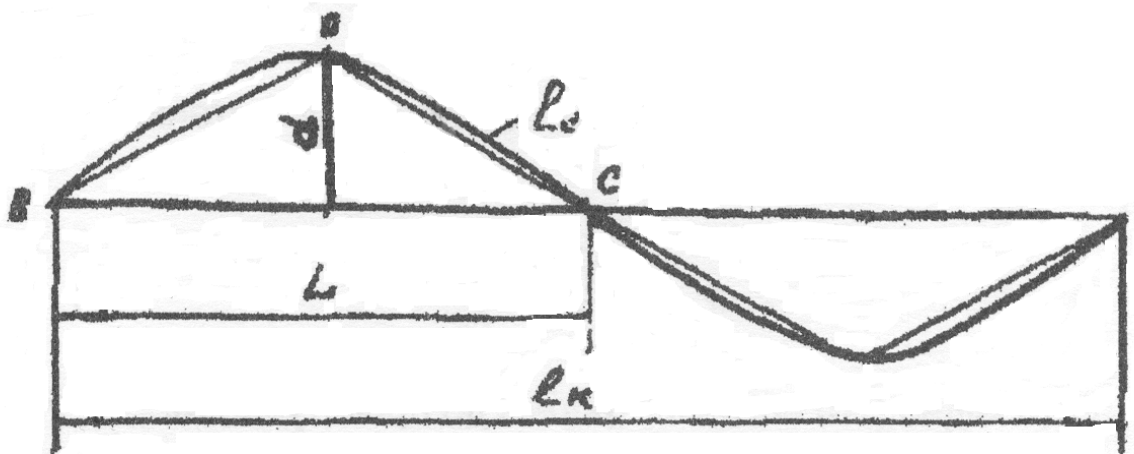


Рисунок 2.1 – Ділянка листа коробчатої форми

Визначимо зв'язок поміж отриманим показником форми  $\Phi_l$  та показником, яким користуються для контролю якості форми листів в промислових умовах. Для цього розглянемо ділянку листа коробчатої форми, позначивши довжину на півхвилі дефекту форми  $L$  (рис. 2.1). За  $b > L$  форма ділянки листа, відображена величиною непласкості віднесеної до довжини, на котрій вона виміряна, буде дорівнювати  $a/L$ . Для визначення показника форми  $\Phi_l$  на виділеній ділянці листа вираховуємо довжину двох напівхвиль  $l_k$ , користуючись довжиною її горизонтальної проекції  $l_k$  та величиною непласкості  $a$ , замінивши криву, яка відображає коробчатий лист по його середині двома відрізками  $BO$  та  $OC$ .

Ураховуючи, що в  $a/b \ll l$  і прийнявши  $l_k \approx l$  та користуючись виразом (2.2), отримаємо:

$$l_c = l_k \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2a}{L}\right)^2} \approx 1 \cdot \left(1 + 2\frac{a^2}{L^2}\right) \quad (2.3)$$

підставивши  $l_c$  із (2.3) в (2.1) та замінивши в останньому  $l_k$  на  $l$ , одержимо:

$$\Phi_{л} = \frac{2 \cdot a^2}{b \cdot L^2} \quad (2.4)$$

Відповідно (2.1) показник форми до прокатування:

$$\Phi_{л_0} = \frac{l_{c_0} - l_{k_0}}{B_0 \cdot L_0} \quad (2.5)$$

Після прокатування:

$$\Phi_{л_1} = \frac{l_{c_1} - l_{k_1}}{B_1 \cdot L_1} \quad (2.6)$$

Показники форми по (2.5) та (2.6) в САРФ використати неможливо тому, що неможливе постійно-безперервне вимірювання довжини кайців і середини штабового металу безпосередньо під час прокатування. Тому для автоматичного регулювання величини показників  $\Phi_{л_0}$  і  $\Phi_{л_1}$  визначають за витяжкою листового металу під час його прокатування. Розподіл витяжки по ширині отримаємо скориставшись величинами узагальненої (середньої) витяжки  $\lambda$  та нерівномірності витяжки по ширині листа  $\Delta\lambda_0$ . Узагальнену витяжку виразимо напівсумою витяжки середини  $\lambda_c$  та краях листа  $\lambda_k$ , тобто:

$$\lambda = \frac{\lambda_c + \lambda_k}{2} \quad (2.7)$$

а нерівномірність розподілу витяжок як їх різницю:

$$\Delta\lambda_y = \lambda_c - \lambda_k \quad (2.8)$$

де  $\lambda_c$  і  $\lambda_k$  – відповідно витяжка середини та краю листа, які будуть дорівнювати:

$$\lambda_{\bar{N}} = \frac{l_{C_1}}{l_{C_0}} \quad (2.9)$$

$$\lambda_{\bar{N}} = \frac{l_{K_1}}{l_{K_0}} \quad (2.10)$$

Завваживши, що  $l_{C_0}/l_0 \approx l_{K_0}/l_0 \approx 1$ , одержимо:

$$\frac{l_{C_1} - l_{K_1}}{l_1} - \frac{l_{C_0} - l_{K_0}}{l_0} = \frac{\Delta\lambda_y}{\lambda} \quad (2.11)$$

Звідси отримаємо загальне рівняння зміни форми листа під час прокатки:

$$b_1 \cdot \Phi_{L_1} = b_0 \cdot \Phi_{L_0} + \frac{\Delta\lambda_y}{\lambda} \quad (2.12)$$

У випадку холодної прокатки без розширення листів, тобто коли  $b_1 = B_0$ , будемо мати:

$$\Phi_{L_1} = \Phi_{L_0} + \frac{\Delta\lambda_y}{\lambda \cdot b} \quad (2.13)$$

Відношення показників форми листа опісля і до прокатування не що інше, як коефіцієнт вирівнювання форми  $K_{в.ф}$ . Коефіцієнт  $K_{в.ф}$  отримаємо, поділивши праву та ліву частини рівняння (2.13) на  $\Phi_{L_0}$ .

$$K_{e,\phi} = \frac{\Phi_{L_1}}{\Phi_{L_0}} = 1 + \frac{\Delta\lambda_y}{\lambda \cdot b \cdot \Phi_{L_0}} \quad (2.14)$$

Коефіцієнт вирівнювання форми листа під час прокатки в нерегульованій кліті може мати такі значення:

$K_{e,\phi} > 1$  – пласкість листа погіршується;

$K_{e,\phi} = 1$  – пласкість листа не змінюється;

$K_{e,\phi} < 1$  – пласкість листа покращується;

Рівняння зміни форми (2.13) і величину коефіцієнта вирівнювання форми листа (2.14) використовують для оптимізації форми активної твірної поміж валкового розхилу та режимів обтискувань з метою отримання пласких листів або штаб в нерегульованих прокатних клітях. За автоматичного регулювання пласкості і форми штаб під час прокатування показники  $\Phi_L$  і  $K_{e,\phi}$  характеризують об'єкт регулювання і їх використовують як керуючі сигнали регулятора САРПФ штаби.

## 2.2 Устаткування для проведення дослідів

З метою зниження трудомісткості, економії матеріальних ресурсів і подальшого розширення діапазону досліджуваних умов реалізації в рамках даної роботи було використане встаткування лабораторного прокатного стану  $260 \times 260$  ЗДА (рис. 2.1.–2.4) головна лінія робочої кліті якого містить у собі мотор–редуктор 1 типу МЦ 2С-63 ( $n = 40 \text{ об/хв}$ ), моторну муфту 2, одноступінчастий циліндричний зубчастий редуктор 3 з передатним відношенням 4,0, проміжну муфту 4, шестеренну кліть 5, універсальні шпинделі 6 на підшипниках кочення, механізм 7 їх пружинного зрівноважування й властиво двухвалкову робочу кліть 8.

Устаткування робочої кліті даного стану, загальний вид і конструкція якої ілюстровані рис. 2.3, містить у собі нижній 1 і верхній 2 робочі валки з номінальними значеннями діаметрів і довжин бочок по 260 мм. За

допомогою дворядних сферичних підшипників 3 шийки робочих валків зафіксовано у відповідних подушках 4, 5 між якими з метою зрівноважування верхнього робочого валка 2 розміщені гумові прокладки 6. Самі робочі валки були виготовлені зі сталі 9X із твердістю утворюючих поверхонь бочок  $\approx 85 \text{ HS}$  і шорсткістю, що відповідає  $\sqrt{\text{Ra}1,25}$ .

Подушки 4 нижнього 1 і подушки 5 верхнього 2 робочих валків, у свою чергу, були розміщені в напрямних вікнах вузла станин 7 (див. рис. 2.3).

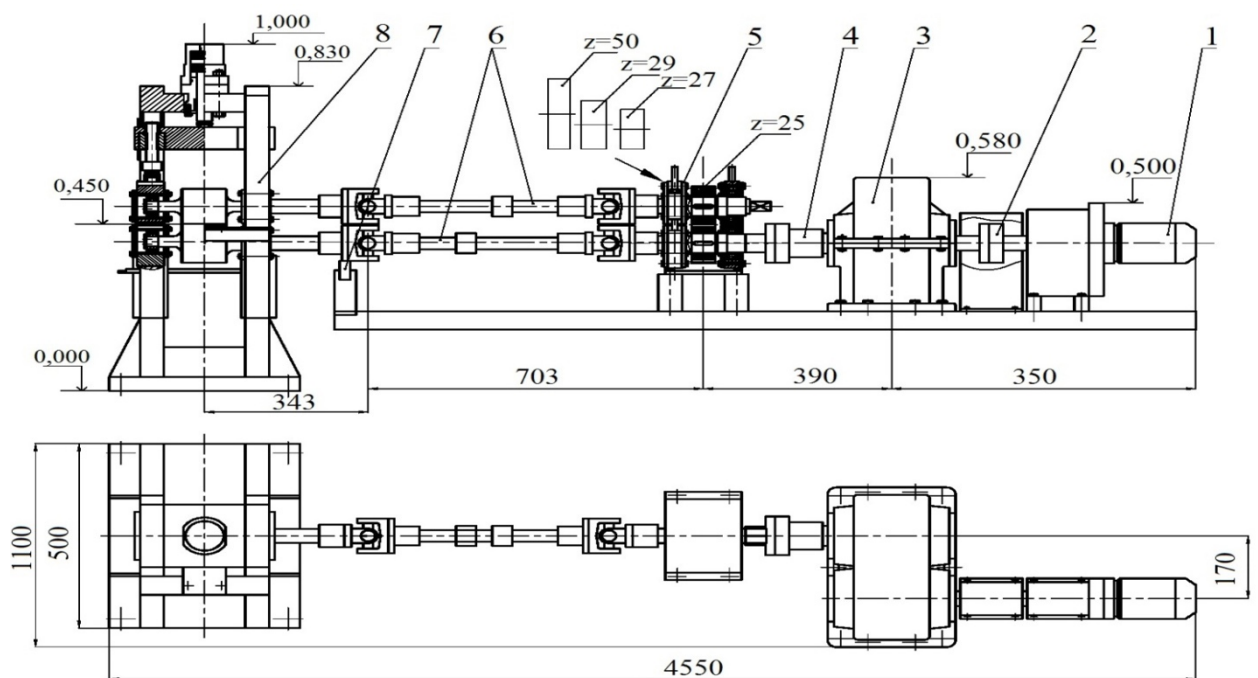


Рисунок 2.2 – Склад і план розташування устаткування головної лінії робочої кліти лабораторного прокатного міні-стану 260x260.

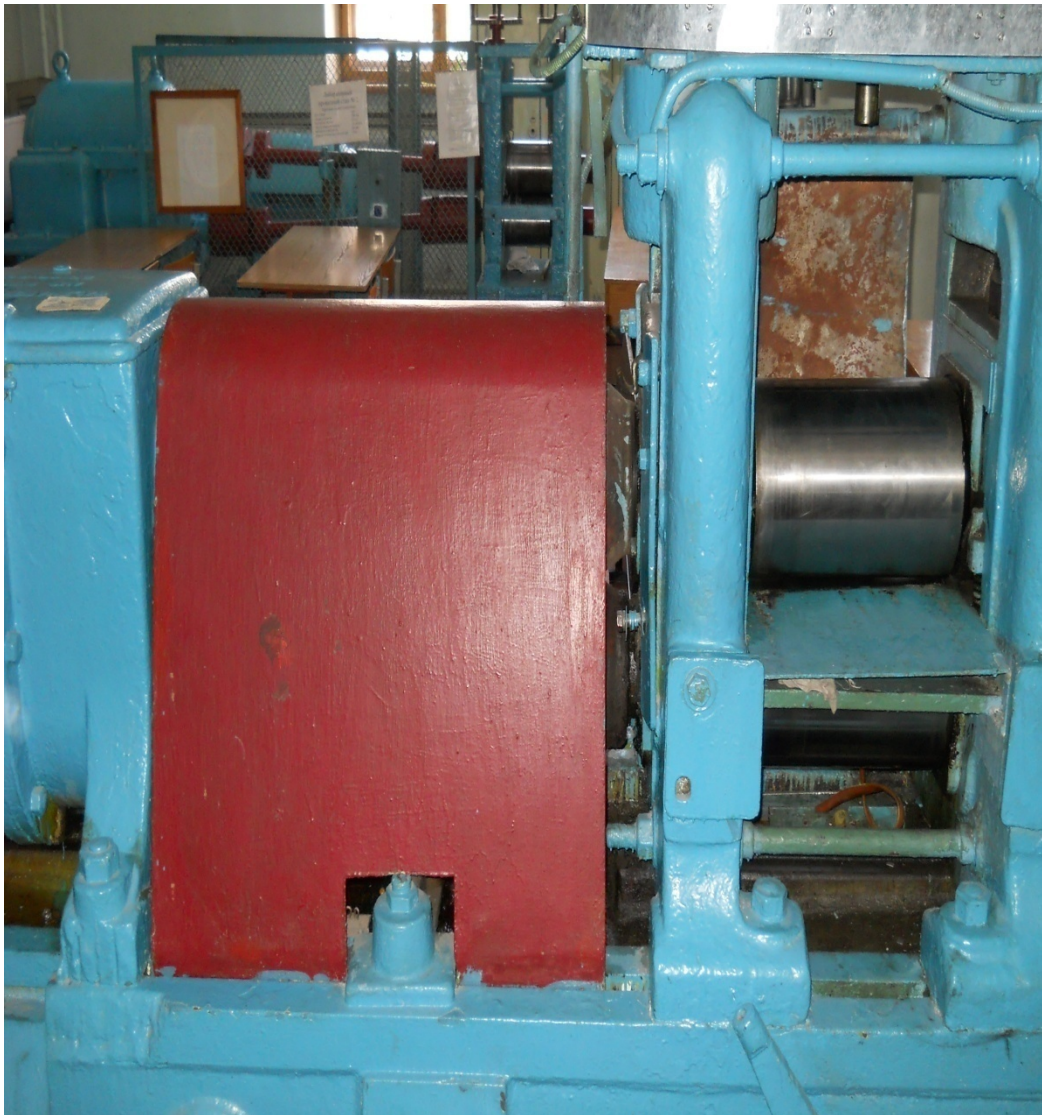


Рисунок 2.3 – Загальний вид устаткування лабораторного прокатного міні-стану 260x260.





Рисунок 2.4 – Загальний вид робочої кліти лабораторного прокатного міні-стану 260x260.



