

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 роботи магістра

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

(другий (магістерський) рівень)

на тему «Оптимізація режимів прокатки вуглецевих сталей при гарячій деформації»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1362-омт

Можаров О. В.

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(шифр і назва)

Керівник Белоконь Ю.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Кругляк Д. О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2023 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

“ 01 ” 05 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Можаров Олег Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) «Оптимізація режимів прокатки вуглецевих сталей при гарячій деформації»

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “01” 05 2023 року № 385-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) 01.12.2023

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) Вуглецеві сталі марки з збільшенням вмісту вуглецю 08кп (0,087%С), сталь 15 (0,15% С), сталь 45 (0,43% С) та сталь У10 (1,00% С). Параметр дослідження – напруження течії металу при гарячій деформації. Параметр оптимізації – температура кінця прокатки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Літературний огляд. Розрахунково-дослідницька частина, Індивідуальне завдання, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Креслення, презентаційний матеріал 15 слайдах (на 15 сторінках)


## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Літературний огляд</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Розрахунково-дослідницька частина</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Індивідуальне завдання</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 01.05.2023

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>		
2	<i>Реферат</i>		
3	<i>Літературний огляд</i>		
4	<i>Розрахунково-дослідницька частина</i>		
4	<i>Індивідуальне завдання</i>		
5	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>		
6	<i>Висновки</i>		

Студент  О.В. Можаров  
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 87 с., 32 рис., 8 табл., 32 джерела.

ГАРЯЧА ПРОКАТКА, ШТАБА, ВАЛОК, ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ, ЗУСИЛЛЯ ПРОКАТКИ, МОМЕНТ ПРОКАТКИ, ТЕМПЕРАТУРА ШТАБИ, МОДЕЛЮВАННЯ, РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЕКСПЕРИМЕНТ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

Об'єкт дослідження – дослідження та оптимізація режимів прокатки вуглецевих сталей з метою вдосконалення технології прокатки гарячекатаних штаб в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Мета роботи – визначення оптимальних енергосилових параметрів, температурних та швидкісних режимів виготовлення штаб на БСП 1680.

Проведено аналіз недоліків діючій технології. Визначено, що в діючому технологічному процесі вичерпані можливості підвищення ефективності процесу гарячої прокатки штаб. Математично змодульовано залежність основних показників гарячої прокатки штаб від швидкісних та температурних режимів. Розраховані оптимальні режими тиску і енергосилових параметрів процесу прокату по чотирьом варіантам, збудовано алгоритм розрахунку режиму деформації.

В процесі роботи встановлено відмінність мікроструктур сталі при гарячій деформації. Показано, що рекристалізація при гарячій деформації в різних марках сталі з різним тиском відмінна.

Результати роботи можуть бути використані при гарячій прокатці штаб на стані 1680. Застосування ефективних технологічних режимів дозволить зменшити потреби електроенергії та збільшити виробіток стану.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ І СТАН ПРОБЛЕМИ.....	7
1.1 Аналітичний огляд проблем оптимізації режимів прокатки вуглецевих сталей .....	7
1.2 Аналіз технології і режимів обтиску.....	10
1.3 Технологічні обмеження.....	26
2 ОБГРУНТУВАННЯ ЗАВДАННЯ Й МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	28
2.1 Тензометричні датчики .....	28
2.2 Устаткування для проведення дослідів .....	33
2.3 Методика вимірів зусилля прокатки .....	37
3 ОБРОБКА Й ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	42
3.1 Оптимізація опору деформації при гарячій прокатці вуглецевих сталей..	42
3.2 Оптимізація температури кінця прокатки.....	54
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	70
4.1 Основи гігієни, фізіології і психології.....	70
4.2 Метеорологічні умови виробничого середовища в обчислювальному центрі.....	72
4.3 Нормування освітлення.....	80
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	84

## ВСТУП

В останні роки все більшого поширення одержало виготовлення гарячекатаних штаб. Подовжня прокатка являється широко розповсюдженим засобом обробки металу тиском (ОМТ). При подовжній прокатці чиниться процес деформації металу між двома валками, які обертаються у різних напрямках. При цьому зменшується товщина, збільшуються довжина і ширина прокатуємої штаби.

Більше 70% штаб прокатані на безперервних станах гарячої прокатки. Бурхливий розвиток виробництва штаб пояснюється техніко-економічними показниками. В порівнянні з іншими типами агрегатів безперервні стани гарячої прокатки найвигідніші по експлуатаційним витрачальним коефіцієнтам і характеризуються високою продуктивністю і економічністю. Тому частка штабового прокату в деяких країнах в загальному обсязі виробництва складає 60-70 % [2].

Безперервний стан гарячої прокатки штаб „1680” ПАТ «Запоріжсталь» призначений для прокатки штаб товщиною 1,5-10,0 мм, шириною 860-1520 мм в рулонах, вагою до 14 т, зі швидкістю в останній кліті стана до 15 м/с, що забезпечує необхідну температуру кінця прокатки штаби. Цей стан обладнаний сучасними пристроями, системами контролю і регулювання точності поперечного та подовжнього профілів перетинів. Весь процес від початку і до кінця керується обчислювальними машинами (КОМ) в які включені локальні системи керування окремими операціями [3]

Але аналіз недоліків діючої технології показує необхідність дослідження та розробки раціональних режимів для подальшого удосконалення технології виробництва гарячекатаних штаб на безперервному тонколистовому стані 1680. Кваліфікаційна робота виконана з метою визначення оптимальних енергосилових параметрів, температурних та швидкісних режимів виготовлення гарячекатаних штаб на БСГП 1680 в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

# 1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ І СТАН ПРОБЛЕМИ

## 1.1 Аналітичний огляд проблем оптимізації режимів прокатки вуглецевих сталей

Процеси гарячої прокатки сталевих листів є одними з основних у чорній металургії. Ці процеси й технологічні розв'язки впливають на фізико-механічні властивості, на стан поверхні й на інші показники якості близько 60-70% продукції галузі. У той же час у значній мірі визначають техніко-економічні показники й ефективність роботи листових комплексів. Усе це обумовлює актуальність і важливість питань, спрямованих на підвищення ефективності гарячої листової прокатки. Проблема ефективності містить у собі ряд важливих завдань: економія енергії, металу й матеріалів; збільшення продуктивності окремих агрегатів, ділянок, ланок, потоків; поліпшення якості штаб за фізико-механічними показниками, по стану поверхні, форми й профілю; по автоматизації й керуванню процесами. Цим питанням присвячена безліч монографій, статтею, доповідей, авторських посвідчень, дисертації й ін. великих радянських, російських і закордонних учених і фахівців.

Учені О.І.Целіков, О.П.Чекмарев, П.І.Полухін, Н.Н.Дружинін, А.Б.Челюсткин, В.П.Полухін, Ю.Д.Железнов, М.М.Софонов присвячують свої праці фундаментальним теоретичним питанням і ефективним розв'язкам [5,23]. Безліч робіт учених Е.Рокатян, О.Н.Сосковець, Ю.Ф.Шевакин, Г.В.Ашихмин, Г.Г.Григорян, Р.Л.Шаталов, Ю.А.Мухін, Ю.В.Коновалів і ін. розглядають питання теорії й технології прокатки [12-15].

Розвиток теорії прокатки, удосконалення технологічних режимів, розробка основ систем регулювання, автоматизації й керування процесами, підвищення ефективності роботи листових потоків неможливо без розробки методик розрахунків технологічних параметрів і математичних моделей

різних процесів листової прокатки. Через важливість цієї області наукових розробок і завдяки дуже швидкому розвитку ЕОМ і персональних комп'ютерів в останні десятиліття більша частка робіт присвячена моделюванню [5-12].

Перші розробки комплексної економіко-математичної моделі гарячої листової прокатки були реалізовані в Інституті проблем керування АН СРСР, Мисис, ЛПИ А.Б.Челюсткиным, Ю.Д.Железновым, Г.Г.Григорьяном, Я.С.Масальским, Р.Л.Шаталовым і автором справжньої дисертації.

Розташовуючи теоретичними розробками, технологічними розв'язками, усе могутнішими ОЦ і моделями процесів наукових і практичних робіт був поставлений на розвиток датчиків, створенні алгоритмів, автоматизованих систем для регулювання, керування й оптимізації листових потоків .

Важливе місце в наукових дослідженнях займають питання якості гарячекатаної штаби за структурою [1-8], профілю, формі й поверхні [10-12]. Для забезпечення необхідного якості штаб по геометрії й поверхні необхідний аналіз навантажень клітей [25-28] і профілю і якості валків [37-41]. Ряд публікацій присвячений питанням підвищення продуктивності агрегатів і станів [15-17]. Розв'язок питань технології й оптимізації процесів листової прокатки зв'язане зі схемою розташування встаткування станів і з розвитком окремих агрегатів і всього комплексу . В опублікованих роботах російських і закордонних авторів в області гарячої прокатки штаб спеціальна увага приділяється збереженні тепла металом по лінії стану, економії енергії й можливостям підігріву розкату або тільки його крайок .

Багато творчих зусиллі вчених і фахівців спрямовані на вирішення проблем, пов'язаних з гарячим посадом слябів у методичні печі, зі сполученням процесів лиття й прокатки, з можливістю реалізації прямої прокатки ( без нагрівання слябів) і ін.

При проведенні багаторічних досліджень вчені дотримувалися наступної схеми робіт: 1.Аналіз існуючих технологічних розв'язків на діючих листових потоках; 2.Розробка методики й моделі як інструмента для дослідження й оптимізації процесів гарячої прокатки штаб; 3.Теоретичний



аналіз різних технологічних розв'язків і взаємозависимостей параметрів прокатки; 4.Розробка оптимальних технологій і раціональних конструктивних розв'язків; 5.Впровадження розроблених розв'язків на діючих листових потоках.

Багато з ідей і технологічних розв'язків, отриманих у процесі дослідницької роботи будучи оригінальними й уважаючись не дуже прийнятними на момент їх публікації, у перебігу часу ставали логічними й доразвивались у роботах ряду інших учених і фахівців.

Гарячекатана штаба є одним з основних видів металопродукції. Виробництво гарячекатаних штаб, будучи енерго-, капітало- і ресурсомістким виробництвом у чорній металургії, у значній мірі визначає техніко-економічні показники металургійного підприємства. По зазначених причинах проблема поліпшення якості й підвищення ефективності процесів гарячої прокатки штаб є важливою й актуальною.

Розв'язок цієї проблеми здійснюється шляхом розробки нових і вдосконалення існуючих технологій і процесів, реконструкції й модернізації агрегатів, розробки технологічних основ керування й високоефективних технічних схем.