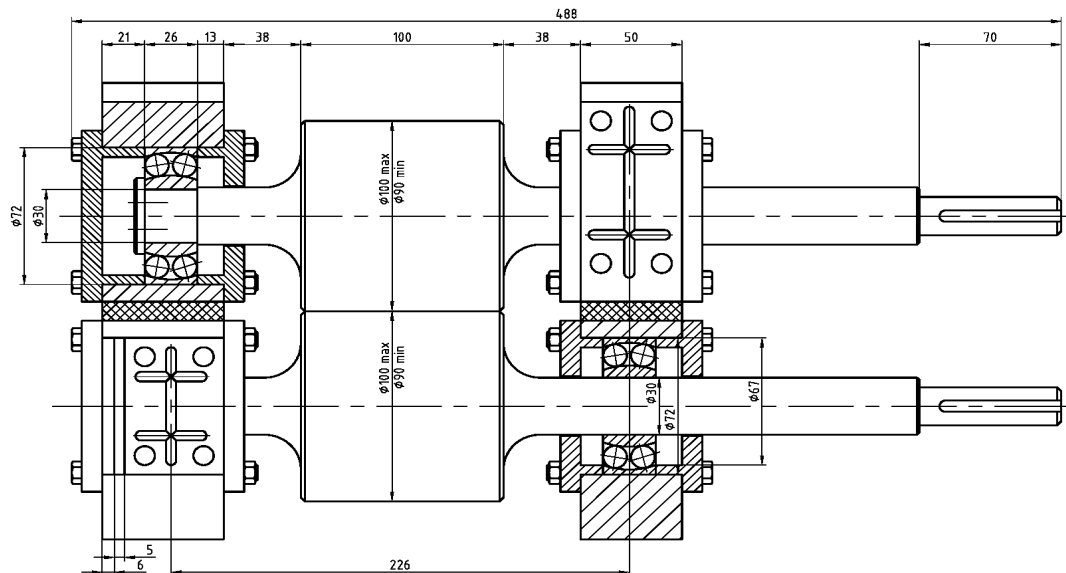


Рисунок 2.5 – Конструкція вузла робочих валків лабораторного прокатного міні-стану 260x260 .

При цьому у вертикальній площині подушки 4 нижнього робочого валка 1 були зафіксовані нижніми поперечками даного вузла, а подушки 5 верхнього робочого валка 2 через кільцеві пружні елементи месдоз 8 і сферичні тіла кочення 9 були сполучено з натискними гвинтами 10 механічної частини натискного механізму. Бронзові гайки 11 даного механізму різьбові нарізки, що мають **3,0**мм метричні, із кроком, були зафіксовані в розточеннях проміжної рухливої траверси 12, розміщеної за аналогією з подушками 4, 5 робочих валків 1, 2 у напрямних вікнах вузла станин 7. У випадку регулювання величини попереднього межвалкового зазору з використанням тільки механічної частини натискного механізму проміжну рухливу траверсу 12 фіксували у вертикальній площині за допомогою додаткових проставлень 13, що сполучаються з верхніми поперечками вузла станин 7.

Крім механічної частини конструкція натискного механізму робочої кліти лабораторного міні-стану 260×260 ЗДІА (див. рис. 2.5) містила в собі й гідравлічну частину, виконану у вигляді гідроциліндра поршневого типу, корпус якого був розміщений нерухомо в розточенні верхньої траверси вузла станин, а штоковий елемент сполучений з верхньою опорною поверхнею

проміжної рухливої траверси. При цьому, крім безпосереднього регулювання величини попереднього межвалкового зазору з досить високою швидкістю гідравлічна частина була використана для силового розвантаження додаткових проставлень 13, а також для торировки місдоз 8 шляхом додатка імітаційних сил їх стиску відомої величини. Враховуючи можливість переміщення проміжної траверси 12 у вертикальній площині при подачі робочої рідини в поршневу або в штокову порожнину гідроциліндра вона була постачена пружинним механізмом зрівноважування, а також датчиком лінійних переміщень реостатного типу (див. рис. 2.5).

За аналогією з розглянутим раніше (див. рис. 2.3–2.5) промислово–лабораторним станом вимір сили прокатки на лабораторному міні–стані 260×260 ЗДІА робили за допомогою місдоз 8, а вимір моментів прокатки на кожному з робочих валків – за допомогою тензометричних датчиків опору, наклеєних на тіла відповідних універсальних шпинделів 6 головної лінії робочої кліти (див. рис. 2.3, 2.5). Знімання електричного сигналу з обертових універсальних шпинделів робили за допомогою струнних струмознімачів ковзання.

У цілому состав і конструктивні особливості розглянутого вище встаткування з урахуванням відповідних критеріїв подоби дозволило досліджувати процес гарячої прокатки щодо товстих аркушів і штаб у горизонтальних робочих валках у всім діапазоні можливих умов його реалізації.

### **2.3 Методика вимірів зусилля прокатки**

Сила прокатки вимірюється місдозами або тензOMETрами. Безпосередньо силу прокатування можна виміряти гідравлічними мездозами, але вони мають велике запізнення (інерційність) під час виміру. Окрім того, точність виміру визначається точністю манометрів, яка в більшості випадків недостатня для систем автоматичного регулювання. На промислових станах з

метою автоматичного регулювання силу прокатування вимірюють прямим методом безперервно. За прямого методу датчик, перетворюючий силу в електричний сигнал, виконаний так, щоб уся вимірювальна система була замкнута тільки на датчик тобто, щоб датчик деформувався половиною сили прокатування тобто силою, діючою на натискні гвинти. Цією силою датчик пружно деформується. Перетворення деформації в електричний сигнал можна здійснити двома шляхами. По-перше, це методи, що ґрунтуються на вимірюванні деформації на запрограмованій довжені навантажує мого елемента. З цією метою на поверхні пружних елементів закріплюють перетворювачі.

По-друге, це методи, що ґрунтуються на змінюванні тих чи інших властивостей навантажує мого елемента: наприклад, до них відносяться магнітопружні та магнітоанізотропні перетворювачі, а також тензорезистори у випадку безпосередньої дії на них сили. Усі різновиди таких перетворювачів найчастіше розташовують поміж подушками верхнього валка і натискними гвинтами.

Відповідно до закону Гука пружна деформація елемента пропорційна діючій на нього силі. Очевидно, що за величиною деформації можливо визначити силу. Використовуючи цю залежність непрямым методом визначають силу прокатування за допомогою тензометрів, які розміщують на нейтральній лінії стояка станини кліті. Під час прокатування стояк по нейтральній смузі тільки розтягується, збільшує базову відстань  $l$  на величину пружної деформації  $\Delta l$ . Відповідно до закону Гука сила розтягування буде визначатися рівнянням:

$$P_c = \frac{P_y}{2} = \frac{\Delta l / l}{EF} \quad (2.15)$$

де  $P_c$  - сила, діюча на натискний гвинт;

$F$  - площа перерізу стояка;

$E$  - модуль пружності матеріалу станини (для чавуна  $E = (1.2 - 1.6) \times 10^5$  МПа; для литої вуглецевої сталі  $E = 2.0 \times 10^5$  МПа; для кованої або штампованої легваної сталі  $E = 2.0 \times 10^5$  МПа.

Знаючи, що  $p_y = \frac{P}{2}$ , сила прокатування  $P$  буде дорівнювати:

$$P = 4EF \frac{\Delta l}{l} \quad (2.16)$$

Теоретична сила прокатки за відомого середнього контактного тиску в осередку деформації обчислюється за формулою:

$$P = P_{cp} F_k \quad (2.17)$$

де  $F_k$ - площа контакту металу з валками. Для умов тонколистового прокати  $P_{cp}$  визначається за формулою В. О. Ніколаєва:

$$P_{cp} = 1.15 \sigma_{Tcp} \left[ 1 + 0.48 f_n \frac{l}{h_{cp}} \right] \quad (2.18)$$

де  $\sigma_{Tcp}$  - середня границя плинності металу в осередку деформації

$f_n$  - показник тертя, який дорівнює:

$$f_n = 1.6f - 0.018 \quad (2.19)$$

$f$  – коефіцієнт тертя який для умов прокати зразків із алюмінію з мастилом можна прийняти рівним 0.08.

За цієї умови  $f_n = 0.11$  і формули (4) буде мати вигляд:

$$P_{\text{ср}} = 1.15\sigma_{\text{Тср}} \left[ 1 + 0.05 \frac{l}{h_{\text{ср}}} \right] \quad (2.20)$$

Із формул (2.17), (2.18), (2.19) і (2.20) очевидно, що контактний тиск і сила прокатки залежать від границі плинності, умов тертя і параметру  $\frac{l}{h_{\text{ср}}}$ , при збільшенні яких, сила прокатки зростає. Взагалі усі фактори прокатки, збільшуючи опір повздовжньому і поперечному плину метала в осередку деформації, призводять до зростання сили прокатування.

Середню границю плинності  $\sigma_{\text{Тср}}$ , визначають за формулою:

$$\sigma_{\text{Тср}} = (\sigma_{\text{Т0}} + \sigma_{\text{Т1}})/2 \quad (2.21)$$

де  $\sigma_{\text{Т0}}$  – границя плинності метала до проходу;

$\sigma_{\text{Т1}}$  - границя плинності метала після проходу.

Для алюмінію марки А1  $\sigma_{\text{Т0}} = 58 \text{ Н/мм}^2$ . За формулою О. В. Третьякова після прокатки

$$\sigma_{\text{Т1}} = \sigma_{\text{Т0}} + 0.64\varepsilon_{\Sigma}^{0.62} \quad (2.22)$$

$\varepsilon_{\Sigma}$  – підсумковий відносний обтиск.

Середній тиск по експерименту із (2.17):

$$P_{\text{ср}} = P/F_k$$

Робота виконується на двовалковому стані з діаметром валків  $D = 260$  мм. Складають і випробують схеми виміру сили прокатки прямим та непрямим методами. До прокатки вимірюють розміри перерізу трьох листових зразків із алюмінію однакової ширини. Під час прокатки вимірюють силу шляхом запису осцилограм та пружну деформацію А1 за

допомогою тензора. Після прокатки вимірюють розміри зразків. Розшифровку осцилограм виконують, користуючись градуювальники лініями місдоз. Дані замірів, розмірів і розшифровок заносять до таблиці. Далі, розрахувавши необхідні параметри прокатки  $\Delta h$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_{\Sigma}$ ,  $l/h_{cp}$ ,  $\sigma_{T1}$  визначають  $P_{cp}$  по (2.20) і по  $P$  (2.21).

## 3 ОБРОБКА І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Математичне планування експерименту

**Дослід № 1.** За допомогою методу повного факторного експерименту дослідити вплив на різновтовщинність полоси при прокатці наступних факторів (матеріал - сталь 08ю):

$X_1$ -ступінь деформації, %;

$X_2$ -зусилля прокатки, кН;

$X_3$ - абсолютний обтиск, мм;

Таблиця 3.1 – Досліджувані фактори

Характеристика	Фактори		
	Ступінь деформації ( $\varepsilon, \%$ )	Зусилля прокатки (P, кН)	Абсолютний обтиск $\Delta h$ , мм)
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основний рівень	50	17	1,2
Інтервал варіації	12	3	0,2
Верхній рівень (закодоване значення +1)	62	20	1,4
Нижній рівень (закодоване значення -1)	38	14	1,0

#### *Складання плану експерименту*

При складанні плану повного факторного експерименту треба стежити, щоб не було повторів.

Таблиця 3.2 – Матриця повного факторного експерименту  $2^3$ 

План	Номер досліду	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$2^2$	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	-1
	3	1	1	-1	1
	4	1	1	-1	-1
$2^3$	5	1	-1	1	1
	6	1	-1	1	-1
	7	1	-1	-1	1
	8	1	-1	-1	-1

Фактор, що по значеній « $x_0$ » - так називаємо фіктивну зміну – уводимо для розрахунку вільного члена шуканої моделі – коефіцієнта – « $b_0$ ». Після складання таблиці перевіряємо правильність її заповнення. Умова симетричності репліки вимагає, щоб у кожному стовпці знаходилося рівне число мінусів та плюсів. Умова виконується.

*Реалізація плану експерименту.* Для визначення помилки експерименту досліди слід дублювати. Частіше дублюють не всі досліди, а тільки досліди на основному рівні. В цьому випадку розрахунок дисперсії досліду  $S_y$  проводимо по формулі:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{0i} - Y_0)^2}{f_1},$$

де  $n$  – кількість дублів на основному рівні;

$i$  – номер дубля

$Y_{0i}$  – значення параметра оптимізації в  $i$ -ом дублі;

$Y_0$  – середнє арифметичне результатів всіх дублів;

$f_1$  – число мір свободи ( $f_1 = n-1$ )



Для визначення дисперсії досліду було організовано досліди 9 -11 на основному рівні. При цьому набуто наступні значення параметра оптимізації:

Визначаємо  $S_y^2$ . Складаємо таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахункова таблиця дисперсії досліду

Дослід	$Y_{0i}$	$ Y_{0i}-Y_0 $	$\Delta Y_{0i}^2$
9	0,02	0,0083	$7 \cdot 10^{-5}$
10	0,025	0,0033	$1 \cdot 10^{-5}$
11	0,03	-0,012	0,0001
	$Y_0 = 0,0283$		$\Sigma = 0,0002$

Тоді

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{0i} - Y_0)^2}{f_1} = \frac{0.0002}{3-1} = 0.0001$$

*Побудова математичної моделі.* Після реалізації всіх дослідів матриці планування по їх результатах будують математичну модель процесу, що вивчається. Для цього при використанні повного факторного експерименту розраховуємо коефіцієнти регресії рівняння по формулі:

$$b_j = \sum_{n=1}^N \frac{x_{jn} \cdot Y_n}{N},$$

де  $b_j$  – значення  $j$ -го коефіцієнта регресії;

$x_{jn}$  – значення  $j$ -го чинника в  $n$ -ом досліді в кодованому вигляді;

$Y_n$  – значення параметра оптимізації в  $n$ -ом досліді;

$N$  – число дослідів в матриці планування.

В результаті одержують модель, яка має наступний вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

У матриці планування, що реалізовується, отримані наступні результати.

Таблиця 3.4 – Результати дослідів, мм

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат	0,17	0,099	0,095	0,052	0,096	0,074	0,028	0,019

По формулі розраховуємо коефіцієнти регресії шуканих моделей.

$$b_0 = \frac{1}{8}[0.17 + 0.099 + 0.095 + 0.052 + 0.096 + 0.074 + 0.028 + 0.019] = 0.079125$$

$$b_1 = \frac{1}{8}[0.17 + 0.099 + 0.095 + 0.052 - 0.096 - 0.074 - 0.028 - 0.019] = 0.024875$$

$$b_2 = \frac{1}{8}[0.17 + 0.099 - 0.095 - 0.052 + 0.096 + 0.074 - 0.028 - 0.019] = 0.030625$$

$$b_3 = \frac{1}{8}[0.17 - 0.099 + 0.095 - 0.052 + 0.096 - 0.074 + 0.028 - 0.019] = 0.018125$$

Таким чином, одержана лінійна модель має задалегідь наступний вигляд:

$$Y = 0.079125 + 0.024875 \cdot x_1 + 0.030625 \cdot x_2 + 0.018125 \cdot x_3$$

*Статистичний аналіз моделі.* Метою аналізу є перевірка придатності моделі для її використання при описі досліджування пористості інтерметалідів.

Аналіз складається з двох етапів. На першому етапі перевіряємо статистичну значущість коефіцієнтів регресії. У статистиці прийнято здійснювати перевірку значущості коефіцієнтів регресії за допомогою

критерію Стюдента. Для цього розрахуємо довірчий інтервал коефіцієнтів:

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f_1} \cdot S_{bi}$$

де  $S_{bi}$  – середньоквадратична помилка у визначенні коефіцієнтів регресії;

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}};$$

$t_{\alpha, f_1}$  – значення критерію Стюдента, яке вибирається залежно від рівня значущості  $\alpha$  і числа мір свободи при визначенні дисперсії дослідження  $f_1$ .

Значення коефіцієнтів регресії порівнюємо з довірчим інтервалом, і ті що виявляються по абсолютній величині менше довірчого інтервалу, виключаємо з рівняння.

На другому етапі остаточно одержане рівняння перевіряємо на адекватність, тобто його придатність для опису сили прокатування.

Розраховуємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії  $\Delta b_i$ . Для цього спочатку визначимо  $S_{bi}$ .

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{0.0001}{8}} = 0.0035$$

Вибираємо для  $\alpha = 0,05$  і  $f_1 = 2$  значення критерію Стюдента, яке рівне 4,3027. Визначаємо довірчий інтервал для нашого рівняння:

$$\Delta b_i = 4.3027 \cdot 0.0035 = 0.0152;$$

Таким чином всі коефіцієнти виявилися статистично значущими, і рівняння набуває остаточно наступного вигляду:

$$Y = 0.079125 + 0.024875 \cdot x_1 + 0.030625 \cdot x_2 + 0.018125 \cdot x_3$$

Тепер перевіряємо адекватність одержаних моделей в цілому. Для цього підставляємо в одержане рівняння послідовно для всіх дослідів значення « $x_i$ » в кодованому вигляді. Для визначення дисперсності неадекватності складаємо розрахункову таблицю 5. Таблиця 5 складається виходячи з алгоритму перевірки одержаного рівняння на адекватність, тобто його придатність для опису об'єкту дослідження. Послідовність перевірки така:

1. По одержаній моделі визначаються по черзі для всіх дослідів матриці планування розрахункові значення параметра оптимізації ( $Y_{\text{розр}}$ ). Для цього в рівняння підставляємо значення чинників в кодованому вигляді.

Таблиця 3.5 – Розрахунок дисперсії неадекватності

Y		$\Delta Y$	$\Delta Y^2$
Експеримент	Розрахунок		
0,17	0,15275	0,01725	0,000298
0,099	0,1165	-0,0175	0,000306
0,095	0,0915	0,0035	0,0000123
0,052	0,05525	-0,00325	0,0000106
0,096	0,103	-0,007	0,000049
0,074	0,06675	0,00725	0,0000526
0,028	0,04175	-0,01375	0,000189
0,019	0,0055	0,0135	0,000182
			$\sum 0,0011$

2. По формулі одержуємо оцінку дисперсії неадекватності:

$$S_{\text{неод}}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (Y_n^{\text{експ}} - Y_n^{\text{розн}})^2}{f_2} = \frac{0.0011}{8-4} = 0.000275;$$

де  $f_2 = N - K$ ;  $K$  – число коефіцієнтів моделі, включаючи  $b_0$ .

3. Визначають розрахункове значення критерію Фішера, порівнюють з табличним.

$$F_{f_1, f_2}^{\text{розн}} = \frac{S_{\text{неод}}^2}{S_y^2} = \frac{0.000275}{0.0001} = 2.75;$$

Модель адекватна, оскільки  $F^{\text{табл.}} = 19,25$ .

Отримане рівняння регресії графічно інтерпретуємо у вигляді поверхонь відгуку .

Для цього необхідно перевести наше рівняння від кодованого значення до натурального.

$$X_i = \frac{X_j - X_i^0}{\Delta X_i},$$

де  $X_i$  – кодоване значення фактора;

$X_j$  – натуральне значення фактора;

$X_i^0$  – показник фактору на основному рівні;

$\Delta X_i$  – інтервал варіювання фактора.

$$\begin{aligned} y &= 0,079125 + 0,024875 \left( \frac{X_1 - 50}{12} \right) + 0,030625 \left( \frac{X_2 - 17}{3} \right) + 0,018125 \left( \frac{X_3 - 12}{0,2} \right) = \\ &= 0,30681 + 0,002073 x_1 + 0,010208 x_2 + 0,090625 x_3. \end{aligned}$$

Отже рівняння у натуральному виді матиме вигляд:

$$y = 0,30681 + 0,002073 x_1 + 0,010208 x_2 + 0,090625 x_3.$$

### Інтерпретація результатів

Отримана адекватна модель дозволяє розрахувати значення параметра оптимізації для будь якої крапки вивченого факторного простору.

Крім того, отриману залежність можна представити графічно у вигляді впливу окремих факторів на параметр оптимізації. При цьому звичайно будують залежність за умови, що всі інші фактори фіксують на постійному рівні. Тоді підставляємо в дане рівняння значення фактора  $X_2$  і  $X_3$  у кодованому виді (зі знаком «-»). Потім у перетворене (спрошене) рівняння підставляємо послідовно значення фактора  $X_1$  на нижньому, основному й верхньому рівнях, тобто -1; 0; +1 і одержуємо графік.

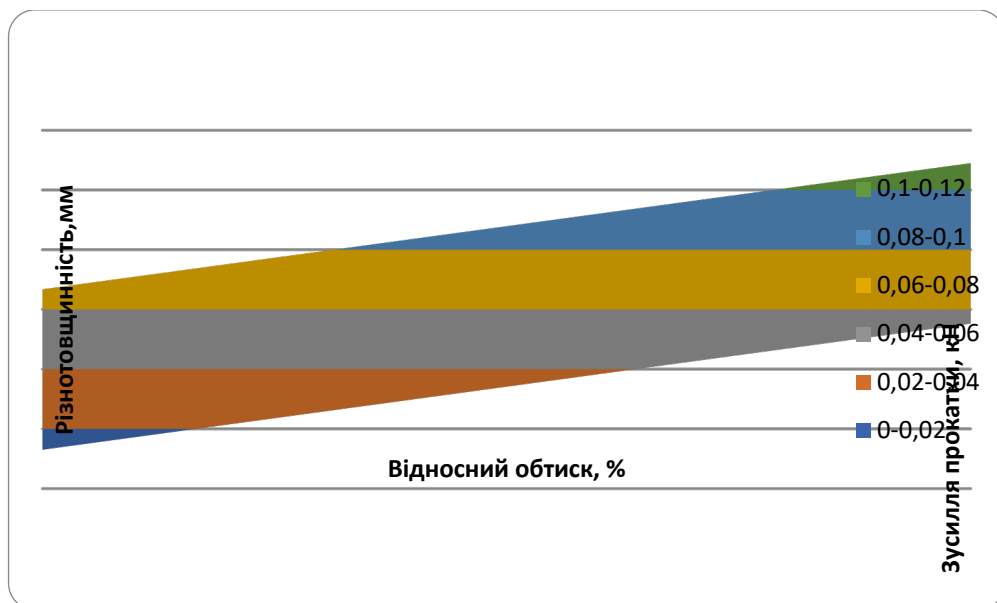


Рисунок 3.1 – Залежність різнотовщинності штаби від ступеня деформації і зусилля прокатки (сталь 08Ю)

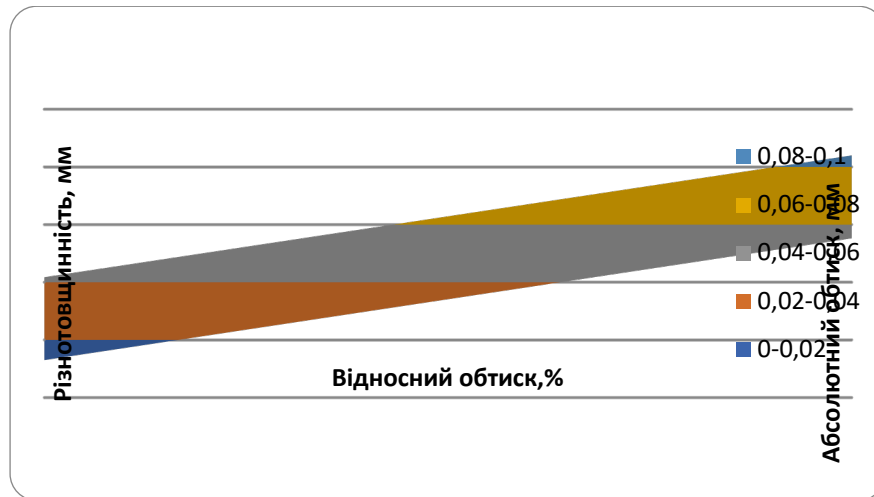


Рисунок 3.2 – Залежність різнововщинності штаби від абсолютного обтиску і ступені деформації (сталь 08Ю)

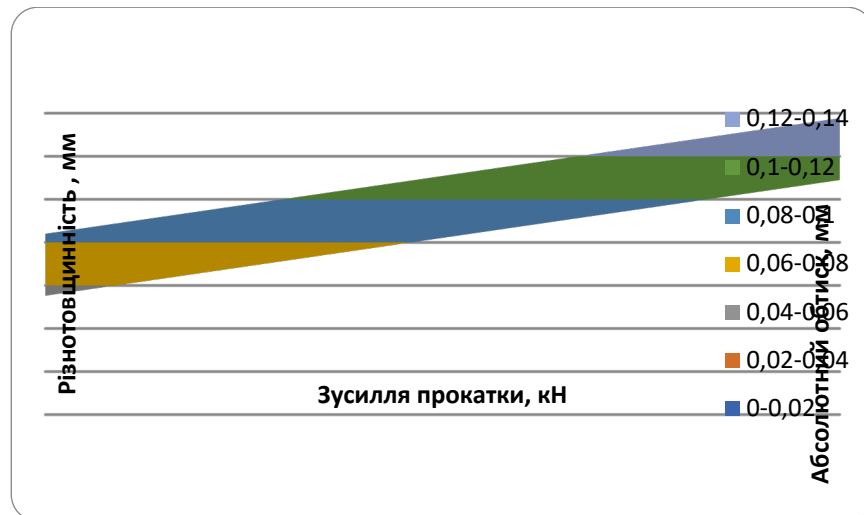


Рисунок 3.3 – Залежність різнововщинності штаби від зусилля прокатки і абсолютного обтиску (сталь 10)

**Дослід № 2.** За допомогою методу повного факторного експерименту встановити вплив на різнововщинність полоси наступних факторів (матеріал – сталь 08Ю):

$X_1$ - ступінь деформації, %;

$X_2$ - зусилля прокатки, кН;

$X_3$ - відносний обтиск, мм;

Таблиця 3.6 – Досліджувані фактори

рівень	X <sub>1</sub> (ε,%)	X <sub>2</sub> (P,кН)	X <sub>3</sub> (Δh,мм)
Основний	45	15	1,4
Верхній (кодоване значення +1)	60	20	2,2
Нижній (кодоване значення -1)	30	10	0,6
Інтервал варіацій	15	5	0,8

Таблиця 3.7 – Результати дослідів, мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8
результат	0,15	0,1	0,097	0,056	0,098	0,072	0,02	0,018

Одержуємо лінійну модель наступного вигляду:

$$y=0,079875 + 0,027875 x_1 + 0,032125 x_2 + 0,018875 x_3$$

Визначимо дисперсність дослідів  $f_1$ :

$$f_1 = n - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$S^2_{y=} = \frac{\sum \Delta y^2}{f_1} = \frac{0,0002}{2} = 0,0001.$$

Визначимо коефіцієнт Стьюдента:



$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{S_y}{N}} = \sqrt{\frac{0,0001}{8}} = 0,0036$$

Розраховуємо довірний інтервал коефіцієнтів:

$$\Delta b = t * S_k = 4.3 * 0,0036 = 0,01548$$

Значення коефіцієнтів регресії порівнюємо з тими, які виявляються по абсолютному значенню менші за інтервал довіри і виключаємо їх з рівняння.

Рівняння набуде вигляду:

$$y = 0,079875 + 0,027875 x_1 + 0,032125 x_2 + 0,018875 x_3$$

Адекватність моделі перевіряємо по критерію Фішера.

$$F_{\text{розр. f1f2}} = \frac{S_{\text{несад}}^2}{S_y^2} = \frac{0,000425}{0,0001} = 4,25.$$

$F_{\text{табл.}} = 18,513$ , отже модель є адекватною, оскільки:  $F_{\text{табл.}} < F_{\text{розр.}}$ .

Отже рівняння у натуральному виді матиме вигляд:

$$y = 0,14417 + 0,001858 x_1 + 0,006425 x_2 + 0,031458 x_3.$$

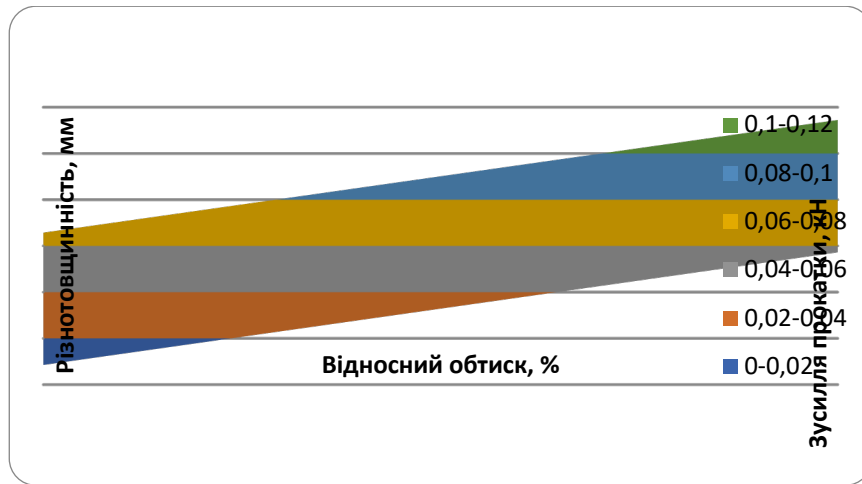


Рисунок 3.4 – Залежність різновшчинності штаби від ступеня деформації і зусилля прокатки (08кп)

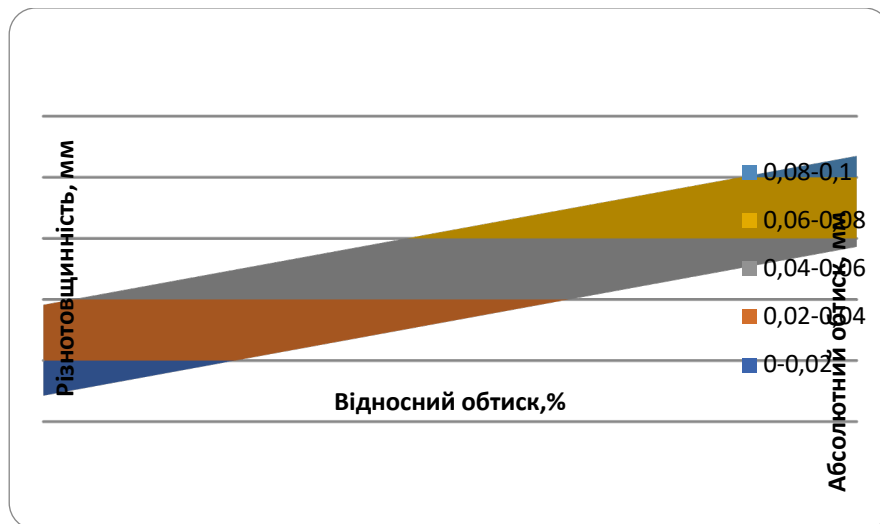


Рисунок 3.5 – Залежність різновшчинності штаби від ступені деформації і абсолютного обтиску (08 кп)

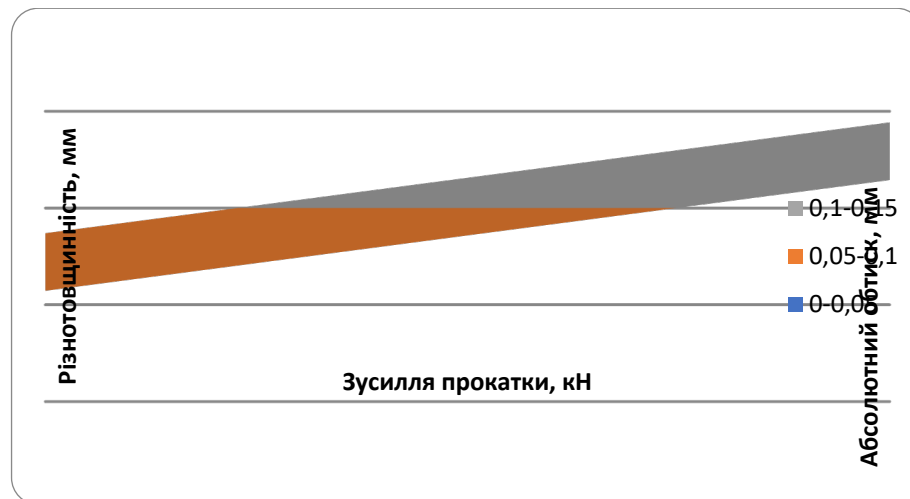


Рисунок 3.6 – Залежність різновтовщинності штаби від зусилля прокатки і абсолютного обтиску (08 кп)

**Дослід № 3.** За допомогою методу повного факторного експерименту встановити вплив на різновтовщинність полоси при прокатці наступних факторів( матеріал – сталь 08пс):

X<sub>1</sub>- ступінь деформації, %;

X<sub>2</sub>- зусилля прокатки, кН;

X<sub>3</sub>- абсолютний обтиск, мм;

Таблиця 3.8 – Досліджувані фактори

Рівень	X <sub>1</sub> (ε, %)	X <sub>2</sub> (P,кН)	X <sub>3</sub> (Δh, мм)
Основний	40	12	1,6
Верхній (кодоване значення +1)	60	18	2,4
Нижній (кодоване значення -1)	20	6	0,8
Інтервал варіацій	20	6	0,8

Таблиця 3.9 – Результати дослідів , мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8
результат	0,1	0,03	0,098	0,055	0,095	0,075	0,025	0,015

Одержуємо лінійну модель наступного вигляду:

$$y=0,071625 + 0,019125 x_1 + 0,023375 x_2 + 0,027875 x_3$$

Визначимо дисперсність дослідів  $f_1$ :

$$f_1 = n - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$S^2_y = \frac{\sum \Delta y^2}{f_1} = \frac{0,0002}{2} = 0,0001$$

Визначимо коефіцієнт Стьюдента:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y}{N}} = \sqrt{\frac{0,0001}{8}} = 0,0036$$

Розраховуємо довірний інтервал коефіцієнтів:

$$\Delta b = t * S_k = 4.3 * 0,0036 = 0,015$$

Значення коефіцієнтів регресії порівнюємо з тими, які виявляються по абсолютному значенню менші за інтервал довіри і виключаємо їх з рівняння.