У той же час ряд технологічних завдань вирішують, як правило, методом експертних оцінок. Причина в тому, що результати технологічних розв'язків для різних ланок листового комплексу взаємно суперечливі по показниках якості штаб, продуктивності агрегатів і ін. Необхідне зв'язування ділянок потоку (безперервне розливання слябів або їх прокатка на слябінгу, нагрівши слябів, чорнова й чистова прокатка штаб), підпорядкування їх роботи єдиному, загальному й об'єднуючому показнику (критерію) роботи.

Ефективність розв'язку завдань, що розглядають листову прокатку у цілому, на порядок вище ефективності розв'язку завдань в окремих ланках.

У зв'язку із цим вибір критерію оптимізації ланок листового потоку, розробка методів дослідження, створення математичних моделей взаємозв'язків технологічних і економічних показників роботи ланок мають

важливе наукове й практичне значення. Розробка на їхній основі технічних і технологічних розв'язків в області гарячої прокатки штаб і їх впровадження у виробництво є актуальним завданням.

Метою роботи є вдосконалювання процесу гарячої прокатки сталевих штаб на основі нових теоретичних, технічних і технологічних розв'язків, спрямованих на підвищення технікоекономічних показників процесу прокатки й поліпшення якості штаб [29].

## **1.2 Аналіз технології і режимів обтиску**

При визначенні технології і режимів обтискання на стані звичайно виходять з досвіду роботи персоналу, існуючих традицій і прийнятих на заводах технологічних схем, особливостей встановленого устаткування, якості початкової заготовки і конкретних вимог, що пред'являються до готової продукції. Проте такий диференційований підхід обмежує застосування автоматизованих систем для розрахунку і оптимізації режимів обтискання. Численні особливості процесу зумовлюють те, що в даний час немає загальновизнаних методів розрахунку режимів холодної тонколистової прокатки. Ці режими звичайно встановлюють на підставі досвідчених даних і поступово коректують в процесі роботи [26].

Рекомендований в літературі порядок розрахунку режиму прокатки на безперервному стані полягає в наступному:

1. Вибирають сумарний ступінь деформації на стані на підставі можливостей стану і технологічних вимог попередніх переділів.
2. Розподіляють обтискання по клітях безперервного стану, виходячи з сумарного ступеня обтискання.
3. Призначають натягнення по клітях, перед першою кліттю, а також між моталкою і останньою кліттю.
4. Задаються швидкістю прокатування в останній кліті стану відповідно до товщини прокатувального металу.

5. По прийнятих коефіцієнтах обтискання в кожній кліті визначають товщину штаби по клітях, швидкості з урахуванням випередження і натягнення, тиск і зусилля металу на валяння з урахуванням того, що пружного зім'яло валків.

Розглянемо основні чинники, що впливають на режими деформації при безперервній стаціонарній симетричній холодній прокатці.

#### *Сумарний відносний обтиск*

Сумарний відносний обтиск впливає на структуру і властивості холоднокатаного прокату і енергосилові параметри холодного прокатування. Тому при визначенні величини сумарного відносного обтискання або товщини початкового підкату враховують вимоги, що пред'являються до структури, механічних, технологічних і службових властивостей готового прокату, а також можливості механічного і електричного устаткування стану холодної прокатки. Крім того, враховується можливість і доцільність отримання необхідної товщини підкату на стані гарячої прокатки.

Досвід роботи вітчизняних і зарубіжних станів показує, що сумарне відносне обтискання при холодній прокатці штаб з вуглецевих сталей складає 0,45...0,80. При плющенні жерсті сумарне відносне обтискання досягає 0,90...0,95. Величина сумарного відносного обтискання при прокатці легованих сталей звичайно не перевищує 0,50...0,70 [1].

Якість автомобільного листа значною мірою визначається сумарним обтисканням при холодній прокатці, оскільки від цієї величини залежить кінетика рекристалізації при відпалі холоднокатаного металу, величина рекристалізованих зерен, характер мікроструктури, механічні властивості штаби і їх анізотропія.

Вплив сумарного обтискання при холодній прокатці на формування структури і властивостей сталей 08ГСЮТ досліджувалися [21] як в лабораторних умовах при моделюванні процесів холодного прокатування і відпалу, так і в умовах цеху холодної прокатки.

При цьому слід прагнути досягти тих же показників що і в сталі 08Ю

(оладеподібна форма зерна, оптимальний розвиток октаедричних компонентів текстури цементит в межах балу 1 – 2), оскільки вона добре зарекомендувала себе в штампуванні.

Оптимальні характеристики штампуємости в низьколегованих сталях повинні формуватися за тих же умов як і в сталі 08Ю (з поправкою на легування). З цього виходить, що серед багатьох чинників, що визначають властивості листів, найбільш важливі ті, які можуть впливати на кінетику розміщення сталі в ході рекристалізаційного відпалу і на утворення нітридних фаз.

Встановлено, що залежно від сумарного обтискання при холодному плющенні, зміна механічних властивостей готового листа характеризується кривими що мають екстремальні значення. Поява екстремальних значень на кривих в певних інтервалах сумарного обтискання пов'язана із зміною розмірів і форми зерен фериту після відпалу, яке викликане частковим разупрочненням сталі в процесі холодного прокатування.

Марганцевисті сталі при холодному плющенні сильно наклепують. У зв'язку з цим знижується пластичність сталі і підвищується тиск металу на валяння. Сумарне обтискання при плющенні марганцевистих сталей не перевищує 75 % – у разі прокатування до 0,5 мм, при плющенні до 0,9 – 70%, оскільки підкат <2мм на тонколистовому стані гарячого прокатування одержати неможливо. Так, у сталі 12Г2А, 12Г2, 10Г2, 16Г2 при 10%-ном обтисканні майже рівній межі міцності. Сталі 25ХГСА, 30ХГСА, 08ГСЮФ, 08ГСЮТ порівняно пластичні. Холодне прокатування штаб з цих сталей на безперервних станах кварто після попереднього пом'якшувального відпалу не викликає ускладнень.

Для забезпечення кращого комплексу механічних властивостей сталі сумарне обтискання при холодному плющенні повинне відповідати інтервалам 53.56%, 62.64%, 70.75% [11]. Оптимальні сумарні обтискання дозволили одержати на стані 2030 стабільність властивостей автолистової сталі

(Таб.1, цифра зліва від косої межі відповідає площенню по оптимальному режиму обтискань; справа – по режиму, що діє в період освоєння стану).

Дослідження структури і властивостей різних металів залежно від величини сумарного ступеня деформації показали, що при певних обтисканнях спостерігається аномальна зміна властивостей, обумовлена формуванням особливої структури деформації. Цей ефект, що виявляється в зменшенні прочностних властивостей металу при певних обтисканнях в процесі холодної деформації, одержав назву явище атермічного разупрочнення.

Таблиця 1.1 - Стабільність властивостей сталі автомобільних листів

Товщина штаби h, мм	Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	Середньоквадр. від- хилення $S_{\sigma_T}$ , МПа	Коеф. варіації $V_{\sigma_T}$ %
0,7	295/293	11/21	5,7/11,2
0,9	290/297	12/16	6,5/8,2
1,0	298/297	15/20	7,8/10,5

Важливим є розгляд і облік на практиці вплив сумарного обтискання на стабільність процесу холодного прокатування. Для дослідження впливу ефекту атермічного разупрочнення на площинну холоднокатаних листів стосовно виробничих умов стану холодного прокатування 1680, проведений статичний аналіз прокатуваного сортаменту [1]. При цьому використовували результати випробувань механічних властивостей і оцінки площинної готового прокату.

Характеристичні зони максимального розкиду механічних властивостей зіставляли із зонами деформації, відповідними до максимального середньоквадратичного відхилення площини холоднокатаних листів. Додатковим показником служить питомий вихід другого сорту металу по площинній. Результати статистичного аналізу зміни площинної

холоднокатаних листів залежно від сумарного обтискання представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Порівняння положення зон максимального середньо квадратичного відхилення площинності листів і виходу другого сорту по дефектах площинності з зонами дії ефекту термічного разупрочнення.

Марка стали	Зони сумарного обтискання %		
	ЕАР	відхилення площинної	вихід другого сорту
08ГСЮТ	57,5	58,5	–
	–	–	62,5
	–	64,5	64,5
	67,0	–	67,0
	70,5	70,5	69,5

Для встановлення зв'язку між результатами, одержаними статистичною обробкою даних зміни планшетності, і параметрами процесу прокатування в характеристичних областях обтискань було проведене досвідчене холодне прокатування на напівпромисловому стані 800/500/500. Плющенню піддавали гарячекатану штабу із сталі 08ГСЮТ розміром 2,5 x 315 мм із ступінчастою зміною ступеня деформації через 2 – 4 % у сумарному діапазоні обтискань від 35 – 85 %. При здійсненні вказаного експерименту вимірювали початкову товщину підкату через 5 метрів з маркіровкою місць вимірів.

Для отримання потрібних механічних властивостей тих, що забезпечують необхідну штампувальність відпаленого холоднокатаного листа необхідно дослідити і проаналізувати структуру і властивості матеріалу.

Дослідження структури і властивостей різних металів залежно від

величини сумарного ступеня деформації [15] показали, що при певних обтисканнях спостерігається аномальна зміна властивостей, обумовлена формуванням особливої структури деформації.

У зв'язку з тим що структура і властивості металу після рекристалізаційного відпалу у великій мірі визначаються структурою, що сформувалася в процесі деформації, представляло інтерес вивчити, в якому ступені явище атермічного разупрочнення впливає на якісні показники відпаленого листа із сталі 08ГСЮТ. Холодне прокатування проводили на безперервному стані 1680 з підкату 2,0 мм із змінним сумарним обтисканням в інтервалі від 10 до 73%. Після відбору проб зразки відпалювали в колпакових печах при температурі 680°C.

У відпаленому стані вивчали зміну середнього розміру феритного зерна, твердості HRB, механічних властивостей з визначенням повного й рівномірного подовження  $\delta_n$  і  $\delta_p$ , межі міцності й плинності  $\sigma_B$  і  $\sigma_T$ . Крім того, оцінювали штампувальність готового листа шляхом дослідження текстури й визначення коефіцієнтів нормальної й площинної анізотропії  $R_n$  і  $R_{пл}$ , а також коефіцієнта зміцнення  $n$ .