Рівняння набуде вигляду:

$$y=0,071625 + 0,019125 x_1 + 0,023375 x_2 + 0,027875 x_3$$

Адекватність моделі перевіряємо по критерію Фішера.

$$F_{\text{розр.}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2} = \frac{0,001719}{0,0001} = 17,19.$$

$F_{\text{табл.}} = 19,24$  , отже модель є адекватною, оскільки:  $F_{\text{табл.}} < F_{\text{розр.}}$ .

Отже рівняння у натуральному виді матиме вигляд:

$$y = 0,06913 + 0,000956 x_1 + 0,003896 x_2 + 0,034844 x_3.$$

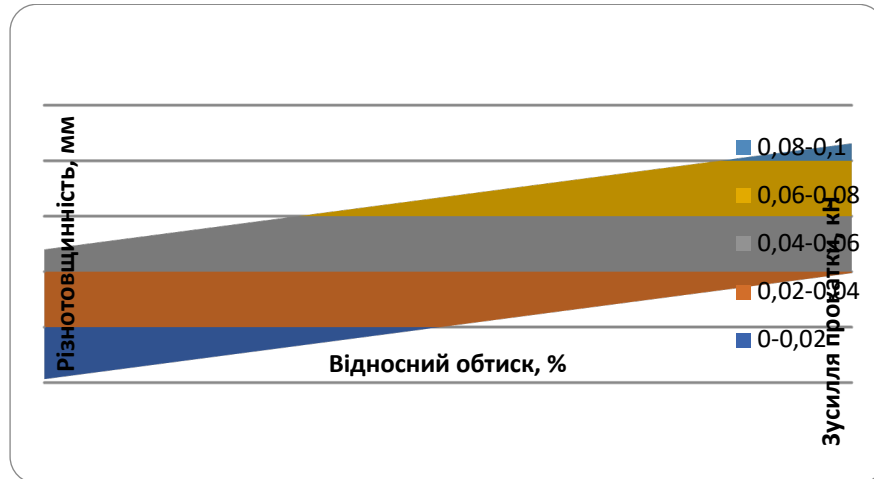


Рисунок 3.7 – Залежність різнововщинності штаби від ступені деформації і зусилля прокатки (08пс)

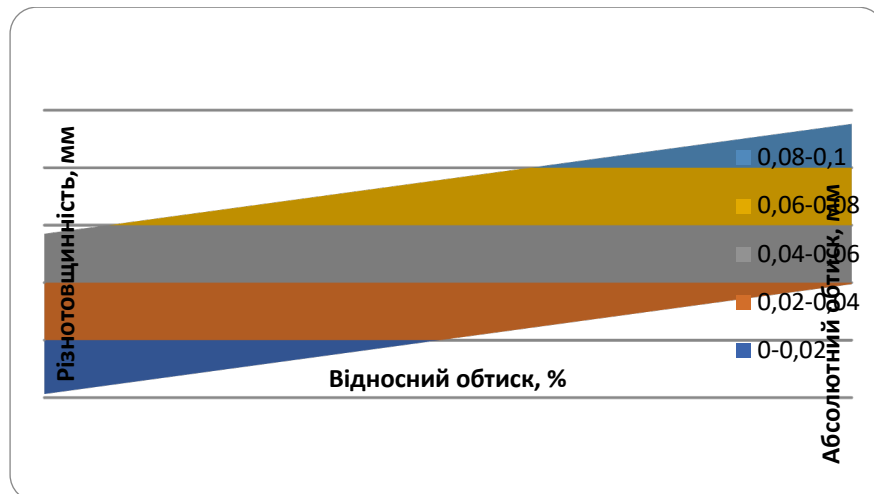


Рисунок 3.8 – Залежність різнововщинності штаби від ступені деформації і абсолютного обтиску (08пс)

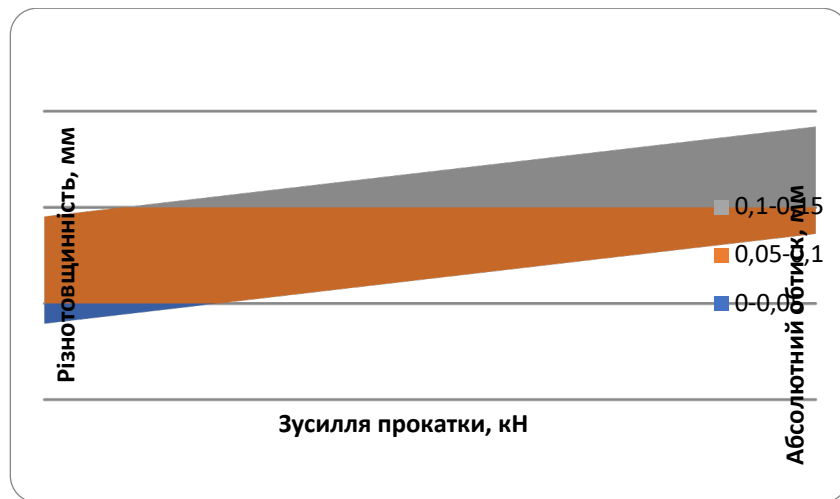


Рисунок 3.9 – Залежність різновтовщинності полоси від зусилля прокатки і абсолютного обтиску (08пс)

### 3.2 Експериментальні дослідження площинності штаби

У результаті проведення активного експерименту були отримані наступні результати (див. табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Результати проведеного експерименту

№ п. п.	Товщина до прокатки, мм	Товщина після прокатки		
		л	с	п
1	0,91	0,74	0,73	0,73
2		0,66	0,68	0,70
3		0,59	0,63	0,62
4		0,56	0,57	0,58
5		0,59	0,62	0,64
6		0,73	0,75	0,76
7		0,88	0,83	0,77
8		0,87	0,88	0,90
9		0,60	0,62	0,62

Виконаємо розрахунок витяжок по ширині штаби по формулі  $\mu = \frac{h_0}{h_1}$

для лівої, правої та середини штаби і запишемо отримані значення у табл. 3.10.

– ліва сторона:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{0,91}{0,74} = 1,23; & \mu_2 &= \frac{0,91}{0,66} = 1,38; & \mu_3 &= \frac{0,91}{0,59} = 1,54; & \mu_4 &= \frac{0,91}{0,56} = 1,625; \\ \mu_5 &= \frac{0,91}{0,59} = 1,54; & \mu_6 &= \frac{0,91}{0,73} = 1,25; & \mu_7 &= \frac{0,91}{0,88} = 1,03; & \mu_8 &= \frac{0,91}{0,87} = 1,05; \\ \mu_9 &= \frac{0,91}{0,60} = 1,52; \end{aligned}$$

– права сторона:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{0,91}{0,73} = 1,25; & \mu_2 &= \frac{0,91}{0,70} = 1,30; & \mu_3 &= \frac{0,91}{0,62} = 1,47; & \mu_4 &= \frac{0,91}{0,58} = 1,57; \\ \mu_5 &= \frac{0,91}{0,64} = 1,42; & \mu_6 &= \frac{0,91}{0,76} = 1,20; & \mu_7 &= \frac{0,91}{0,77} = 1,18; & \mu_8 &= \frac{0,91}{0,90} = 1,01; \\ \mu_9 &= \frac{0,91}{0,62} = 1,47; \end{aligned}$$

– середина штаби:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{0,91}{0,73} = 1,25; & \mu_2 &= \frac{0,91}{0,68} = 1,34; & \mu_3 &= \frac{0,91}{0,63} = 1,44; & \mu_4 &= \frac{0,91}{0,57} = 1,60; \\ \mu_5 &= \frac{0,91}{0,62} = 1,47; & \mu_6 &= \frac{0,91}{0,75} = 1,21; & \mu_7 &= \frac{0,91}{0,83} = 1,10; & \mu_8 &= \frac{0,91}{0,88} = 1,03; \\ \mu_9 &= \frac{0,91}{0,62} = 1,47; \end{aligned}$$

По формулі (2.7) визначимо узагальнену витяжку:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1,23 + 1,25 + 1,25}{3} = 1,24; & \lambda_5 &= \frac{1,54 + 1,47 + 1,42}{3} = 1,48; \\ \lambda_2 &= \frac{1,38 + 1,34 + 1,30}{3} = 1,34; & \lambda_6 &= \frac{1,25 + 1,21 + 1,20}{3} = 1,22; \\ \lambda_3 &= \frac{1,54 + 1,44 + 1,47}{3} = 1,48; & \lambda_7 &= \frac{1,03 + 1,10 + 1,18}{3} = 1,103; \end{aligned}$$

$$\lambda_4 = \frac{1,625 + 1,60 + 1,57}{3} = 1,598; \quad \lambda_8 = \frac{1,05 + 1,03 + 1,01}{3} = 1,03;$$

$$\lambda_9 = \frac{1,52 + 1,47 + 1,47}{3} = 1,49;$$

Таблиця 3.11 – Розрахунок витяжок по ширині штаби

№ п.п.	μ			μ <sub>ср</sub>
	л	с	п	
1	1,23	1,25	1,25	1,24
2	1,38	1,34	1,3	1,34
3	1,54	1,44	1,47	1,48
4	1,625	1,60	1,57	1,598
5	1,54	1,47	1,42	1,48
6	1,25	1,21	1,20	1,22
7	1,03	1,10	1,18	1,103
8	1,05	1,03	1,01	1,03
9	1,52	1,47	1,47	1,49

На підставі отриманих даних визначимо довжину зразків після прокатки через відношення  $\mu = \frac{l_1}{l_0} \rightarrow l_1 = \mu \cdot l_0$ ;

Для цього спочатку визначимо  $l_{\hat{E}0}$  й  $l_{\hat{N}0}$  по формулі (2.3):

$$l_{\hat{E}0} = 200 \text{ мм}; \quad l_{\hat{N}0} = 200 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot 1,5}{35}\right)^2} = 201,5 \text{ мм};$$

Зробимо обчислення довжини після прокатки і запишемо в таблицю отримані результати.

– ліва сторона:



$$\begin{aligned}
 l_1 &= 1,23 \cdot 200 = 246 \text{ мм}; & l_2 &= 1,38 \cdot 200 = 276 \text{ мм}; & l_3 &= 1,54 \cdot 200 = 308 \text{ мм}; \\
 l_4 &= 1,625 \cdot 200 = 325 \text{ мм}; & l_5 &= 1,54 \cdot 200 = 308 \text{ мм}; & l_6 &= 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ мм}; \\
 l_7 &= 1,03 \cdot 200 = 206 \text{ мм}; & l_8 &= 1,05 \cdot 200 = 210 \text{ мм}; & l_9 &= 1,52 \cdot 200 = 304 \text{ мм};
 \end{aligned}$$

– права сторона:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ мм}; & l_2 &= 1,30 \cdot 200 = 260 \text{ мм}; & l_3 &= 1,47 \cdot 200 = 294 \text{ мм}; \\
 l_4 &= 1,57 \cdot 200 = 314 \text{ мм}; & l_5 &= 1,42 \cdot 200 = 284 \text{ мм}; & l_6 &= 1,20 \cdot 200 = 240 \text{ мм}; \\
 l_7 &= 1,18 \cdot 200 = 236 \text{ мм}; & l_8 &= 1,01 \cdot 200 = 202 \text{ мм}; & l_9 &= 1,47 \cdot 200 = 294 \text{ мм};
 \end{aligned}$$

– середина штаби:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ мм}; & l_2 &= 1,34 \cdot 200 = 268 \text{ мм}; & l_3 &= 1,44 \cdot 200 = 288 \text{ мм}; \\
 l_4 &= 1,60 \cdot 200 = 320 \text{ мм}; & l_5 &= 1,47 \cdot 200 = 294 \text{ мм}; & l_6 &= 1,21 \cdot 200 = 242 \text{ мм}; \\
 l_7 &= 1,10 \cdot 200 = 220 \text{ мм}; & l_8 &= 1,03 \cdot 200 = 206 \text{ мм}; & l_9 &= 1,47 \cdot 200 = 294 \text{ мм};
 \end{aligned}$$

Таблиця 3.12 – Розрахунок довжини після прокатки

№ п/п	$l_{\hat{E}0}$ мм	$l_{\hat{N}0}$ мм	$l_{лl}$ мм	$l_{cl}$ мм	$l_{nl}$ мм
1	200	201,5	246	250	250
2			276	268	260
3			308	288	294
4			325	320	314
5			308	294	284
6			250	242	240
7			206	220	236
8			210	206	202
9			304	294	294

По формулі (2.8) одержимо нерівномірність розподілу витяжок по ширині штаби:

$$\begin{aligned} \Delta\mu_1 &= 1,25 - 1,23 = 0,02; & \Delta\mu_2 &= 1,34 - 1,38 = -0,04; & \Delta\mu_3 &= 1,44 - 1,54 = -0,10; \\ \Delta\mu_4 &= 1,60 - 1,625 = -0,025; & \Delta\mu_5 &= 1,47 - 1,54 = -0,07; & \Delta\mu_6 &= 1,21 - 1,20 = 0,01; \\ \Delta\mu_7 &= 1,10 - 1,03 = 0,07; & \Delta\mu_8 &= 1,03 - 1,05 = -0,02; & \Delta\mu_9 &= 1,47 - 1,52 = -0,05; \end{aligned}$$

Виконаємо по викладеній раніше методикі розрахунок показників форми штаби до і після прокатки.

Відповідно до (2.5) показник форми до прокатування:

$$\Phi_{Л0} = \frac{201,5 - 200}{100 \cdot 200,75} = 0,000075;$$

Відповідно до (2.6) показник форми після прокатування:

$$\begin{aligned} \hat{O}_{\dot{E}1} &= \frac{250 - 246}{100 \cdot 248} = 0,00016; & \hat{O}_{\dot{E}2} &= \frac{268 - 276}{100 \cdot 272} = -0,00029; \\ \hat{O}_{\dot{E}3} &= \frac{288 - 308}{100 \cdot 298} = -0,00067; & \hat{O}_{\dot{E}4} &= \frac{320 - 325}{100 \cdot 322,5} = -0,00016; \\ \hat{O}_{\dot{E}5} &= \frac{294 - 308}{100 \cdot 301} = -0,00047; & \Phi_{Л6} &= \frac{242 - 240}{100 \cdot 241} = 0,000083; \\ \hat{O}_{\dot{E}7} &= \frac{220 - 206}{100 \cdot 213} = 0,00066; & \hat{O}_{\dot{E}8} &= \frac{206 - 210}{100 \cdot 208} = -0,00019; \\ \hat{O}_{\dot{E}4} &= \frac{294 - 304}{100 \cdot 299} = -0,00033; \end{aligned}$$

За виразом (2.13) також визначимо змінення форми штаби за прохід:

$$\begin{aligned} \Phi_{Л1} &= 0,000075 + \frac{0,02}{1,25 \cdot 100} = 0,000235; \\ \Phi_{Л2} &= 0,000075 + \frac{-0,04}{1,34 \cdot 100} = -0,000224; \\ \Phi_{Л3} &= 0,000075 + \frac{-0,10}{1,48 \cdot 100} = -0,0006; \end{aligned}$$

$$\hat{O}_{\hat{E}4} = 0,000075 + \frac{-0,025}{1,598 \cdot 100} = -0,000081;$$

$$\hat{O}_{\hat{E}5} = 0,000075 + \frac{-0,07}{1,48 \cdot 100} = -0,000398;$$

$$\hat{O}_{\hat{E}6} = 0,000075 + \frac{0,01}{1,22 \cdot 100} = 0,000157;$$

$$\hat{O}_{\hat{E}7} = 0,000075 + \frac{0,07}{1,103 \cdot 100} = 0,00071;$$

$$\hat{O}_{\hat{E}8} = 0,000075 + \frac{-0,02}{1,03 \cdot 100} = -0,00012;$$

$$\hat{O}_{\hat{E}9} = 0,000075 + \frac{-0,05}{1,49 \cdot 100} = -0,00026;$$

Відношення показників форми листа після і до прокатування не що інше, як коефіцієнт вирівнювання форми  $K_v$ .

Отримаємо коефіцієнт  $K_v$  поділивши праву та ліву частини рівняння (2.13) на  $\Phi_{л0}$ :

$$\hat{E}\hat{a}_1 = \frac{0,000235}{0,000075} = 1 + \frac{0,02}{1,25 \cdot 100 \cdot 0,000075} = 3,13;$$

$$\hat{E}\hat{a}_2 = \frac{-0,000224}{0,000075} = 1 + \frac{-0,04}{1,34 \cdot 100 \cdot 0,000075} = -2,98;$$

$$\hat{E}\hat{a}_3 = \frac{-0,0006}{0,000075} = 1 + \frac{-0,10}{1,48 \cdot 100 \cdot 0,000075} = -8,0;$$

$$\hat{E}\hat{a}_4 = \frac{-0,000081}{0,000075} = 1 + \frac{-0,025}{1,598 \cdot 100 \cdot 0,000075} = -1,08;$$

$$\hat{E}\hat{a}_5 = \frac{-0,000398}{0,000075} = 1 + \frac{-0,07}{1,48 \cdot 100 \cdot 0,000075} = -5,31;$$

$$\hat{E}\hat{a}_6 = \frac{0,000157}{0,000075} = 1 + \frac{0,01}{1,22 \cdot 100 \cdot 0,000075} = 2,09;$$

$$\hat{E}\hat{a}_7 = \frac{0,00071}{0,000075} = 1 + \frac{0,07}{1,103 \cdot 100 \cdot 0,000075} = 9,47;$$

$$\hat{E}\hat{a}_8 = \frac{-0,00012}{0,000075} = 1 + \frac{-0,02}{1,03 \cdot 100 \cdot 0,000075} = -1,6;$$

$$\hat{E}\hat{a}_9 = \frac{-0,00026}{0,000075} = 1 + \frac{-0,05}{1,49 \cdot 100 \cdot 0,000075} = -3,47;$$

Результати розрахунків занесемо до таблиці 3.13.

Для пояснювання отриманих результатів і побудові графіків визначимо абсолютний та відносний обтиск прокатуваних зразків.

Абсолютний обтиск:

$$\Delta h = h_0 - h_1;$$

Відносний обтиск:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\%;$$

де  $h_0$  і  $h_1$  – товщина штаби відповідно до і після прокатування.

Таблиця 3.13 – Показники форми зразків

№ п/п	$\Delta\mu$ (8)	$\Phi_{л0}$ (5)	$\Phi_{л1}$ (6)	$\Phi_{л1}$ (13)	<i>Кв</i> (14)
1	0,02	0,000075	0,00016	0,000235	3,13
2	-0,04		-0,00029	-0,000224	-2,98
3	-0,10		-0,00067	-0,0006	-8,0
4	-0,025		-0,00016	-0,000081	-1,08
5	-0,07		-0,00047	-0,000398	-5,31
6	0,01		0,000083	0,000157	2,09
7	0,07		0,00066	0,00071	9,47
8	-0,02		-0,00019	-0,00012	-1,6
9	-0,05		-0,00033	-0,00026	-3,47

$$\Delta h_1 = 0,91 - 0,73 = 0,18 \text{ мм};$$

$$\varepsilon_1 = \frac{0,18}{0,91} \cdot 100\% = 19,8\%;$$

$$\Delta h_2 = 0,91 - 0,68 = 0,23 \text{ мм};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{0,23}{0,91} \cdot 100\% = 25,3\%;$$

$$\Delta h_3 = 0,91 - 0,61 = 0,3 \text{ мм}; \quad \varepsilon_3 = \frac{0,30}{0,91} \cdot 100\% = 32,97\%;$$

$$\Delta h_4 = 0,91 - 0,57 = 0,34 \text{ мм}; \quad \varepsilon_4 = \frac{0,34}{0,91} \cdot 100\% = 37,4\%;$$

$$\Delta h_5 = 0,91 - 0,62 = 0,29 \text{ мм}; \quad \varepsilon_5 = \frac{0,29}{0,91} \cdot 100\% = 31,9\%;$$

$$\Delta h_6 = 0,91 - 0,75 = 0,16 \text{ мм}; \quad \varepsilon_6 = \frac{0,16}{0,91} \cdot 100\% = 17,6\%;$$

$$\Delta h_7 = 0,91 - 0,83 = 0,08 \text{ мм}; \quad \varepsilon_7 = \frac{0,08}{0,91} \cdot 100\% = 8,8\%;$$

$$\Delta h_8 = 0,91 - 0,88 = 0,03 \text{ мм}; \quad \varepsilon_8 = \frac{0,03}{0,91} \cdot 100\% = 3,3\%;$$

$$\Delta h_9 = 0,91 - 0,61 = 0,3 \text{ мм}; \quad \varepsilon_9 = \frac{0,30}{0,91} \cdot 100\% = 32,97\%;$$

Результати розрахунків заносимо до таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Деформаційні параметри зразків

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta h$ , мм	0,18	0,23	0,30	0,34	0,29	0,16	0,08	0,03	0,30
$\varepsilon$ , %	19,8	25,3	32,97	37,4	31,9	17,6	8,8	3,3	32,97

По результатам розрахунків будуюмо графічні залежності технологічних параметрів рис. 3.10-3.16.

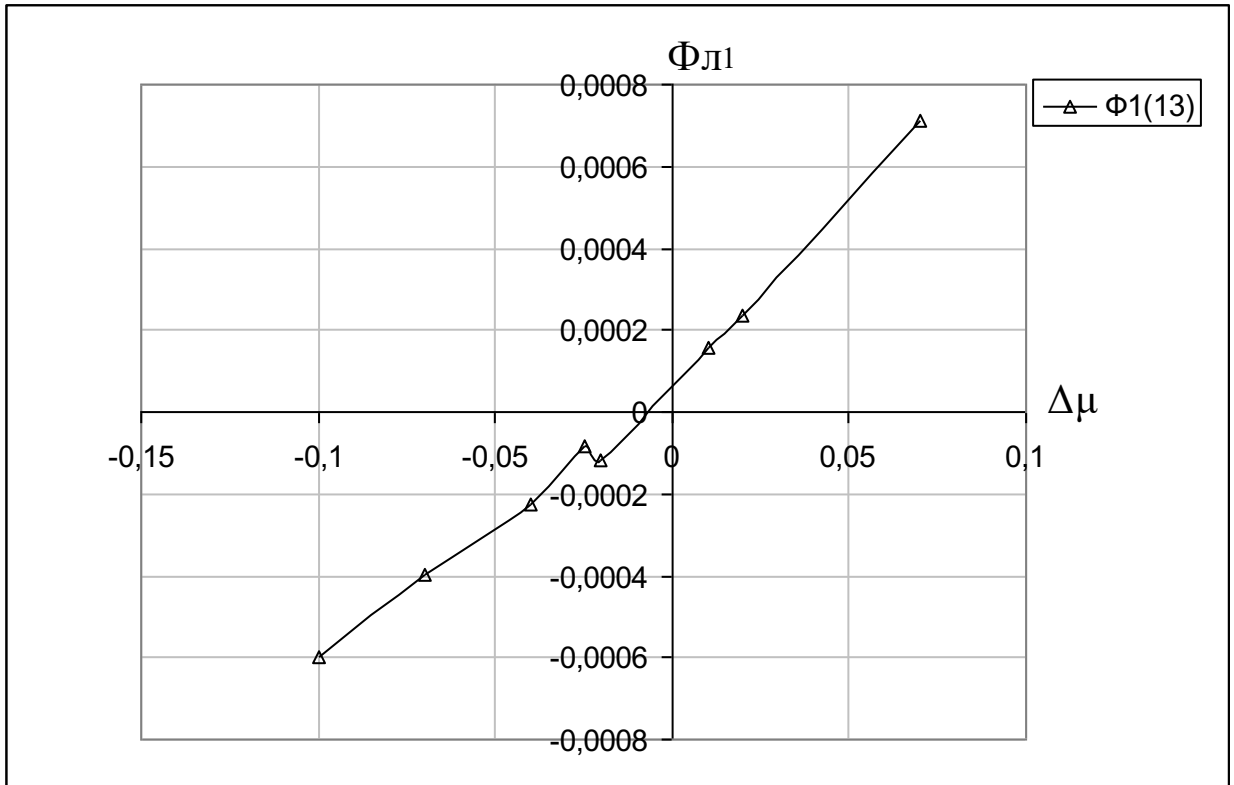


Рисунок 3.10 – Вплив нерівномірності розподілу витяжок по ширині штаби на підсумкове значення показника форми штаби

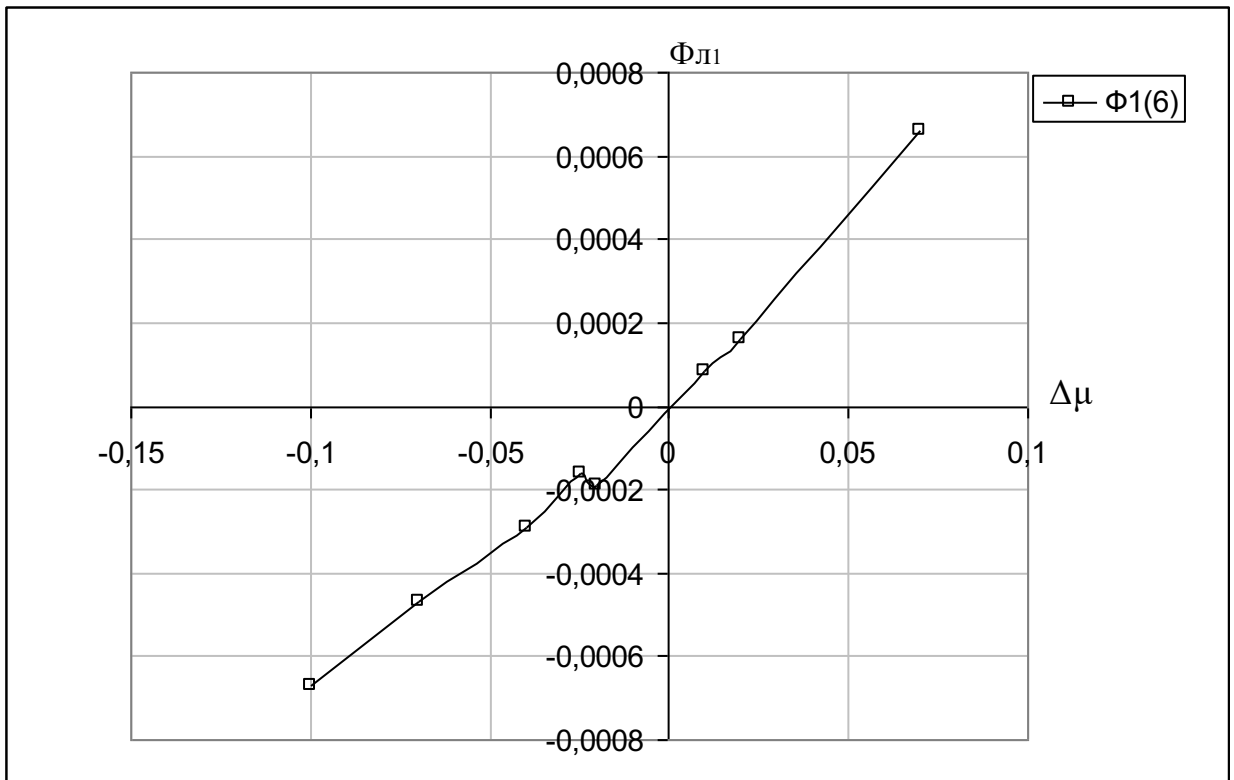


Рисунок 3.11 – Вплив нерівномірності розподілу витяжок по ширині штаби на підсумкове значення показника форми штаби

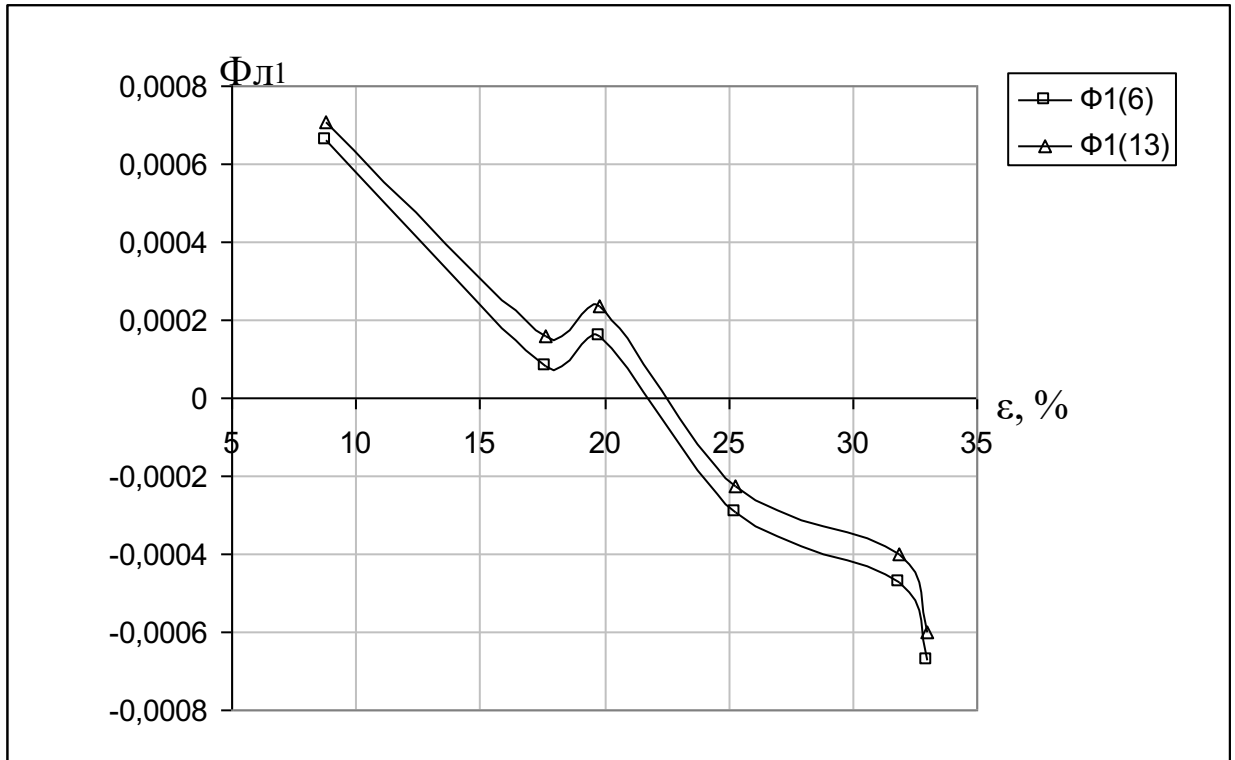


Рисунок 3.12 – Залежність показника форми після прокатки  $\Phi_{Л1}$  від відносного обтиску  $\varepsilon$