Нормальну пластичну анізотропію  $R_n$  визначали як відношення поперечної деформації зразка до деформації по товщині:

$$R_n = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (1.1)$$

$\varepsilon_y$  - відносні деформації по ширині;

$\varepsilon_z$  - відносні деформації по товщині;

Однак визначити зміну товщини тонкого зразка безпосереднім виміром з достатньою точністю важко. Тому визначали деформацію по ширині й довжині зразка, а коефіцієнт анізотропії  $R_n$  обчислювали з умови сталості обсягу по формулі:

$$R_H = \frac{b_0 - b_1}{t_0 - \frac{t_0 b_0 l_0}{b_1 l_1}} \frac{t_0}{b_1}, \quad (1.2)$$

$b_0, t_0, l_0$  – ширина, товщина, довжина ділянки зразка, на якому проводять визначення рівномірного подовження до деформації;

$b_1, l_1$  – ширина й довжина зазначеної ділянки після деформації.

Нормальну пластичну анізотропію вимірювали на зразках, вирізаних уздовж і поперек напрямку прокатки. Штампувальність оцінювали за середнім значенням коефіцієнта  $R_H$ . Площинну пластичну анізотропію визначали як відношення відносних деформацій, обмірюваних у двох напрямках у площині аркуша (уздовж і поперек напрямку прокатки):

$$R_{пл} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}. \quad (1.3)$$

Коефіцієнт площинної анізотропії характеризує штампувальність металу в різних напрямках площини листа. Сполучення порівняно великого значення коефіцієнта нормальної анізотропії з відсутністю анізотропії механічних властивостей у площині аркуша при високому коефіцієнті зміцнення  $n$  сприяє гарній штампувальності автолистової сталі.

При дослідженні зміни феритної структури залежно від величини сумарного обтиснення виявили монотонне зменшення середнього розміру зерна при збільшенні ступеня деформації від 10 до 73%. При обтисненнях 50-73% середній діаметр феритного зерна змінюється мало й коливається в межах від 0,015 до 0,018 мм, що відповідає 8-9 балам. Однак при дослідженні неоднорідності феритної структури шляхом оцінки дисперсії  $S(d)$  (рис. 1.1, а) установили, що при ступенях деформації 55 і 68% різко зростає розкид по розмірах феритного зерна. Як показали попередні дослідження, саме при цих обтисненнях структура й механічні властивості в деформованому стані



характеризувалися підвищеною неоднорідністю. Описані результати свідчать про те, що структурна неоднорідність, що виникла в деформованому стані при ступенях деформації, що відповідають аномальним областям, успадковується й після відпалу.

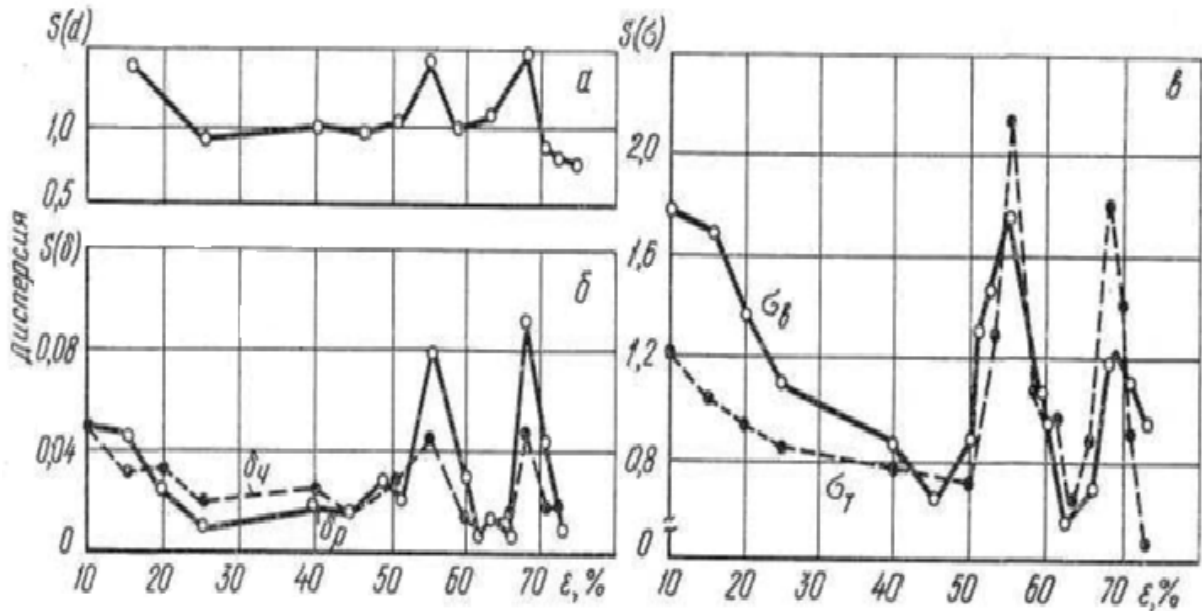


Рисунок 1.1 - Зміна дисперсії структури й механічних властивостей сталі 08ГСЮТ у відпаленому стані

Наслідком збільшення структурної неоднорідності з'явилося підвищення нестабільності механічних властивостей в аномальних областях (рис. 1.1, б, в). Як видно з наведених даних, при ступенях деформації 55 і 68 % у два-чотири рази збільшується дисперсія рівномірного  $\delta_p$  і повного  $\delta_n$  відносного подовження, у два - три рази — дисперсія межі міцності  $\sigma_b$  і границі текучості  $\sigma_t$ . Аномальні зміни виявлені при вимірах твердості й мікротвердості.

Текстуру досліджували шляхом побудови полюсних фігур і визначення полюсної щільності  $P_{(h,k,l)}$  текстурних компонентів (100) і (111). Аналіз полюсних фігур дозволяє описати текстуру аркуша після рекристалізаційного відпалу наступними компонентами: (111)<112>; (111)<110>; (001)<110>; (112)<110>. Це цілком погодиться з літературними даними по текстурах для

о.ц.к. металів. Зі збільшенням обтиснення орієнтування, що погіршують штампувальність  $(112) \langle 110 \rangle$ ;  $(001) \langle 110 \rangle$ , слабшають, а сприятливі орієнтування  $(111) \langle 112 \rangle$ ;  $(111) \langle 110 \rangle$  підсилюються. Однак при ступенях деформації в районі 55 і 68% спостерігається зворотна закономірність, Результати дослідження полюсної щільності  $P_{(h,k,l)}$  залежно від обтиснення, наведені на рис. 1.2, також свідчать про зміну співвідношення текстурних компонентів при обтисненнях 55 і 68% у бік росту несприятливої для штампувальності компоненти  $\{100\}$  і зменшення сприятливого компонента  $\{111\}$ . Необхідно відзначити, що зі збільшенням сумарного обтиснення спостерігається збільшення частки текстурного компонента  $\{111\}$  і зменшення компонента  $\{110\}$ , виключення становлять аномальні області. Це явище впливає на зміну таких характеристик штампувальності, як коефіцієнт нормальної анізотропії  $R_n$ , коефіцієнт зміцнення  $n$  і коефіцієнт площинної анізотропії  $R_{пл}$ . Коефіцієнт нормальної анізотропії  $R_n$  зі збільшенням сумарного обтиснення зростає з 0,4 до 1,2, а коефіцієнт площинної анізотропії падає з 1,4 до 0,2, що свідчить про поліпшення штампувальності, в аномальних областях, навпаки, спостерігається значне збільшення коефіцієнта  $R_{пл}$  і зменшення добутку  $R_n$  (рис. 1.3, а).

Дослідження зміни пластичних характеристик  $\delta_p$  і  $\delta_n$  дозволило виявити погіршення пластичності металу при ступенях деформації 55 і 68% (рис. 1.3, б). У таблиці наведені значення обтиснень, що відповідають областям аномального поведіння різних властивостей листового металу зі сталі 08ГСЮТ у відпаленому стані. Перша область починається при ступенях деформації 50-52% і закінчується при 58-62%. Початок другої області відповідає 62-66%, а кінець 71-73%, У зазначених діапазонах обтиснень формується структура, що характеризується підвищеною неоднорідністю. Текстура в цих областях має збільшену частку несприятливих компонентів  $\{100\}$ , Внаслідок цього механічні властивості при зазначених ступенях деформації характеризуються підвищеною нестабільністю й низькими показниками штампувальності.

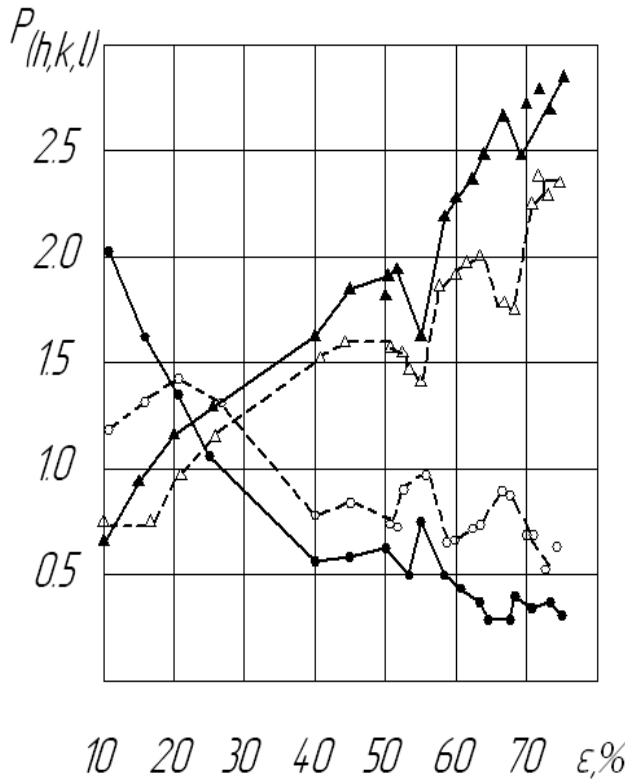


Рисунок 1.2 - Зміна полюсної щільності текстурних компонентів {111} ( $\Delta$ ) і {100} у середні (—) і поверхневих (- - -) шарах листа.