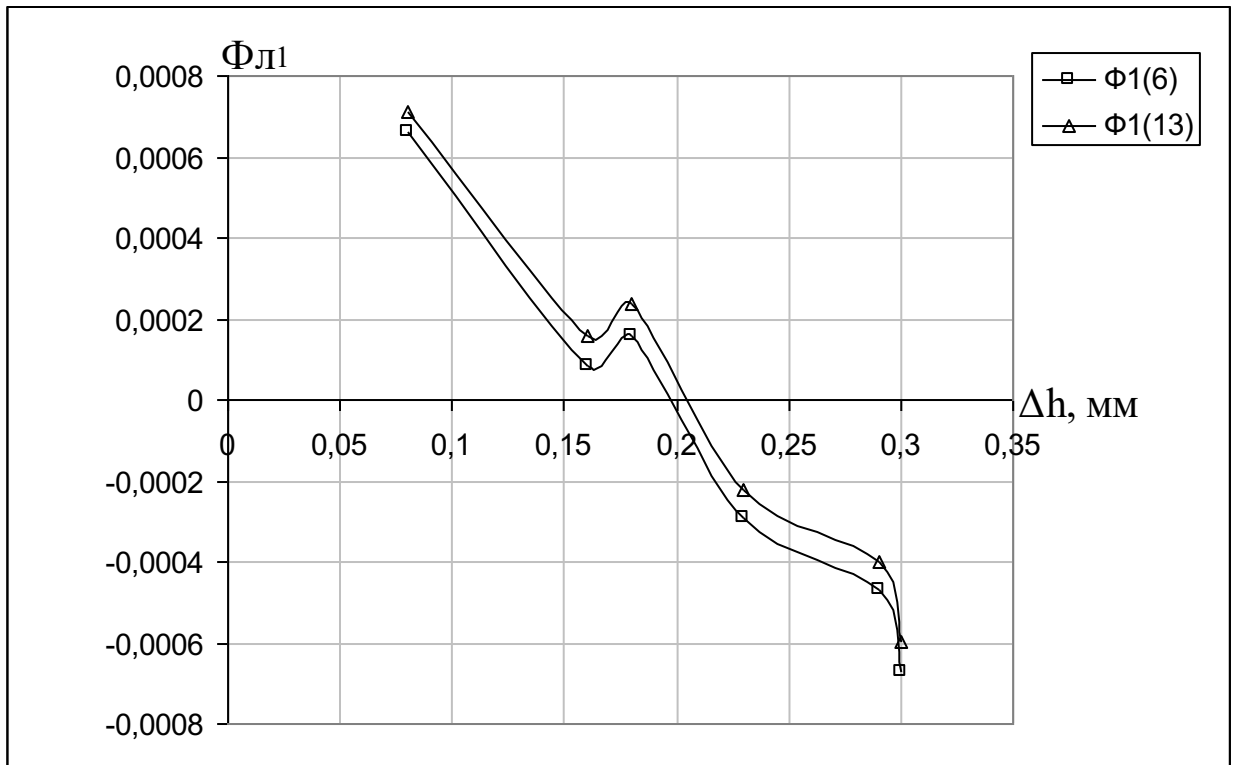


Рисунок 3.13 – Залежність показника форми після прокатки  $\Phi_{Л1}$  від абсолютного обтиску  $\Delta h$

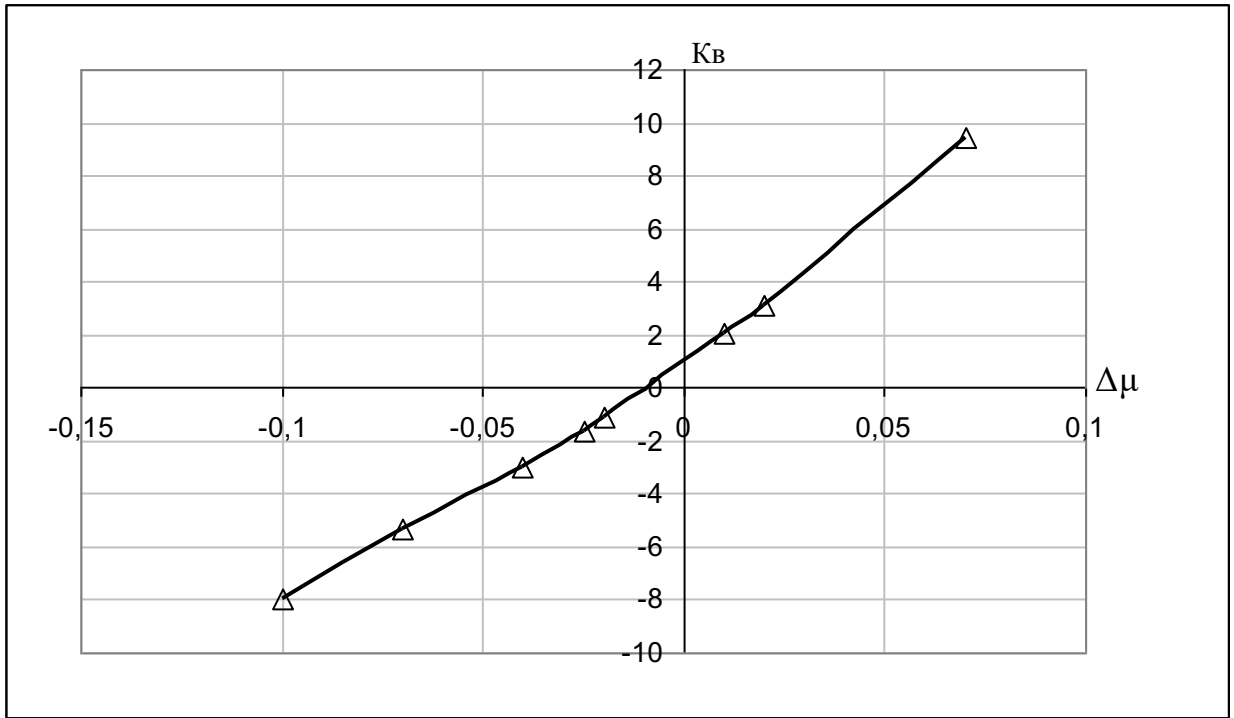


Рисунок 3.14 – Вплив нерівномірності розподілу витяжок по ширині штаби на підсумкове значення коефіцієнта вирівнювання штаби

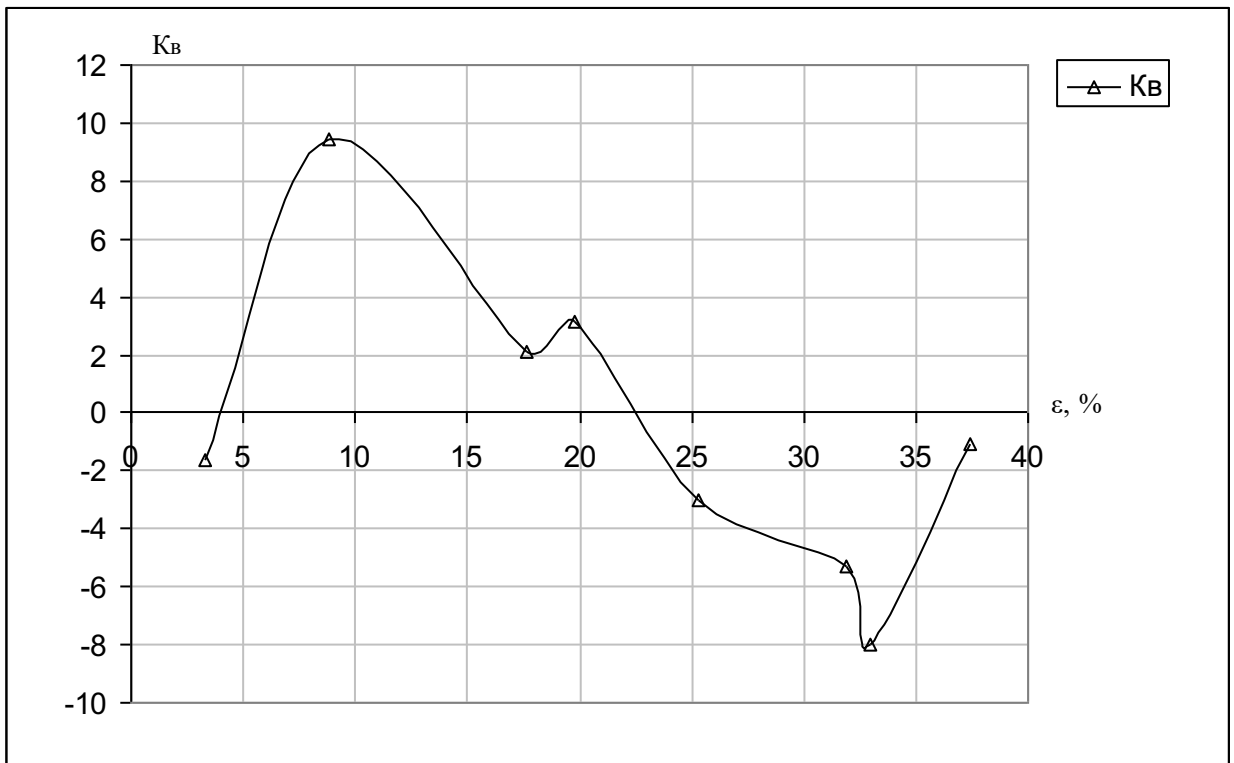


Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта вирівнювання  $K_B$  від відносного обтиску  $\varepsilon$



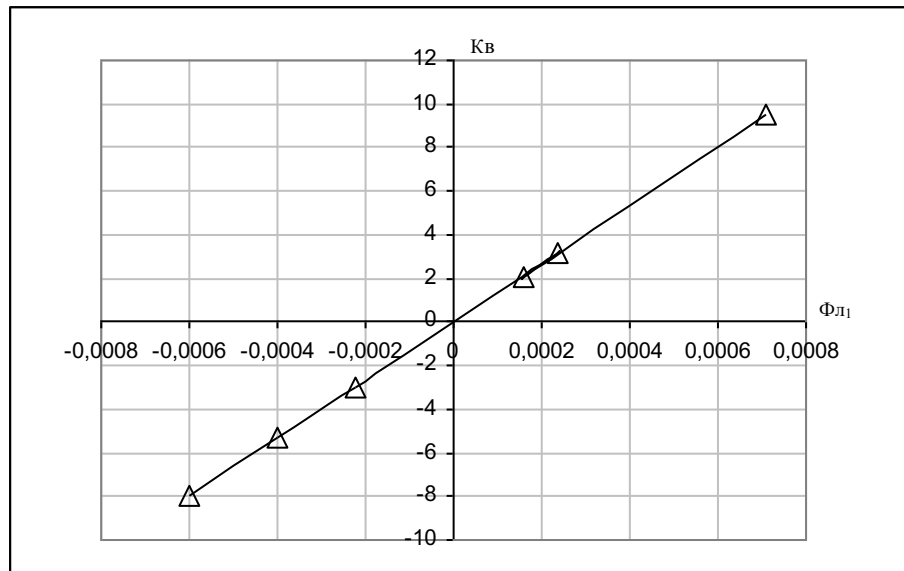


Рисунок 3.16 – Залежність коефіцієнта вирівнювання  $K_v$  від показника форми штаби після прокатки

### 3.3 Розрахунок показників форми штаби та коефіцієнта вирівнювання

Розрахунки параметрів профілю і форми штаби, а також визначення величин керуючих впливів на профіль і форму можуть бути проведені з використанням формул, отриманих по викладеній раніше методиці. (див. таблиці № 3.15, 3.16, 3.17, 3.18).

Таблиця 3.15 – Перехід від хвилястого до плоского листа

№	$l_{c0}$ , мм	$l_{k0}$ , мм	$l_{c1}$ , мм	$l_{k1}$ , мм	$\lambda_c$	$\lambda_k$	$\lambda$	$\Delta\lambda_y$	$\Phi_{Л0}$	$\Phi_{Л1}$	$K_{в,ф}$
1	110	112	117	117	1,06	1,04	1,05	0,02	0,0002	- 0,0000095	0,0475
2	105	107			1,11	1,09	1,10			- 0,0000182	0,091
3	102	104			1,15	1,13	1,14			- 0,0000246	0,123
4	98	100			1,19	1,17	1,18			- 0,0000305	0,1525
5	95	97			1,23	1,21	1,22			- 0,0000361	0,1805

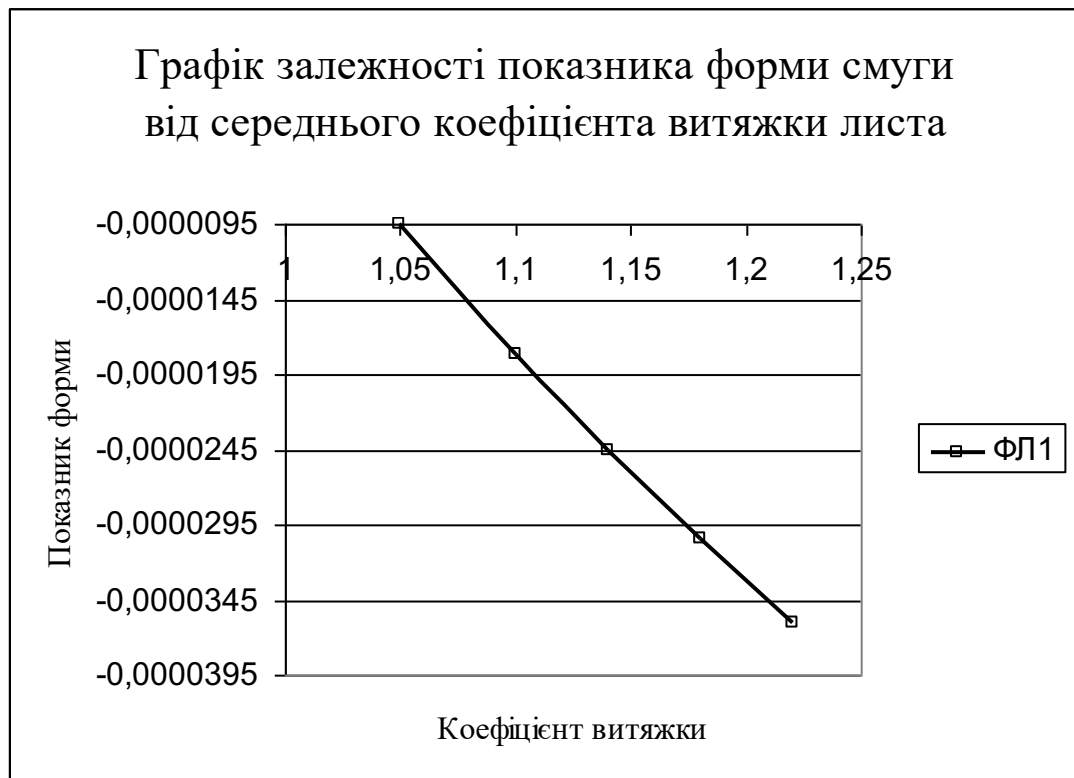


Рисунок 3.17 – Графік залежності показника форми штаби від середнього коефіцієнта витяжки листа при переході від хвилястого до плоского листа

Таблиця 3.16 – Перехід від коробчатого до плоского листа

№	$l_{c0}$ , мм	$l_{k0}$ , мм	$l_{c1}$ , мм	$l_{k1}$ , мм	$\lambda_c$	$\lambda_k$	$\lambda$	$\Delta\lambda_y$	$\Phi_{л0}$	$\Phi_{л1}$	$K_{в.ф}$
1	112	110	117	117	1,04	1,06	1,05	0,02	0,0002	0,0000095	0,0475
2	107	105			1,09	1,11	1,10			0,0000182	0,091
3	104	102			1,13	1,15	1,14			0,0000246	0,123
4	100	98			1,17	1,19	1,18			0,0000305	0,1525
5	97	95			1,21	1,23	1,22			0,0000361	0,1805