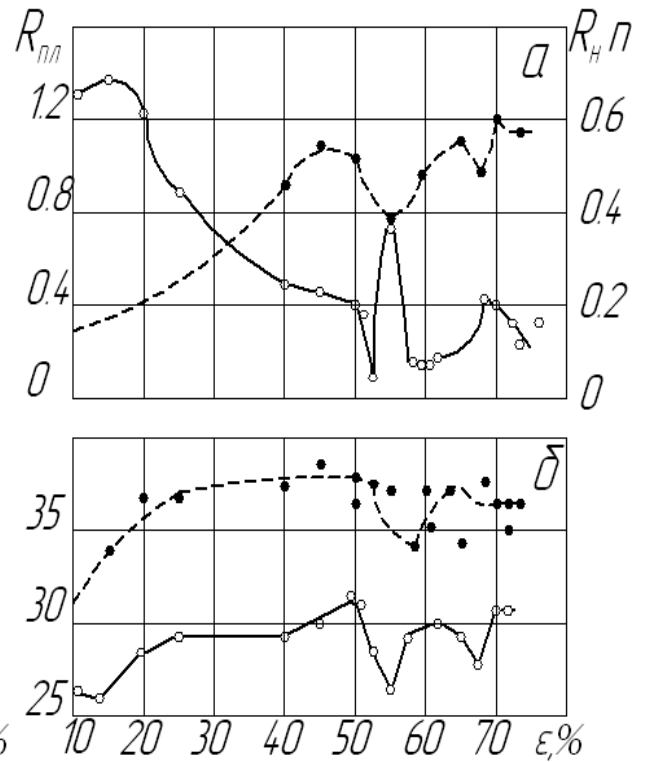


Рисунок 1.3 - Вплив обтиску на штампуємість (а) і пластичність(б) відпаленого листа.

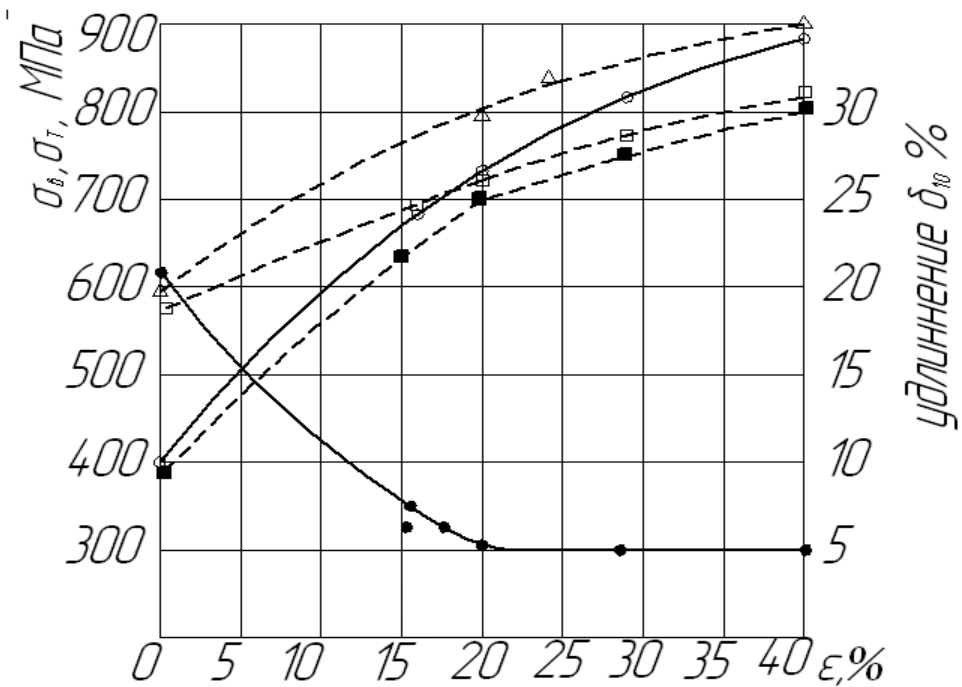


Рисунок 1.4 - Зміна механічних властивостей сталі 08ГСЮТ залежно від ступеня обтиснення при холодній прокатці

### *Схеми розподілу приватних обтиснень по клітях*

Приватні відносні обтиснення впливають на рівень енергосилових, кінематичних і температурних параметрів у кожній кліті на стабільність процесу, а також на точність, якість поверхні й стійкість штаби при холодній прокатці. Значення приватних відносних обтиснень по клітях визначаються величиною вихідної границі текучості й інтенсивністю зміцнення матеріалу штаби, міцністю валків і потужністю привода робочих клітей, умовами захвата, ефективністю технологічного змащення, режимами натягу, умовами охолодження валків, товщиною і якістю вихідного підкату, товщиною прокатувальної штаби, що, вимогами, пропонованими до точності геометричних розмірів і якості поверхні готового прокату.

З урахуванням сказаного на вітчизняному й закордонному безперервному станах холодної прокатки розподіл приватних відносних обтиснень по клітях виробляється по двох принципово різних схемах [1] (рис.1.5, а, б) (де  $\varepsilon$  - обтиснення в %, N - номер кліті). По першому схемі (рис. 1.5, а) частки відносні обтиснення зменшуються від першої кліті до останнього. Такий розподіл приватних обтиснень припускає ведення процесу з найбільшими деформаціями в початкових клітях стана, коли значення параметра  $R/h_0$  (де R,  $h_0$  - відповідно радіус робочого валка й товщина штаби на вході у вогнище деформації) невеликі, що є енергетично вигідним. Крім того, матеріал штаби в початкових клітях стана характеризується найбільшою пластичністю й найменшим опором деформації. Ця схема застосовується при прокатці щодо товстих штаб, а також при прокатці тонких штаб з підкату з мінімальною разнотовщинністю й гарної планшетністю. Різновидом даної схеми є схема, представлена на рис. 1.5, що передбачає деяке зменшення приватного відносного обтиснення в першій кліті. Така схема використовується, коли горячекатаний підкат має значну поздовжню разнотовщинність. Доцільність застосування більше низьких відносних обтиснень у першій кліті обумовлюється тим, що найбільше зниження відносної поздовжньої разнотовщинності досягається при холодній

прокатці, ненаклепаного металу з невеликими обтисненнями.

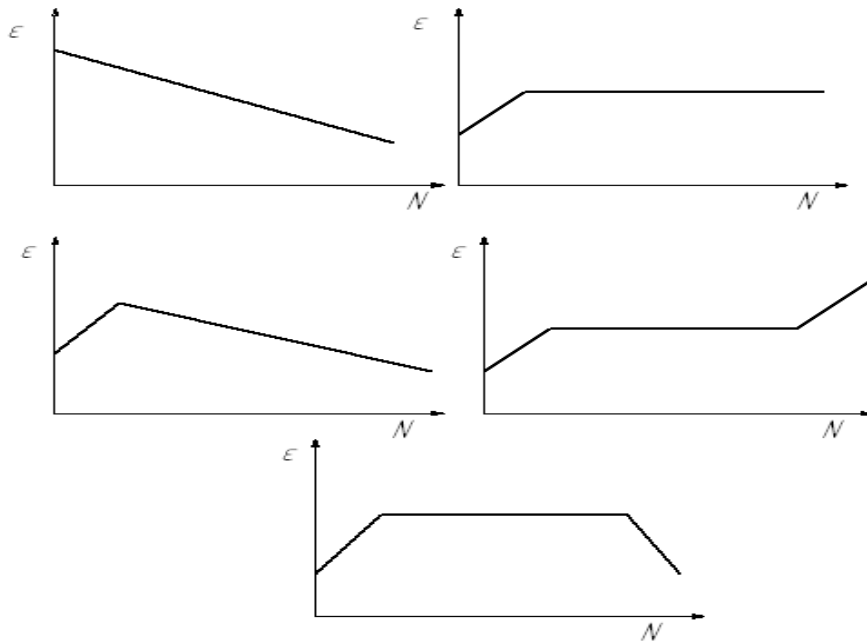


Рисунок 1.5 - Схема розподілу приватних обтиснень по клітях безперервних станів прокатки

По другій схемі (рис. 1.5, б) приватні відносні обтискання у всіх клітях, за винятком першої, встановлюються приблизно на одному рівні. Застосування менших відносних обтискань в першій кліті обумовлюється викладеними вище міркуваннями. Різновидами другої схеми є схеми, представлені на рис.1.5,г,д, що передбачають прокатування із збільшенням (рис. 1.5, г) або зменшенням (рис. 1.5, д) обтискання в останній кліті. Застосування вищих приватних відносних обтискань в останній кліті (рис. 1.5, г) дозволяє збільшити товщину штаби в останньому проміжку безперервного стану, що сприяє зниженню обривності. Така схема застосовується при плющенні тонкої жерсті. Реалізація цієї схеми приводить до великих навантажень механічного і електричного устаткування останній кліті, великим контактним напругам і високій температурі штаби і валків, значення яких можуть виявитися близькими до гранично допустимих, або перевищувати їх. У останньому випадку виникає необхідність в зниженні швидкості і (або) приватного відносного обтискання в останній, кліті стану.

Схема із зменшенням відносного обтискання (рис. 1.5, д) реалізується, коли в останній кліті застосовують робочі валяння з насіченою поверхнею, або при недостатній потужності приводу моталки.

З урахуванням сортаменту, конкретних вимог, що пред'являються до якості готової продукції, і особливостей технології прокатування на кожному стані фактичні схеми розподілу приватних відносних обтискань можуть дещо відрізнятися від схем, представлених на рис. 1.5.

До автомобільних листів висуваються високі вимоги по планшетності і разнотовщинності ці і ряд інших вимог до якості листа виступають обмежуючим чинником при виборі режимів обтискань.

При плющенні в першій кліті заднє натягнення практично відсутнє, унаслідок чого штаба при великих обтисканнях погано центрується і має тенденцію зміщуватися убік від лінії прокатування [26]. Ця обставина обмежує обтискання в першій кліті. Крім того обтискання в першій кліті обмежується тим, що гарячекатаний підкат має істотну разнотовщинність (першу кліть необхідно використовувати для регулювання товщини штаби за допомогою САРТ і тому вона повинна мати резервну потужність для забезпечення належного діапазону регулювання).

Важливим доводом в захист знижених обтискань в перших клітях безперервного стану є те, що ефект самовирівнювання різнотовщинності помітно виявляється лише тоді, коли деформаційне зміцнення металу порівняно невелике. Отже, зниження обтискань в перших клітях сприяє самовирівнюванню подовжньої різнотовщинності.

При виборі величини обтискання в останній кліті безперервних станів враховують, що дуже велике обтискання утрудняє надходження мастила в зону деформації, слідством чого є погіршення якості поверхні. Іноді йдуть на збільшення обтискань в останній кліті з тим, щоб мати між останньою і передостанньою клітями підвищену товщину штаби. Це зменшує вірогідність обриву штаби при регулюванні товщини штаби регулюванням натягнення. Завдяки значній деформації в останній кліті температура штаби істотно

зростає і при змотуванні штаби в рулон складає близько 200 °С. Это сприятливо позначається на якості профілю прокатоної штаби, оскільки відбувається правка штаби розтягуванням при підвищеній температурі.

Обтискання в останній кліті не може бути малим також тому, що з його величиною пов'язано якість регулювання товщини штаби на виході безперервного стану. Для умов роботи чотирехклетьєвого стану 1700 Череповецького заводу при плющенні стали 08Ю з 2,0 на 0,5 мм відносно обтискання в четвертій кліті складає 23%. При 20%-ном допустимій зміні натягнення штаби регулятор зможе відпрацювати відносну разнотолщинність  $\leq 0,1$ , а при плющенні стали 10сп з 4 на 2,0 мм обтискання штаби в четвертій кліті складає всього 5%. При цьому регулятор без перекладу дій на попередні проміжки відпрацювати тільки відносну разнотолщинність величиною 2 %, тобто в 5 разів менше, ніж при обтисканні 23%.

Обтискання в останній кліті збільшують до певної межі, на чотирехклетьєвих станах при плющенні низьколегованих сталей – до 20 – 25%.

#### *Швидкість прокатки*

Швидкість прокатки впливає на режими обтискань через коефіцієнт тертя, опір деформації, температуру штаби і потужність прокатки. Із збільшенням швидкості прокатки коефіцієнт тертя зменшується а опір деформації, температура штаби і потужність прокатки зростають. Проте із зростанням швидкості прокатки найістотніше змінюються температура штаби і потужність прокатки. Ці два параметри часто стають технологічними обмеженнями при розробці і реалізації режимів обтискань на безперервних станах.

#### *Механічні властивості матеріалу штаби*

Прочностні властивості матеріалу штаби визначають опір деформації і через нього впливають на рівень енергосилових параметрів. Пластичні властивості матеріалу штаби визначають граничні величини сумарного і приватних відносних обтискань. Облік впливу механічних властивостей

матеріалу штаби при розробці режимів обтискань на будь-якому стані зводиться до знаходження найбільш відповідних величин сумарного і приватних відносних обтискань. При прокатці штаб з матеріалів, що інтенсивно зміцнюються, з високою початковою межею текучості і з невисокою пластичністю вживані на практиці величини сумарного і приватних відносних обтискань значно нижче, ніж при плющенні штаб з пластичних матеріалів, що слабо зміцнюються, з низькою початковою межею текучості.

При розробці технології і дослідженні процесів листового прокатування необхідно враховувати зміцнення листа, обумовлене пластичною деформацією. Пластичність низьколегованих сталей нижче ніж у вуглецевих, цим викликано зменшення сумарного обтискання [16].

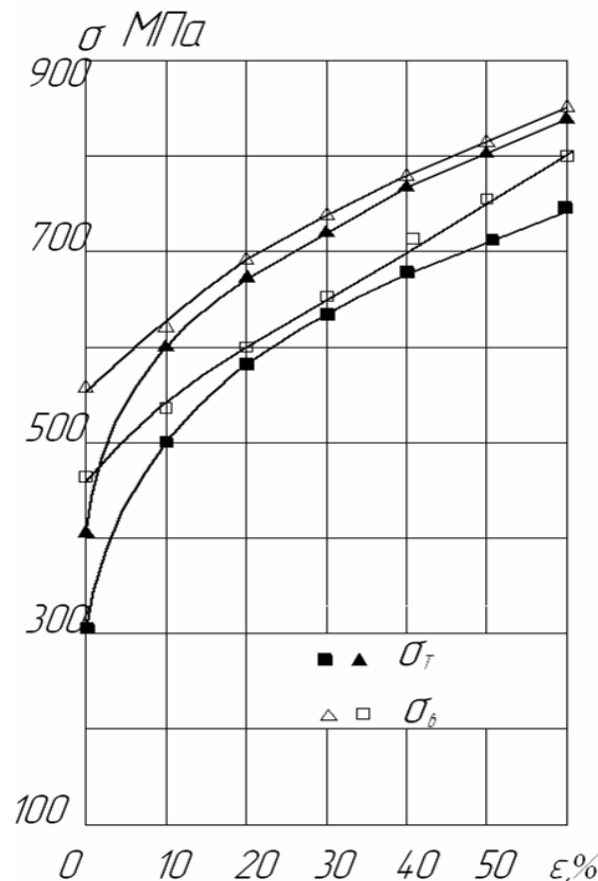


Рисунок 1.6 - Залежність прочностних характеристик сталей від ступеня деформації

При виконанні інженерних розрахунків при зміні деформації



використовуються як криві зміцнення, так і значення межі текучості  $\sigma_T$  і тимчасової межі опору  $\sigma_B$ . Для опису зростання показників міцності зручно використовувати статичну залежність вигляду:

$$\sigma = \sigma_0 + A\varepsilon^n, \quad (1.5)$$

$\sigma$  – поточне значення межі  $\sigma_T$  або  $\sigma_B$ ;

$\sigma_0$  – початкове значення межі  $\sigma_T$  або  $\sigma_B$ ;

$A, n$  – постійні коефіцієнти.

для низьколегованої сталі 08ГСЮФ завтовшки 1,0 мм

$$\sigma_T = 405 + 67,6\varepsilon^{0,462} \text{ МПа};$$

$$\sigma_B = 553 + 20,8\varepsilon^{0,668} \text{ МПа}.$$

для низьколегованої сталі 08ГСЮТ завтовшки 1,0 мм:

$$\sigma_T = 300 + 74,8\varepsilon^{0,435} \text{ МПа};$$

$$\sigma_B = 455 + 11,1\varepsilon^{0,845} \text{ МПа}.$$

### *Пружні деформації валків і штаби*

В умовах холодного прокатування суттєвий вплив на параметри процесу, а отже, і на режими обтискань, надають пружні деформації валків і штаби. Пружні деформації валків і штаби викликають збільшення довжини дуги контакту, нормальних контактних напруг і сили прокатування. Це приводить до збільшення витрати енергії, погіршення температурних умов холодного прокатування і зниження ефективності процесу. Із зменшенням товщини штаби вплив пружних деформацій валків і штаби на параметри процесу зростає, що зовні виявляється в зниженні обжимної здібності кліті. У граничному випадку, коли величина пружного радіального стиснення

робочих валків стане рівній початковій товщині штаби за вирахуванням її пружного відновлення, пластична деформація практично припиняється, і процес прокатування стає неможливим. Це явище відоме в літературі як невикативаємість штаби.

#### *Умови роботи систем регулювання*

Для забезпечення високої ефективності роботи систем автоматичного регулювання товщини (САРТ), натягнень (САРН), профілю і форми штаби (САРПФ) на безперервних станах холодного прокатування необхідно застосовувати приватні відносні обтискання в кожній кліті не менше 0,05...0,10 . Першу кліть використовують для регулювання подовжньої різнотовщинності із застосуванням САРТ, тому вона повинна мати резервну потужність для забезпечення необхідного діапазону регулювання. Остання кліть використовується для тонкого регулювання товщини за допомогою зміни натягнення. З цієї причини вона також повинна мати запас потужності.

### **1.3 Технологічні обмеження**

При розробці режимів обтискань на безперервних станах холодної прокатування, як втім і на будь-яких інших станах, повинні бути враховані технологічні обмеження. Облік технологічних обмежень при розробці режимів обтискань дозволяє по суті сформулювати умови, забезпечуючі ефективну роботу технологічного устаткування і отримання продукції з необхідними показниками якості. Умови, що гарантують найбільшу ефективність роботи технологічного устаткування, найкращі показники якості продукції або найменші витрати можуть бути сформульовані тільки в результаті оптимізації тих, що розробляються режимів обтиску по відповідних критеріях.

Таким чином, облік технологічних обмежень є необхідною умовою при розробці режимів обтискань на безперервних станах холодного прокатування. Облік технологічних обмежень і задоволення вибраним

критеріям оптимізації може розглядатися як необхідна і достатня умова при створенні найкращих (оптимальних) режимів обтискань. Критерії оптимізації залежно від конкретних умов холодного прокатування і конкретних вимог, що пред'являються до якості продукції, можуть бути вельми різноманітними і формулюватися по-різному. Задоволення критерію (або критеріям) оптимізації дозволяє знайти той найкращий режим обтискань, для реалізації якого необхідні цілком певні (найменші) витрати. У зв'язку з цим, на наш погляд, мінімізація витрат при виконанні всіх обмежень може служити найбільш універсальним критерієм оптимізації. При цьому, використовувані в даний час критерії оптимізації по "продуктивності", "точності", "температурі" і т.д. повинні розглядатися як обмеження. Зупинимось докладніше на технологічних обмеженнях, використовуваних при розробці режимів обтискань на безперервних станах холодного прокатування. Як найповніші це питання досліджений Л.А.Кузнецовим. При розрахунку режимів обтискань автор використовував наступні обмеження: по максимальній силі прокатування; по максимальному моменту прокатування; по максимальній потужності прокатування; по максимальній швидкості прокатування; по питомих натягненнях з умови відсутності тієї, що пробуксувала в останній кліті; по питомих натягненнях з умов максимальної стійкості форми штаби за наявності дефектів–концентраторів напруг; по максимальній температурі в зоні контакту з умови стабільності мастила; по площинній штаби в межклетьових проміжках і на виході стану; по мінімальному обтисканню в останній кліті з умов ефективної роботи САРТ; по мікрогеометрії прокатувальної штаби; по питомих натягненнях при змотуванні штаби з умов запобігання дефектам "злипання" і "злам"; по умові постійності секундних об'ємів. Перераховані обмеження представлені у формалізованому вигляді, що полегшує їх застосування. Проте ці обмеження не відображають повністю весь спектр чинників, що обмежують параметри технології безперервного холодного прокатування.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧІ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Тензометричні датчики

Основним елементом автоматизації БСУ є вагові дозатори. Сучасна система зважування базується на тензодатчиках (або датчиках сили). Тензометричний датчик являє собою металеву конструкцію, у середині якої поміщені резистори з електричною схемою. Тензодатчик механічно пов'язаний з корпусом ваг (вагового дозатора). При зміні ваги дозатора, корпус тензодатчика зазнає деформації, яка передається на тензорезистори. Електричний сигнал з тензорезисторів передається на вимірник, у ролі якого, як правило, виступає ваговий термінал.

Сучасні досягнення в конструкціях тензометричних датчиків, використані вкупі зі стандартної перевіреної тензорезисторної технологією, дозволяють створювати компактні й точні датчики з різних матеріалів із широкою сферою застосування й можуть бути використані в різних типах вагових систем і пристроїв, забезпечуючи високу ефективність, точність і економічність розв'язків.

#### *Принцип роботи тензодатчика*

Робота тензодатчика заснована на простих принципах механіки. Якщо на механічну конструкцію діють зовнішні сили, вона змінює свою форму таким чином, щоб протистояти впливу цих сил. Такі зміни можуть бути значними і явними, як у випадку вигину вудки при витаскуванні пійманої риби або можуть бути мікроскопічними, наприклад – прогин великого моста при проїзді по ньому автомобіля. Якщо в даній металевій конструкції зробити невеликий отвір, воно буде деформуватися в еліпс при деформації самої конструкції, прямо пропорційно прикладеній до конструкції

силі. Якщо в цей отвір вклеїти плівковий тензорезистор, можна з великою точністю виміряти цю деформацію або навантаження. Таким чином, тензорезистор ефективно перетворює всю конструкцію в датчик для виміру сили, навантаження або положення.