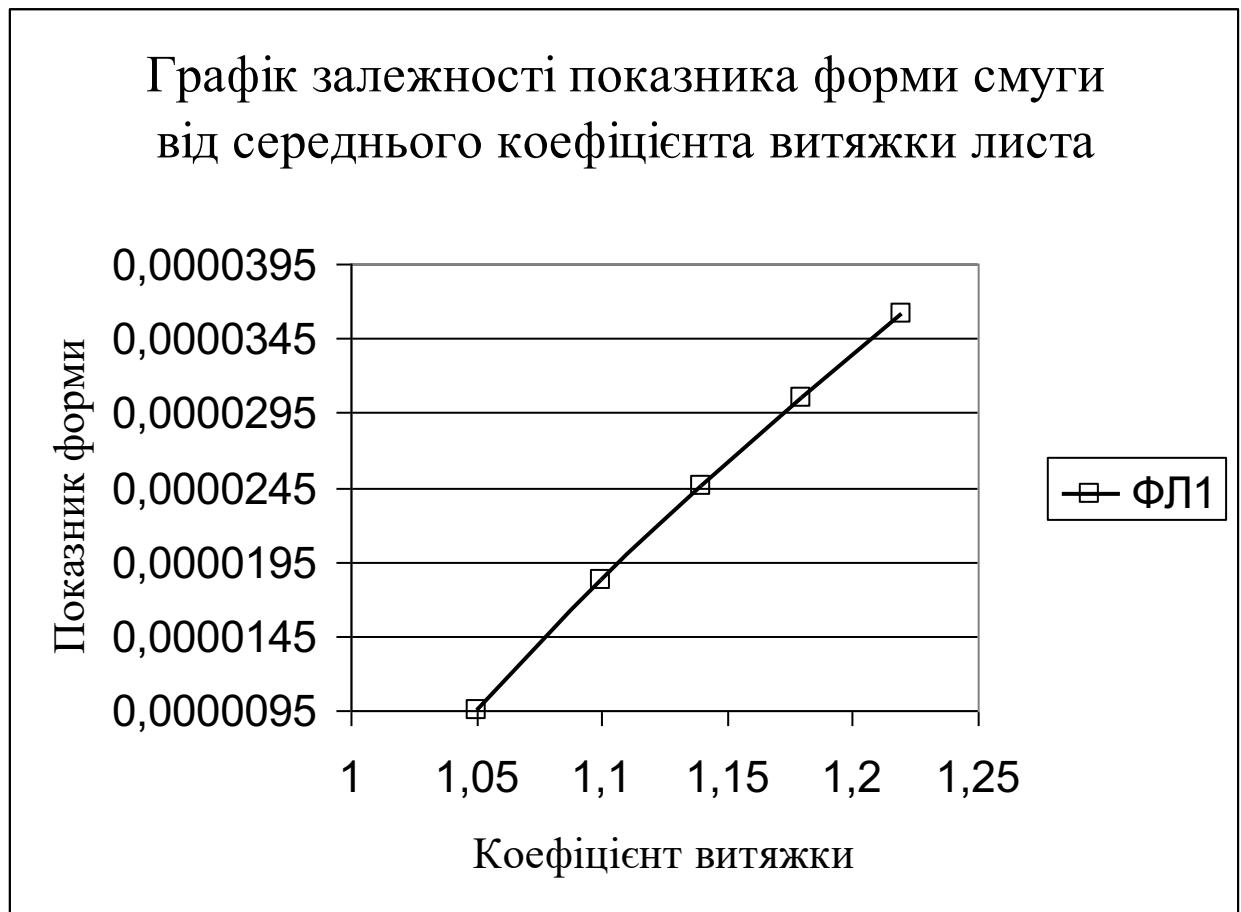


Рисунок 3.18 – Графік залежності показника форми штаби від середнього коефіцієнта витяжки листа при переході від коробчатого до плоского листа

Таблиця 3.17 – Перехід від плоского до хвилястого листа

№	$l_{co}$ , мм	$l_{ko}$ , мм	$l_{cl}$ , мм	$l_{kl}$ , мм	$\lambda_c$	$\lambda_k$	$\lambda$	$\Delta\lambda_y$	$\Phi_{ло}$	$\Phi_{лп}$	$K_{в.ф}$
1	100	100	104	106	1,04	1,06	1,05	-	0	-0,000190	-
2			109	111	1,09	1,11	1,10			-0,000182	
3			113	115	1,13	1,15	1,14			-0,000175	
4			117	119	1,17	1,19	1,18			-0,000169	
5			121	123	1,21	1,23	1,22			-0,000164	



Рисунок 3.19 – Графік залежності показника форми штаби від середнього коефіцієнта витяжки листа при переході від плоского до хвилястого листа

Таблиця 3.18 – Перехід від плоского до коробчатого листа

№	$l_{c0}$ , мм	$l_{k0}$ , мм	$l_{c1}$ , мм	$l_{k1}$ , мм	$\lambda_c$	$\lambda_k$	$\lambda$	$\Delta\lambda_y$	$\Phi_{л0}$	$\Phi_{л1}$	$K_{в.ф}$
1	100	100	106	104	1,06	1,04	1,05	0,02	0	0,000190	-
2			111	109	1,11	1,09	1,10			0,000182	
3			115	113	1,15	1,13	1,14			0,000175	
4			119	117	1,19	1,17	1,18			0,000169	
5			123	121	1,23	1,21	1,22			0,000164	

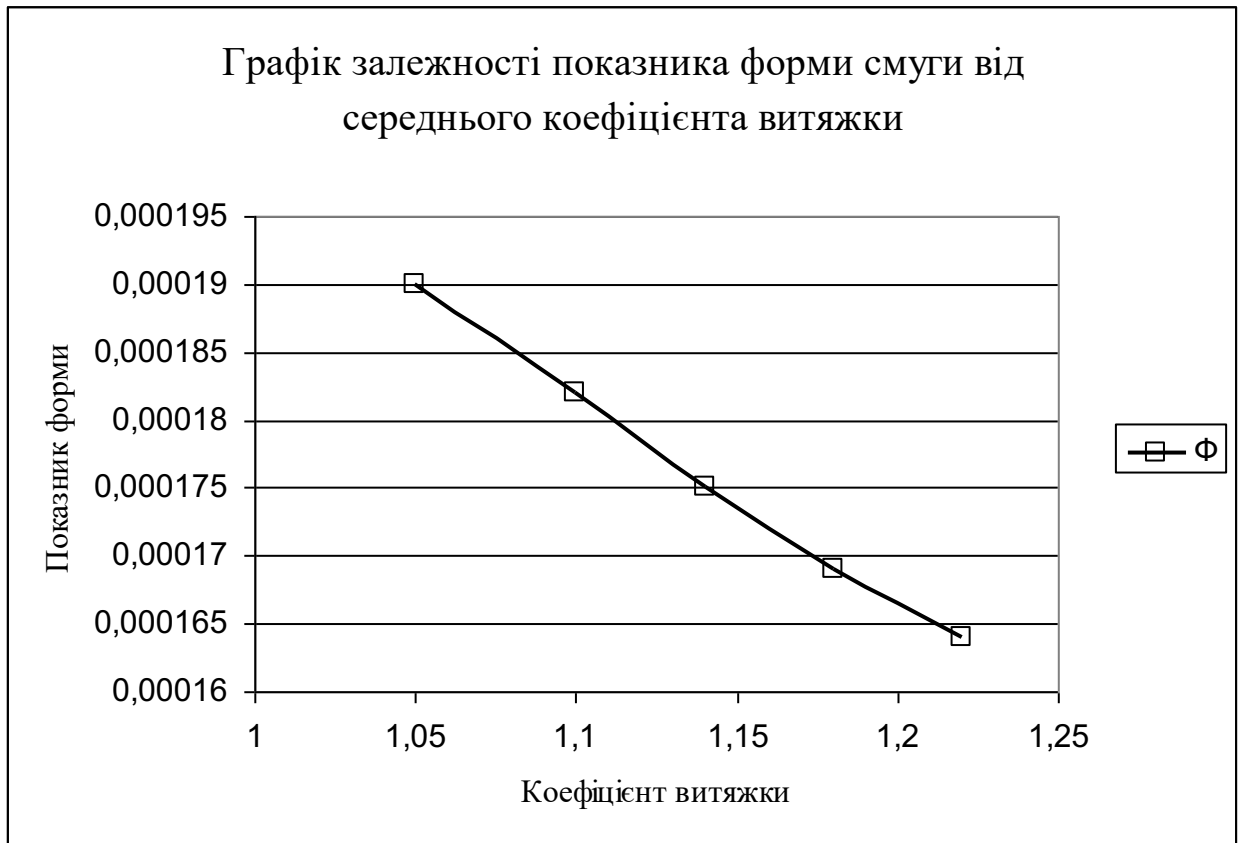


Рисунок 3.20 – Графік залежності показника форми штаби від середнього коефіцієнта витяжки листа при переході від плоского до коробчатого листа

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Загальні положення охорони праці в лабораторії

Всі співробітники лабораторії для попередження нещасних випадків зобов'язані строго дотримувати правил техніки безпеки, протипожежної профілактики та виробничої санітарії. Неакуратність і недостатнє знання устаткування і правил експлуатації приладів і обладнання можуть викликати нещасний випадок. Виходячи із цього, кожний співробітник, що приступив до виконання дорученого йому завдання, зобов'язаний:

1. Перевірити своє робоче місце, наявність і справність устаткування, апаратури, пристосувань і інструмента, необхідного для виконання завдання.

2. Ознайомитися із правилами техніки безпеки й одержати від свого керівника докладний інструктаж з безпечних прийомів праці. Проведень інструктаж на робочому місці винний бути зафіксований у журналі інструктажу співробітників.

3. До роботи, пов'язаної з використанням електричних установок, приладів, вимірювальних апаратів (напруга до 1000 В), можуть бути допущені співробітники інституту з дозволу начальника лабораторії або особи що його заміняє, знайомство із пристроєм, схемою, правилами експлуатації обладнання, проінструктованого адміністрацією й що здав іспитами на відповідну кваліфікаційну групу, передбачену ПТЕ і ПТБ при експлуатації електроустановок.

4. До самостійного обслуговування високовольтних установок (напругою вище 1000 В), високочастотної та рентгенівської апаратури можуть бути допущені особи, що мають спеціальний допуск на право самостійної роботи й відповідну кваліфікаційну групу по техніці безпеки. Допуск

видається кваліфікованою комісією, затвердженої наказом по інституті, строк допуску - 1 рік.

5. Установки, що працюють при високій напрузі, повинні бути постачені правилами технічної експлуатації та інструкціями з техніки безпеки на видному місці.

6. З метою попередження нещасних випадків під час проведення робіт у лабораторії повинні перебувати не менш двох осіб. Один з їх із кваліфікаційної групою не нижче третьої.

7. Струмоведучі частини, що перебувають під високою напругою, повинні бути захищені ізолюючими екранами і постачені попереджувачими надписами білою або червоною фарбою.

8. Всі металеві корпуси електричних установок і приладів повинні бути заземлені.

9. Забороняється користування електричними паяльниками без спеціальних підставок.

10. Всі співробітники лабораторії повинні стежити за якістю ізоляції шнура паяльників, силових кабелів устаткування й настільних ламп. У випадку виявлення ушкодження повідомити відповідальному по техніці безпеки в даній лабораторії. Категорично забороняється користуватися штекерами і несправними вилками для включення в силову мережу.

11. Зборку електричних схем і виміру в них дозволяється проводити тільки при відключеній напрузі живлення.

12. Забороняється залишати без догляду включені схеми і устаткування.

13. Після закінчення роботи кожний співробітник, ідучи з лабораторії, зобов'язаний упорядкувати робоче місце, забрати інструмент, виключити паяльник, вимірювальні прилади і усі вилки із силового живлення.

14. Правила надання першої (долікарської) допомоги потерпілому.

При хімічних отруєннях потерпілого винести на свіже повітря, звільнити від одягу, що стискає подих, а при втраті свідомості - зробити штучний подих. Викликати медичну допомогу.

При пораненнях, щоб запобігти зараженню, необхідно дотримувати наступних правил:

- не доторкатися руками до рани або різними предметами (хусткою, папером, одягом і т.п). Не можна стирати з рани пісок, тому що це тільки забруднює рану;
- у жодному разі не промивати рану ні сирою, ні кип'яченою водою, ніякими ліками, як би вона не була забруднена. Треба лише змазати водою шкіру навколо рани, накласти стерильну пов'язку та доставити потерпілого до лікаря;
- при сильній кровотечі застосовувати здавлювання кровоносних судів, що живлять поранену область тіла. Здавлювання може проводитись пальцем, згинанням кінцівки в суглобі, накладенням джгута або закручення. Місце кінцівки, на яку накладається джгут або закручення, повинне бути попередньо обгорнено бинтом або шматком матерії. Перетягання не повинне бути дуже сильним і припиняється, як тільки кров зупиняється.

При переломах і вивихах знайти для ушкодженої кінцівки саме зручне та спокійне положення. До області ушкодження обережно прикладати холодні предмети (пляшки з холодною водою, холодні примочки). Потім прибинтувати до ушкодженої кінцівки шини або їхні предмети, що заміняють (фанера, дошка) так, щоб суглоби нижче місця перелому були нерухомими, і негайно викликати лікаря.

При забитих місцях голови, груди, живота можуть бути ушкоджені внутрішні органи (мозок, серце, печінка й ін.). Якщо потерпілий знепритомнів, його варто негайно доставити в медпункт.



При опіках ушкоджене місце варто змочити етиловим спиртом або слабким розчином марганцевокислого калію або накладити пов'язку з маззю від опіків.

При поразці електричним струмом необхідно негайно звільнити потерпілого від дії струму.

#### **4.2 Правила по техніці безпеки при роботі на прокатному стані**

1. Перед початком роботи необхідно підготувати прокатний стан, для чого звільнити прохід біля стану та його площадки від сторонніх речей, перевірити огороження муфт, шпинделів та інших обертових деталей, установити і настроїти проводкові столи і проводки.
2. Робота стану перевіряється холостим ходом, під час якого при необхідності готують валки до прокатки, протираючи та зачищаючи їхні бочки тільки з вихідної сторони стану.
3. Всі роботи, пов'язані з прокаткою виконуються тільки за розпорядженнями керівника або іншої особи уповноваженої на проведення роботи. Студенти - виконавці роботи, повинні бути одягнені в застібнену одягу.
4. Перед пуском стану в роботу переконавшись в справності встаткування та попередити при цьому всіх навколишніх.
5. Включення та вимикання стану робити кнопками "пуск" і "стоп". Перед натиском кнопки необхідно переконавшись, що працюючий стан нікому не буде загрожувати.
6. При роботі стану забороняється робити установку або настроювання проводок, відкривати або знімати огороження.
7. Категорично забороняється протирати або змазувати обертові валки з боку входу в них металу, а так саме чистити передній стіл і проводки.
8. Не торкатися, не включати та не виключати без дозволу відповідальної особи (керівника роботи, лаборанта) рубильники, автомати та інші прилади.

9. При роботі на стані валки і робоче місце в стану повинні бути добрі освітлені.
10. Під час прокатування короткі зразки (довжиною  $< 400$  мм) задавати руками у валки забороняється, їх підштовхують до валків дерев'яним брусом довжиною не менш 350 мм. Металеві прутки в якості штовхача використовувати заборонено. Зразки довжиною  $> 400$  мм дозволяється задавати у валки руками, утримуючи їх однією рукою за бокові грані, але не в якому разі за верхню і нижню грані. Останнє може привести до притиску руки і її травмуванню об нижній проводковий стіл. Після захоплення зразка валками руку або штовхач необхідно відвести.
11. Якщо при завданні у валки штаби не захоплюється, те необхідно поліпшити умови захоплення, зменшуючи обтиск підняттям верхнього валка або розплющенням переднього кінця зразка молотком на ковадлі. Категорично забороняється вштовхувати метал у валки силою.
12. При роботі зі зразками із свинцю необхідно пам'ятати, що свинець досить ядовитий метал і його не можна брати руками, якщо на них є відкриті подряпини і ранки. Після роботи зі свинцем необхідно ретельно вимити руки. За виконанням цих розумів роботи зі свинцем вважається безпечною.
13. При гарячій прокатки посадку і видачу металу з печі робити металевими кліщами.
14. Відкривати і закривання дверцята печі, а також посадку і видачу металу з печі робити тільки при відключеній печі.
15. Гарячі зразки укладати тільки на азбестові або металеві підкладки. Укладати гарячі зразки на підлогу забороняється.
16. По закінченню роботи інструменти і прокатаний метал необхідно здати керівникові, а стан знеструмити, відключивши рубильник і закрити валки решіткою.

### 4.3 Пожежна безпека при роботі з електроустаткуванням і електроприладами

Всі співробітники та студенти зобов'язані знати та строго виконувати правила пожежної безпеки, а у випадку виникнення пожежі застосовувати всі залежні від них заходи щодо порятунку людей, майна та гасінню пожежі.