### *Точність тензовимірів*

Максимальне навантаження на тензодатчик залежить від конструкції: існуючі системи мають межі зважування від декількох грам до сотень тисяч тонн. При цьому забезпечується мінімальна чутливість до коливань температури за рахунок схемотехнічних розв'язків. У сучасних тензодатчиках використовується подвійний міст (міст Кельвіна), що дозволяє знизити помилки нелінійності, повторюваності й гістерезису. Певний ступінь старанності повинна бути забезпечена при виборі місця установки й у процесі самій установці датчиків у конструкцію (пристрій). Необхідно враховувати, що на точність отриманої системи впливають кількість датчиків, навантаження на кожний датчик, матеріал самої конструкції. Відзначимо, що мінімального рівня помилок можна досягти тільки при правильній інсталяції датчиків у конструкцію.

### *Термін служби тензодатчиків*

Тензодатчики для виробництв бетону виготовляються з нержавіючої сталі й повністю герметичні (IP68), що забезпечує їхню тривалу експлуатацію практично в будь-яких зовнішніх умовах, включаючи високу температуру, пряме влучення води, сніг, туман, високу вологість і прямі сонячні промені. Діапазон робочих температур – від  $-40^{\circ}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ , з мінімальними температурними змінами характеристик. Використовуючи відповідний вторинний прилад, тензоизмеритель, за допомогою тензодатчиків можна вимірювати вагу, деформацію, обсяг і інші фізичні параметри.

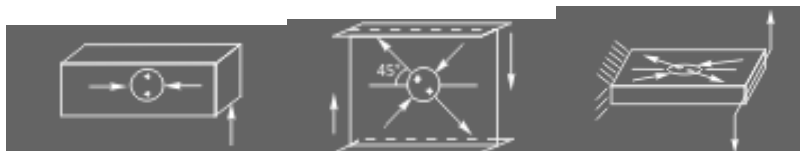
### Типові методи тензовимірів

(Стрілками показані лінії прикладеної сили й напрямку деформації)



**Розтягання    Стиск**

**Вигин, розтягання**



**Вигин, стиск**

**Деформація**

**Крутіння**

Рисунок 2.1 - Методи тензовимірів

### Розрахунки вихідного сигналу тензодатчика

На рівень вихідного сигналу датчика, встановленого в конструкцію впливає безліч факторів. Для одержання надійної оцінки рівня вихідного сигналу необхідно виконати прості обчислення на базі зміни максимального навантаження усередині конструкції й в області поперечного перерізу елемента або балки, у якій встановлений тензодатчик.

### Мінімальний вихідний сигнал

Необхідно переконатися, що датчик сприймає достатні навантаження у всім робочому діапазоні для забезпечення достатнього й застосовного рівня сигналу. Практичне правило: тензодатчик повинен зазнати змінам навантаження на одиницю площі поперечного переріза не менш  $15\text{Н/мм}^2$  для сталі ( $5\text{Н/мм}^2$  для алюмінію).

### *Максимальний вихідний сигнал*

Як правило, що несуть конструкції діючих об'єктів у нормальних робочих умовах не можуть піддати, що вбудовується датчик надмірним навантаженням, які приведуть до його ушкодження. При вбудовуванні датчика в металеві елементи конструкції необхідно, щоб зміна навантаження на одиницю площі поперечного переріза не перевищувало 75Н/мм<sup>2</sup> для сталі (25Н/мм<sup>2</sup> для алюмінію).

### ***Тензометричні датчики підрозділяються:***

- ✓ по типах (балкові, S-Образні, таблеткові, здвоєна балка й т.п.);
- ✓ по максимальному навантаженню ( від декількох грам до десятків і сотень тонн);
- ✓ по чутливості (1..2..3 mV вихідного сигналу на 1 V живлячого напруги);
- ✓ по класу точності (кількість перевірочних інтервалів) і т.д.

### ***Класифікація тензодатчиків по області застосування:***

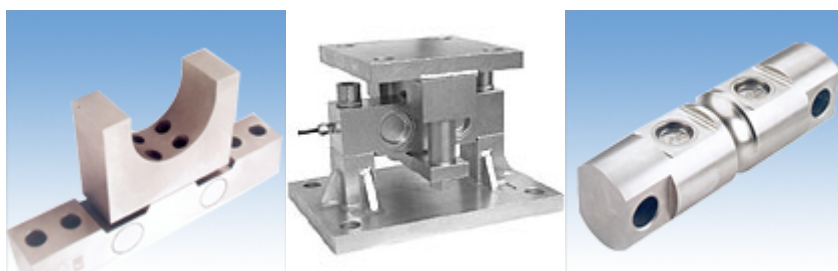
- тензодатчики для С/Х устаткування;
- тензодатчики для прокатних станів;
- тензодатчики для штампувальних пресів;
- тензодатчики для автонавантажувачів;
- тензодатчики для контролю спрацювання устаткування;
- тензодатчики для охоронних систем;
- тензодатчики для виміру навантажень у конструкціях;
- тензодатчики для виміру моментів;
- тензодатчики для зважування ємностей;
- тензодатчики для монорейкових вагових систем.



Балочні тензодатчики



Тензодатчики типу "МОСТ"



Тензодатчики розтягнення-зжаття

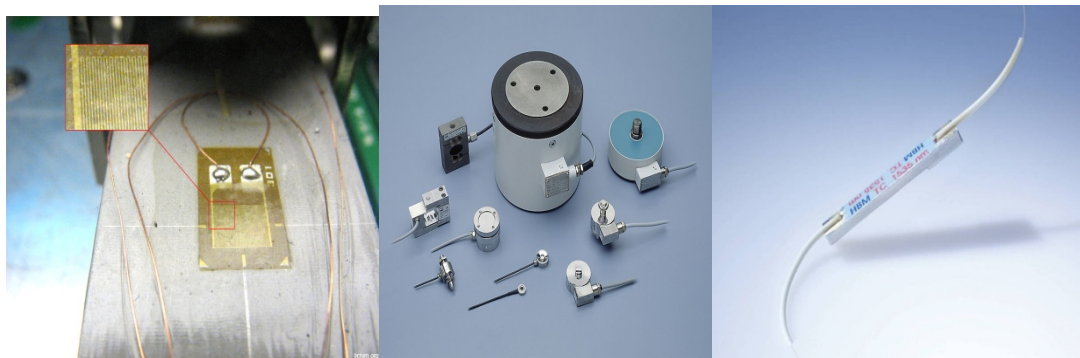
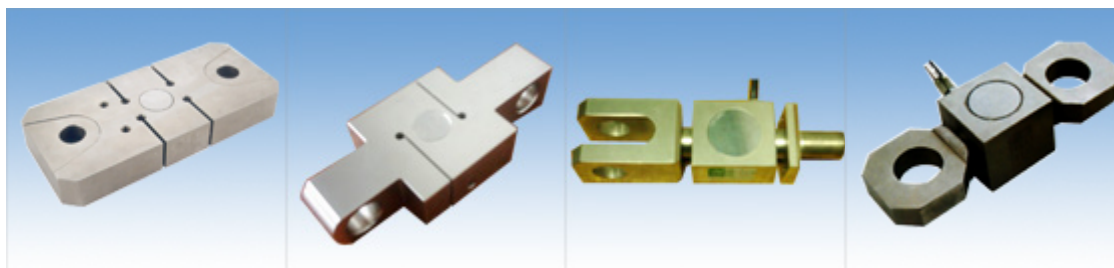


Рисунок 2.2 - Типи тензодатчиків



## 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 260×260 (рис. 2.3., 2.4) головна лінія робочої кліти 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 кліти 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 **9Х** 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).

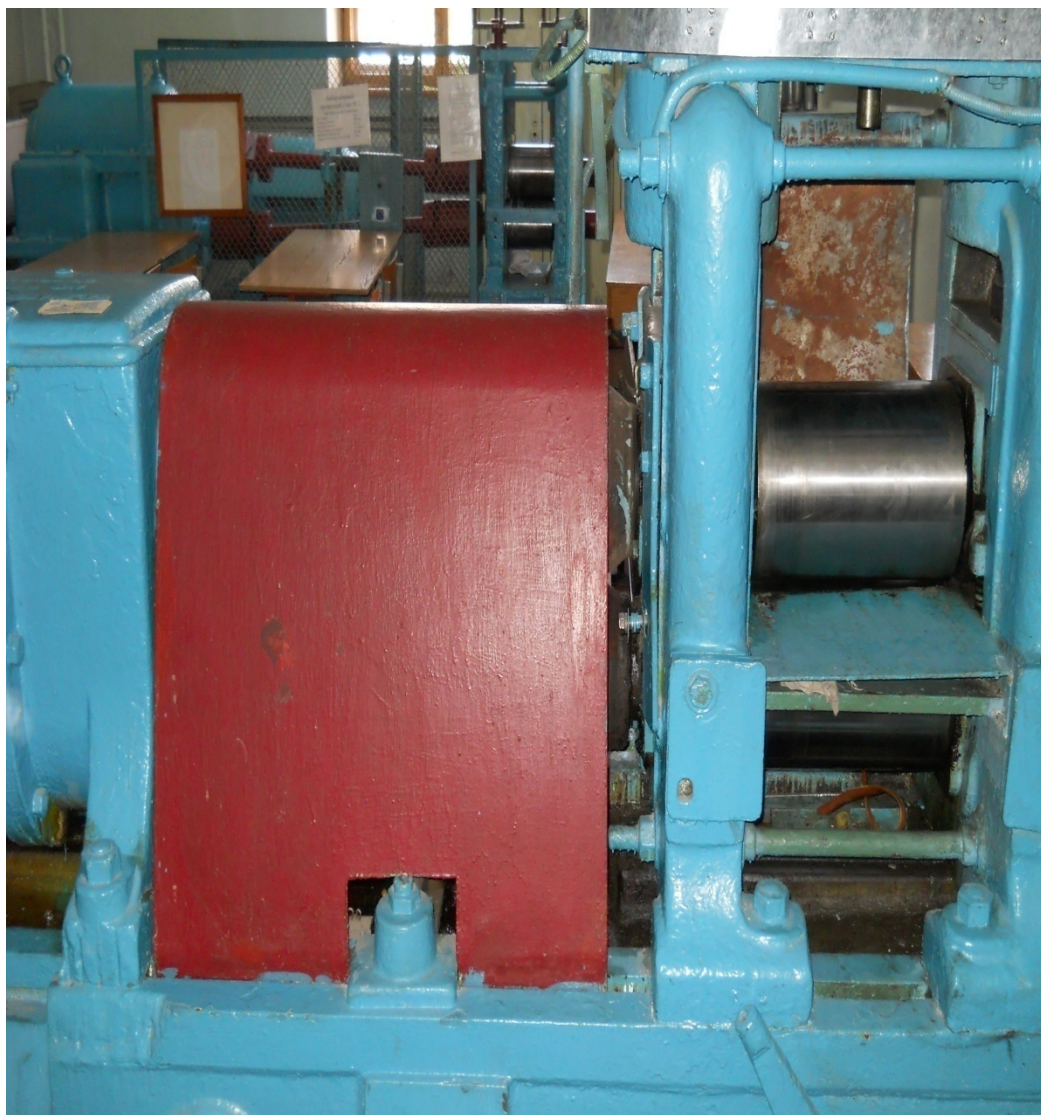


Рисунок 2.3 - Загальний вид устаткування лабораторного прокатного міні-стану 260



Рисунок 2.4 - Загальний вид робочої кліті лабораторного прокатного міні-стану 260