1. Роботи в лабораторії та інших навчальних приміщеннях повинні проводитися при наявності справного електроустаткування. При виявленні дефектів в ізоляції проводів, несправності пускачів, розеток, вилок, а також заземлення варто негайно повідомити відповідальній особі за протипожежний стан приміщення. Всі несправності електроприладів повинні усувати тільки фахівцем-енергетиком.

2. Забороняється підключати до клем щитів силової лінії прилади освітлювальної мережі, що споживають струм високої напруги.

3. У випадку припинення подачі струму в мережі всі електроприлади повинні бути негайно виключені.

4. У випадку загоряння електропроводів або електроприладів необхідно їх негайно знеструмити та приступитися до гасіння наявними засобами пожежогасіння.

#### *Дії на випадок пожежі*

Кожний, що виявив пожежу або загоряння, зобов'язаний:

1. Негайно сповістити про це в пожежну охорону.
2. Приступитися до гасіння вогнища пожежі наявними на робочому місці засобами пожежогасіння.
3. Вжити заходів по організації виклику до місця пожежі адміністрації навчального закладу.
4. Видалити із приміщення або небезпечної зони людей, не зайнятих ліквідацією пожежі.

5. Організувати відключення електроенергії (за винятком систем протипожежного захисту).

#### *Заходи безпеки при роботі з електропіччю*

1. До роботи з електропіччю допускається тільки спеціально навчений персонал, що знає конструкцію і правила обслуговування печі, принцип дії встановленої на ній електроапаратури та схему її живлення, а також правила безпеки при експлуатації електроустановок до 1000 В.

2. Перед початком роботи з електропіччю необхідно переконатися в надійності кріплення й приєднання проводів в електричному блоці, а також у правильності підключення до мережі та контуру заземлення.

3. При порушенні нормальної роботи електропечі необхідно відключити її від мережі та вжити заходів по усуненню несправностей. Ремонтні роботи тільки після зняття напруги. Температура поверхні передньої стінки та дверцят  $100^{\circ}\text{C}$ , тому слід дотримуватися обережності при роботі з електропіччю.

#### **4.4 Безпека праці при готуванні та травленні шліфів**

Під час готування та травлення шліфів потрібне дотримання певних правил роботи. Всі операції варто проводити в спеціальному вентилязованому приміщенні (шафі). На шліфувальних і полірувальних верстатах дотримувати всі правила безпеки праці, передбачені для роботи з отруйними та шкідливими хімічними речовинами, а також правила пожежної безпеки.

Працювати треба в спецодязі - халаті. Рукава халата повинні бути застебнуті (у запобігання влучення у верстат при обертанні кола). Щоб захистити шкіру рук від шкідливого впливу хімічних речовин і розчинів, а очі від влучення бризів травителя, становити травителі та труїти шліфи треба в тонких гумових рукавичках і захисних окулярах.

### *Вимоги безпеки під час роботи*

При механічному шліфуванні та поліруванні шліф варто міцно тримати в руці, щоб він не вирвався та не наніс ушкоджень. Особливу обережність треба проявляти, користуючись хімічними речовинами при готуванні реактивів і електролітів.

Більшість електролітів і реактивів, застосовуваних для готування та травлення шліфів, являють собою розчини та суміші різних кислот, солей і лугів. Ці речовини впливають на організм людини. Потрапляючи на шкірні покриви (у вигляді крапель, бризів або струменя) і слизуваті оболонки (у вигляді пар), шкідливі речовини можуть викликати опіки різного ступеня, а також зробити місцева або загальтоксична дія.

Найбільш швидкі та сильні опіки викликає суміш азотної та соляної кислот («царская водка»). Далі по інтенсивності шкідливого впливу кислоти розташовуються в наступному порядку: суміш сульфатної та хромистої кислот (хромова суміш), азотна, сульфатна, плавикова, хромова, соляна, оцтова, молочна, ортофосфорна, щавлева та ін. Гарячі кислоти та суміші можуть викликати обвуглювання уражених ділянок. Сильні опіки можуть бути викликані і концентрові розчини лугів (їдкий натр і їдке розжарюй).

При вдиханні газів, що виділяються при електрополіруванні та травленні шліфів у більших кількостях, можуть відбутися опіки слизуватих оболонок і отруєння організму. Тому при роботі зі шкідливими речовинами необхідно дотримувати спеціальних мір обережності.

При виявленні мікроструктури металу працювати із травителями треба під витяжкою, найкраще на столі витяжної шафи:

- підігрівати реактиви необхідно на піщаній лазні або на плиті із закритою спіраллю;
- при травленні, шліфи потрібно брати пінцетом або тигельними щипцями;
- розчиняти реактиви треба в зазначеному в рецепті порядку, не наближаючи особу до посудини з хімічними розчинами;

- відпрацьовані реактиви перед зливом у каналізацію повинні бути нейтралізовані (кислоти - лугами, а лугу - кислотами);

- після закінчення роботи весь посуд повинна бути ретельно вимита та висушена;

- приготовлені реактиви (травителі) повинні зберігатися в пухирцях із притереною пробкою в добре вентильованому приміщенні.

При травленні макро- і мікрошліфів у випадку влучення на шкірний покрив або слизуваті оболонки кислоти уражене місце необхідно негайно промити рясним струменем води. Влучення на шкірний покрив 3-5% розчину азотної кислоти не представляє небезпеки.

У лабораторії в спеціальній шафці завжди повинні зберігатися засоби надання першої медичної допомоги: розчини соди та марганцевокислого калію, слабкі розчини оцтової та соляної кислот, нашатирний спирт, спиртової розчин йоду.

## ВИСНОВОКИ

На основі проведеного дослідження можна сформулювати наступні загальні результати, досягнуті в дійсній роботі:

1. Проаналізовано і систематизовані основні фактори, що викликають зміну форми позіху валка і, отже, профілю і пласткості штаби. Докладно розглянутий характер їхнього впливу.

2. Систематизовано методи і засоби підвищення пласткості (корекції профілю) прокатуваної штаби, що розділені на дві істотно різні групи: статичні і динамічні. Такий поділ, дозволяє чіткіше сформулювати принципову значимість кожного методу.

3. Досліджені найбільш характерні технічні рішення по кожному напрямку, сформульовані для кожного напрямку його переваги і недоліки.

4. На основі зазначеного дослідження встановлені перспективи розвитку кожного напрямку, а саме:

а) найбільш перспективним на найближчі кілька років залишається метод противигину;

б) найбільш серйозну конкуренцію йому складе метод безпосереднього динамічного, що розвивається, впливу на бочку валка;

в) у статичних методах, таких, як підвищення твердості валкової системи, будуть продовжені розробки нових ідей, що виникли останнім часом, з метою підвищення їхньої ефективності;

г) у випадку можливості досягнення такого рівня ефективності статичних методів, при якому буде виключена необхідність у застосуванні більш складних динамічних методів, варто очікувати бурхливої інтенсифікації розвитку цих методів і зниження інтересу (у розроблювачів) до методів динамічним;

д) процес прокатки-волошіння по інтенсивності розробок буде продовжувати йти на збиток;

е) дуже перспективним представляється взаємне сполучення різних методів впливати на профіль штаби;

ж) помітно зростає інтерес і в майбутньому можна скласти інтенсифікації досліджень з питань взаємозв'язку і взаємовпливу систем регулювання поперечної і подовжній різнотовщинності штаби.

5. Розглянуто методи оцінки форми листів і штаб, причини зміни форми і способи її виправлення. Приведено методику отримання показників форми штаб і коефіцієнта вирівнювання.



**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Серета Б.П. Прокатне виробництво: навчальний посібник з грифом МОНУ / Б.П. Серета. Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2008. 254 с.
2. Серета Б.П. Обробка металів тиском: навчальний посібник з грифом МОНУ. Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2009. 368с.
3. Божков А.И., Настич В.П. Плоскостность тонколистового проката. Москва : «СП. ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ», 1998. 264 с.
4. Васильев Я.Д., Григоренко В.У., Данченко В.Н. Научные основы эффективных технологий производства тонкостенной длинномерной металлопродукции /. Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. 353 с.
5. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных полос и листов. Москва : Металлургия, 1971. 200 с.
6. Васильев Я.Д., Сафьян А.М. Производство полосовой и листовой стали. Киев : Вища школа, 1976. 192 с.
7. Мазур В.Л., Сафьян А.М., Приходько И.Ю и др. Управлением качеством тонколистового проката. Киев : Техника, 1997. 384 с.
8. Робертс В. Холодная прокатка стали. Москва : Металлургия, 1982. 544 с.
9. Грудев А.П. Технология прокатного производства. Москва : Арт-Бизнес-Центр, 1994. 651 с.
10. Рокотян С. Е. Теория прокатки и качество металла. Москва : Металлургия, 1981. 224 с.
11. Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. и др Профилирование валков листовых станов. Киев : Техніка. 1986. 190 с.
12. Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. Москва : Металлургия, 1967. 388 с.
13. Максимов Е. Улучшение планшетности прокатываемых полос. *Вестник Магнитогорского металлургического комбината*. 2005. № 2. С. 22-28.

14. Васильев Я. Д., Дементенко А. В. и др. Совершенствование технологии производства тонких холоднокатаных полос с улучшенной плоскостностью. *Металлург. и горноруд. пром-сть*. 2004. № 5. С. 28-32.

15. Васильев Я.Д., Дементенко А.В. Исследование точности поперечного профиля горячекатаного подката. *Производство проката*. 2002. № 8. С. 16-21.

16. Васильев Я.Д., Дементенко А.В. Условия (критерии) плоскостности при прокатке полос и листов. *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2003. № 9. С. 30-34.

17. Гостев К.А. Основные направления повышения качества листовой прокатки и современные требования к валкам. *Сталь*. 2002. №2. С. 52-55.

18. Шаталов Р.Л. Управление показателями качества и деформируемостью полос при прокатке. *Сталь*. 2003. №9. С. 31-34.

19. Ауцингер Д., Джумлиджа Г., Наджуис Т. Применение современных технологических методов для улучшения профиля и плоскостности горячекатаной полосы. *Сталь*. 2003. №12. С. 37-40.

20. Шаталов Р.Л., Лукашин Н.Д., Кохан Л.С. Исследование профиля и длины контакта полосы с валками при холодной прокатки. *Сталь*. 2002. №3. С. 46-50.

21. Комановский А. З. Листопрокатное производство (справочник). Москва : Металлургия, 1979. 280 с.

22. Коновалов Ю. В., Остапенко А. Л. и др. Расчет параметров листовой прокатки: справочник. Москва : Металлургия, 1986. 430 с.

23. Хензель А., Шпигель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справочник. Москва : Металлургия, 1982. 360 с.

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

25. Целиков А.И., Томлёнов А.Д., Зюзин В.И. и др. Теория прокатки: справочник. Москва : Металлургия, 1982. 335с.

26. Новик Ф.С., Арсов Е.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планируемого эксперимента. Москва : Машиностроение. 1980. 265 с.

27. Середа Б.П. Металловедение и термическая обработка черных и цветных металлов: учебное пособие. Запорожье: изд-во ЗГИА, 2002. 264 с.

28. Середа Б.П. Термическая обработка: учебное пособие для студентов ЗГИА / Б.П. Середа. Запорожье, 2003. 270 с.

29. Гуляев А.П. Металловедение. 5-е издание. Москва : Металлургия, 1977. 664 с.

30. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. Москва : Металлургия, 1979. 368 с.

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

32. Чепчунов Ю.П. Себестоимость проката и пути ее снижения. Москва : Металлургия, 1985. 57 с.

33. Панасейко С.П., Тарасов В.К., Павленко Ю.П. Методические указания к выполнению раздела "Охрана труда" в дипломных проектах для студентов всех специальностей /. Запорожье: изд-во ЗГИА, 2002. 56 с.

34. Жидецкий В.Ц., Джигирей В.С., Мельников А.В. Основы охраны труда. Львов: Афиша, 2000. 351 с.

35. Бринза В.Н., Зиньковский М.М. Охрана труда. Охрана труда в черной металлургии. Москва : Металлургия, 1982. 336 с.

**ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІНОЇ РОБОТИ**

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні



## **МАТЕРІАЛИ**

**II ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**



Запоріжжя

2022

повинна перебувати між двома граничними значеннями: шириною підкату ( $B$ ) та товщиною підкату ( $h$ ).

Важливим показником є клиноподібність штаб. Вона не має перевищувати 1% від товщини штаб (на 1 м ширини). Профіль штаб має бути симетричним. Місцеві (локальні) потовщення не повинні перевищувати 0,3 величини опуклості профілю поперечного перетину.

### Список використаних джерел

1. A.V. Yavtushenko, V.M. Protsenko, Yu.A. Belokon and Yu.V. Bondarenko. Productivity Optimization of Cold Rolling Mills. Steel in Translation, 2020, Vol. 50, No. 5, pp. 335–339.

УДК 621.771.01

Щербань М.А., магістрант 2 курсу  
Науковий керівник – д.т.н, професор Белоконь Ю.О.

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА НЕПЕРЕРВНИХ СТАНАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

На широкоштабових станах холодної прокатки (НСХП) відносний обтиск по клітках стану розподіляють по декількох варіантах:

- 1) максимальний відносний обтиск призначають в першій клітці стану;
- 2) максимальний відносний обтиск призначають в другій клітці стану;
- 3) відносний обтиск практично однаковий в усіх клітках стану, окрім чистової, в якій воно менше;
- 4) відносний обтиск практично однаковий в усіх клітках окрім першої, де воно менше.

У першому варіанті максимально використовують пластичні властивості гарячекатаного підкату при деформації металу в першій клітці стану при недостатній потужності електродвигунів в подальших клітках, а також при прокатці тонких штаб ( $h = 0,4 - 0,5$  мм) на п'ятикліткових станах. Крім того, цей режим деформації дозволяє збільшити товщину гарячекатаного підкату і в той же час підвищити продуктивність широкоштабового стану гарячої прокатки.

Другий режим деформації штаб забезпечує вирівнювання подовжньої різнотовщинності штаби в першій клітці при порівняно невеликому обтиску ( $\epsilon = 14 - 25\%$ ) і достатній потужності приводів в подальших клітках. Раціональний розподіл відносного обтиску в другому варіанті забезпечує прокатку штаб в 2х - 3х клітках стану з однаковим тиском металу на валки. Це дозволяє отримувати високу якість поперечного профілю штаби за рахунок однакових пружних деформацій комплекту валка і подібної форми міжвалкового зазору в клітках.

Відмічені вище достоїнства забезпечуються також при використанні третього варіанту режиму деформації.

Четвертий варіант режиму деформації використовують при прокатці тонких штаб ( $h = 0,4 - 0,7$  мм) з метою збільшення товщини штаби перед чистовою кліттю і зниження вірогідності пориву штаби. Сумарний обтиск при холодній прокатці визначають з урахуванням вимог, що пред'являються до якості готової продукції. Але за усіх умов величина сумарного обтиску залежить від кінцевої товщини, ширини і матеріалу штаби, можливостей прокатного стану.

У роботі визначено оптимальний розподіл сумарного обтиску при прокатці різних штаб за результатами аналізу режимів деформації на НСХП 1680 (ПАТ «Запоріжсталь»), стану 1700 Маріупольського металургійного комбінату (ММК) і стану 2030 Новолипецького металургійного комбінату (НЛМК).

### Список використаних джерел

1. Yavtushenko A.V., Protsenko V.M., Belokon' Y.A., Bondarenko Y.V. Productivity optimization of cold rolling mills. *Steel in Translation*. 2020. 50(5). P. 335-339.
2. 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.

УДК 621.771 (076)

Юрченко А.В., магістрант 2 курсу  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Проценко В.М.

## РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЙ ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГАРЯЧЕКАТАНИХ ШТАБ ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ ТОВЩИНОЮ ГОТОВОГО РОЗКАТУ

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Внаслідок надзвичайно швидкого розвитку технології лиття тонких слябів вже є різні концепції установок для виробництва гарячекатаної штаби (рис. 1).

Найбільш економічним способом виробництва гарячекатаної штаби безперечно є технологія CSP. Завдяки інтенсивним розробкам, в даний час на агрегатах CSP можна відливати сталі багатьох груп марок і прокатувати їх на високоякісну гарячекатану штабу. За відповідного вибору товщини тонких слябів на двострумковому агрегаті можна випускати до 2,5 млн. т штаби на рік.