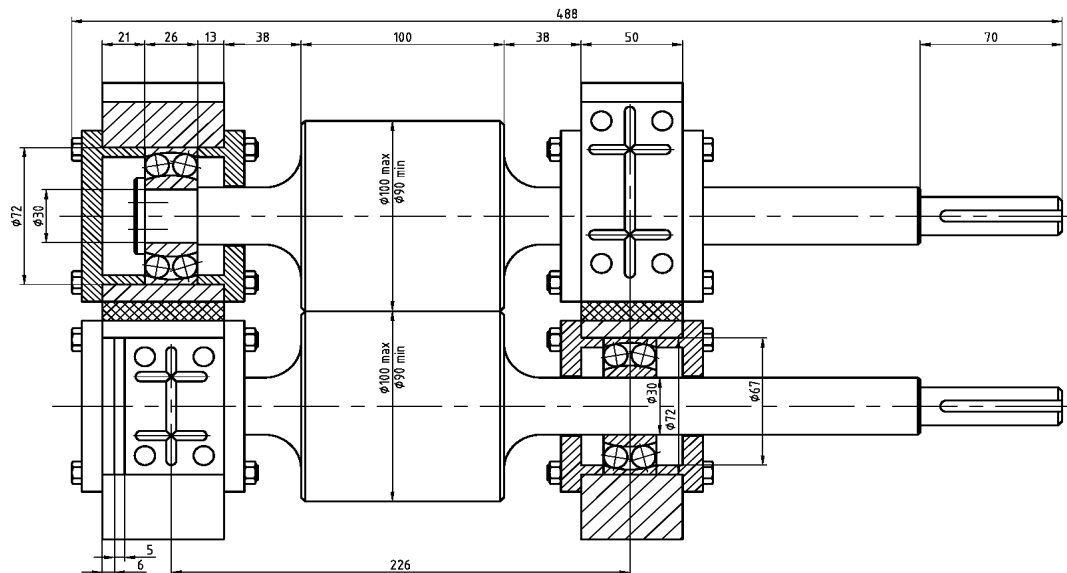


Рисунок 2.5 - Конструкція вузла робочих валків лабораторного прокатного міні-стану 260

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 **3,0мм** 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** (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 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 *тензомерами*. 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 непрямим 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:

$$P_c = \frac{P_y}{2} = \frac{\Delta l/l}{EF}, \quad (2.1)$$

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 легованої сталі  $E = 2.0 \times 10^5$  МПа).

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

$$P = 4EF \frac{\Delta l}{l}. \quad (2.2)$$

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

$$P = P_{cp} F_k, \quad (2.3)$$

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

$$P_{cp} = 1.15 \sigma_{Tcp} \left[ 1 + 0.48 f_n \frac{l}{h_{cp}} \right], \quad (2.4)$$

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

$f_n$  - показник тертя, який дорівнює:

$$f_n = 1.6f - 0.018 \quad (2.5)$$

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

За цієї умови  $f_n = 0.11$  і формули (2.4) буде мати вигляд:

$$P_{cp} = 1.15\sigma_{T_{cp}} \left[ 1 + 0.05 \frac{l}{h_{cp}} \right]. \quad (2.6)$$

Із формул (2.3), (2.4), (2.5) і (2.6) очевидно, що контактний тиск і сила прокатки залежать від границі плинності, умов тертя і параметру  $\frac{l}{h_{cp}}$ , при збільшенні яких, сила прокатки зростає. Взагалі усі фактори прокатки, збільшуючи опір повздовжньому і поперечному плину металу в осередку деформації, призводять до зростання сили прокатування.

Середню границю плинності  $\sigma_{T_{cp}}$ , визначають за формулою:

$$\sigma_{T_{cp}} = (\sigma_{T0} + \sigma_{T1})/2, \quad (2.7)$$

де  $\sigma_{T0}$  – границя плинності металу до проходу;

$\sigma_{T1}$  - границя плинності металу після проходу.

Для алюмінію марки А1  $\sigma_{T0} = 58 \text{ Н/мм}^2$ . За формулою О.В. Третьякова після прокатки:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + 0.64\varepsilon_{\Sigma}^{0.62}, \quad (2.8)$$

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

Середній тиск по експерименту із (2.3):

$$P_{cp} = P/F_k$$

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 (рис.2.6) виконують, користуючись градувальними лініями місдоз (рис. 2.7). Дані замірів, розмірів і розшифровок заносять до таблиці 1. Далі, розрахувавши необхідні параметри прокатки  $\Delta h$ ,  $\xi$ ,  $\varepsilon_{\Sigma}$ ,  $l/h_{\text{ср}}$ ,  $\sigma_{T1}$  визначають  $P_{\text{ср}}$  по (2.6) і по  $P$  (2.3).

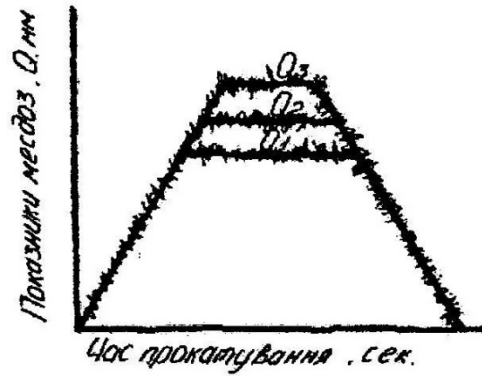


Рисунок 2.6 - Осциллограмма силы прокатывання

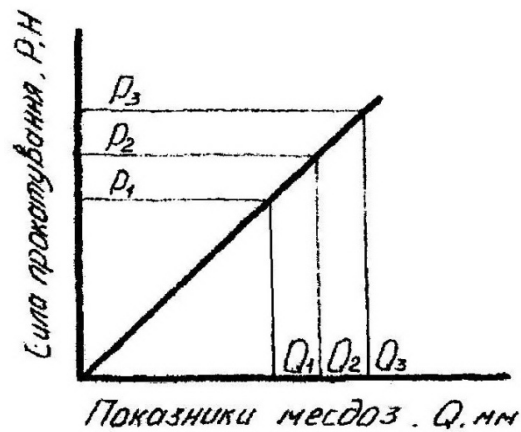


Рисунок 2.7 - Градувальна лінія місдоз

## 3 ОБРОБКА І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Оптимізація опору деформації при гарячій прокатці вуглецевих сталей

Проблема моделювання реологічних властивостей ставиться до найбільш важливих і складних завдань теорії обробки металів тиском, тому вивченню закономірностей опору деформації завжди приділялася пильна увага. Це відбите у великій кількості робіт (див. наприклад [1-10]). Характерним для сучасного вигляду моделей опору деформації ( $\sigma$ ) є розширення набору факторів, що виявляють вплив на цей параметр. Так, до традиційно застосовуваного набору, у який входять хімічний склад сталі, ступінь, швидкість і температура деформації, за останні 10-15 років додалася структура деформованого матеріалу у вигляді середнього діаметра зерна або щільності дислокацій субструктури на початку циклу деформації.

Серед класичних можна виділити ряд робіт спрямованих на визначення середнього значення  $\sigma_s$  у циклі деформації, найбільше часто використовуваних при інженерних розрахунках навантажень на устаткування при гарячій прокатці.

Математична модель, запропонована В.І. Зюзіним [1], відома як метод термомеханічних коефіцієнтів, дозволяє визначити середнє значення опору деформації при базових значеннях термомеханічних параметрів у динамічних випробуваннях, а потім, за допомогою термомеханічних коефіцієнтів результати поширити на всю досліджувану область динамічних випробувань. Значення коефіцієнтів отримані статистичною обробкою результатів випробувань різних марок сталей. Основними недоліками моделі є неможливість моделювання процесів розміцнення, вузьке коло описаних

формально марок сталей, обмеження в діапазонах по швидкості деформації  $J = 0,1 \div 100 \text{ с}^{-1}$  і ступеня деформації  $\varepsilon \gg 0,05 \div 0,3$ .

Аналогічної описаної вище є математична модель запропонована Л.В.Андреюком і ін. [2]. Її відмінною рисою є моделювання середнього опору деформації з урахуванням впливу хімічного складу сталі. Це дозволило використовувати отриману модель у комп'ютерних алгоритмах розрахунків навантажень. Незважаючи на те, що автори [2] розширили розрахунковий діапазон по швидкості до  $J = 150 \text{ с}^{-1}$ , діапазон по ступеню деформації не змінився. Вузкий діапазон ступенів деформації приводить до того, що розрахунки навантажень по запропонованих моделях [1, 2] адекватний лише для перших проходів прокатки, де деформація не перевищує критичної для початку динамічної рекристалізації. Експериментальна перевірка розрахункової величини опору деформації, виконана в роботі [3], по формулі Л.В. Андреюка при деформації  $\varepsilon = 0,7$  показала, що відхилення розрахункових даних від досвідчених може становити більш 50%.

Я.С. Шварцбарт і ін. запропонували феноменологіческие моделі повної кривої плинності, описані в роботах [3,4], у яких виходячи з вистави про двухстадійности процесу деформації (миттєве зміцнення за лінійним законом і одночасне разупрочнение в часі)  $\sigma_s$  визначають по рівняннях, що включають від 3 до 11 параметрів, залежно від здатності функції описувати різні криві деформаційного зміцнення. Параметри наведені в табличному виді для ряду марок сталі, швидкостей деформацій і температур, що при використанні моделі приводить до необхідності інтерполяції, ускладнює процес і знижує вірогідність розрахунків.

Математична модель, наведена в роботах [5-7] дозволяє моделювати повну криву плинності углеродистых сталей і враховує вплив на опір деформації сталі змісту елементів С, Мп, Si, Мо, Ti, V, Nb. Діапазон хімічних складів охоплений цієї моделлю вже чому реальний діапазон, відповідний до класу углеродистых сталей у прокатнім виробництві. Крім того, у ряді випадків у

сталях утримується фосфор і сіра, які, незважаючи на малий їхній вміст, впливають на величину опору деформації.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі для розрахунків миттєвих значень опору деформації в широкому діапазоні хімічного складу сталей, що охоплює практично весь сортамент углеродистих сталей при умовах, характерних для їхньої гарячої прокатки.

Для цього використовували вибірку, що включає 27 марок сталі, хімічний склад і експериментальні криві, плинні яких наведені в [5-8]. Хімічний склад сталей, що участвовавших в обробці перебуває в наступному діапазоні: C(0,05÷1,1); Si(0÷1,65); Mn(0,03÷1,55); Cr(0÷0,3); Ni(0÷0,3); P(0÷0,05); S(0÷0,5); V(0÷0,26); Cu(0÷0,28), відповідному до всього сортаменту углеродистих сталей.

Для загального виду кривій плинні сталей, наведеної на рис.3.1 характерний ріст  $\sigma_s$  від границі текучості  $\sigma_0$  до деякого пікового значення  $\sigma_p$  відповідного до пікової деформації  $\sigma_p$ , після чого  $\sigma_s$  плавно убуває до значення відповідного до установившемся напруги  $\sigma_u$ , при яким настає рівновага процесів зміцнення й динамічної рекристалізації. Слід зазначити, що на ділянці відповідному до напруг від  $\sigma_0$  до  $\sigma_p$  швидкість зміцнення металу убуває внаслідок превалювання процесу динамічного повернення над зміцненням. Динамічна рекристалізація починається при досягненні деформації  $\epsilon_x$ . Характер кривої плинні також відбиває зміна аустенітного зерна. На ділянці зміцнення до досягнення деформації значення  $\epsilon_p$  відбувається здрібнювання зерен, збільшується щільність дислокацій субструктури, після чого інтенсивно розвивається процес динамічної рекристалізації й згідно з роботою [5] розмір зерна аустеніту при нарузі, що встановилася, залежить винятково від  $\sigma_u$ .

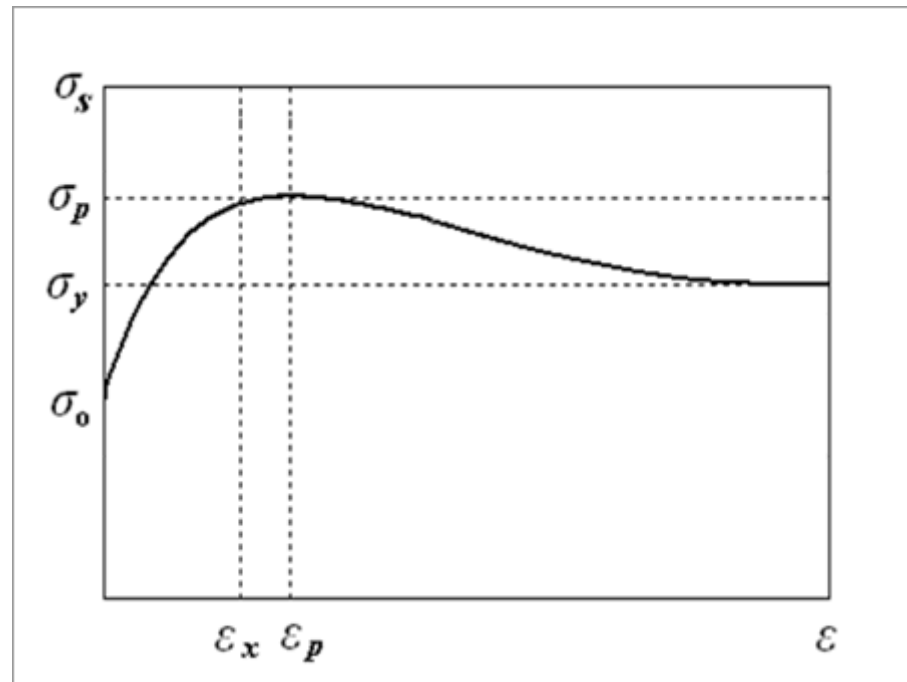


Рисунок 3.1 - Загальний вид кривої плину сталі при наявності динамічної рекристалізації

Виходячи з передумов, зроблених в [3, 4], з використанням принципу суперпозиції процесів зміцнення й разупрочнення, у роботі [9] отримане вираження для миттєвого опору деформації:

$$\sigma_s = \sigma_y + (\sigma_0 - \sigma_y + D \cdot \varepsilon) \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_x}\right), \quad (3.1)$$

де  $D$  — параметр, що характеризує швидкість зміцнення металу.

Параметри  $\sigma_0$  і  $D$  важко визначити при обробці експериментальних даних, тому що крива плину в первісний момент сильно залежить від структури металу. З іншого боку, що існують пластометри, не дозволяють зафіксувати початкову стадію плину металу. Аналіз експериментальних кривих плини показує, що більш вираженими на кривій є максимальний опір деформації  $\sigma_p$  і логарифмічна деформація  $\varepsilon_p$  максимуму деформаційного зміцнення відповідно. Тому вираження (1) перетворили, виключивши з нього

важко ідентифіцируемые параметри. Остаточно одержали наступне вираження для  $\sigma_s$ :

$$\sigma_s = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp\left( \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right). \quad (3.2)$$

Для розрахунків опору деформації по запропонованій моделі необхідно визначити термо-кінетичні залежності параметрів  $\sigma_y$ ,  $\sigma_p$ ,  $\varepsilon_p$  і  $\varepsilon_x$  з урахуванням хімічного состава стали.

Згідно виводів роботи [5] вплив змісту хімічних елементів на  $\sigma_s$  досить добре відбивається величиною енергії активації деформації  $Q$ , що характеризує природу матеріалу й достатньо чутливої до невеликих змін хімічного складу. Крім того, енергія активації входить у параметр Zener-Hollomon ( $Z$ ), що є комплексним температурно-швидкісним параметром процесу деформації:

$$Z = J \exp [ Q / R \cdot T ], \quad (3.3)$$

де  $R = 8,318$  Дж · моль<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> — газова постійна;  $T$  — абсолютна температура.

Враховуючи вид зв'язку між  $\sigma_s$  і температурно-швидкісним параметром  $Z$ , запропонованим у роботі [10] для процесу гарячої деформації, одержуємо:

$$Z = A \cdot \sinh(a \cdot \sigma_p)^n, \quad (3.4)$$

де  $A$  — швидкісна константа деформованого матеріалу;  $a$ ,  $n$  — константи математичного узгодження.

Константи  $a$  і  $n$  визначені за методикою, описаної в роботі [5]. Для певної марки стали при постійній температурі випробувань із (3.3, 3.4) впливає

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{p1})^n}{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{p2})^n} \quad (3.5)$$

Виходячи із цього вираження для нев'язання ( $H$ ) правої й лівої частин рівняння (3.5) для  $i$  швидкісних умов випробувань і  $j$  досліджуваних марок сталей презентовано у вигляді:

$$H = \sum_{i,j} \left[ \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) - \frac{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{pi})^n}{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{po})^n} \right]^2 \quad (3.6)$$

Результати розрахунків у вигляді графіка залежності  $H$  від коефіцієнтів  $a$  і  $n$  представлені на рис.3.2.

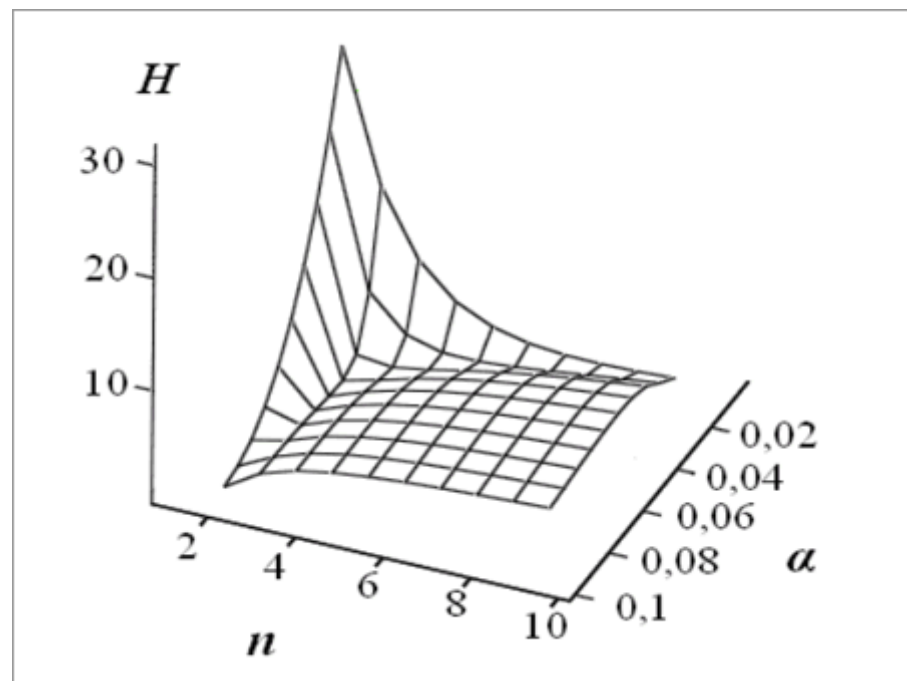


Рисунок 3.2 - Залежність  $H$  від коефіцієнтів  $a$  і  $n$

З рис. 3.2 видно, що не існує однієї єдиної пари коефіцієнтів, що забезпечує мінімум  $H$ , тому коефіцієнт  $n$  визначали, прийнявши у вираженні (3.6)  $a = 0,01187$ , тобто рівним отриманому в роботі [5]. Залежність  $H$  від коефіцієнта  $n$  у досліджуваній вибірці сталей представлена на рис.3.3.

З рис.3.3 видно, що залежність  $H$  від коефіцієнта  $n$  має єдиний мінімум, що забезпечує найкраще узгодження параметрів вхідних у рівняння (3.6) при  $n = 4,673$ . Для визначення  $Q$  і  $A$  перетворимо вираження (3.4) до виду:

$$\ln[\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)] = \frac{Q}{R \cdot n} \cdot \frac{1}{T} - \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (3.7)$$

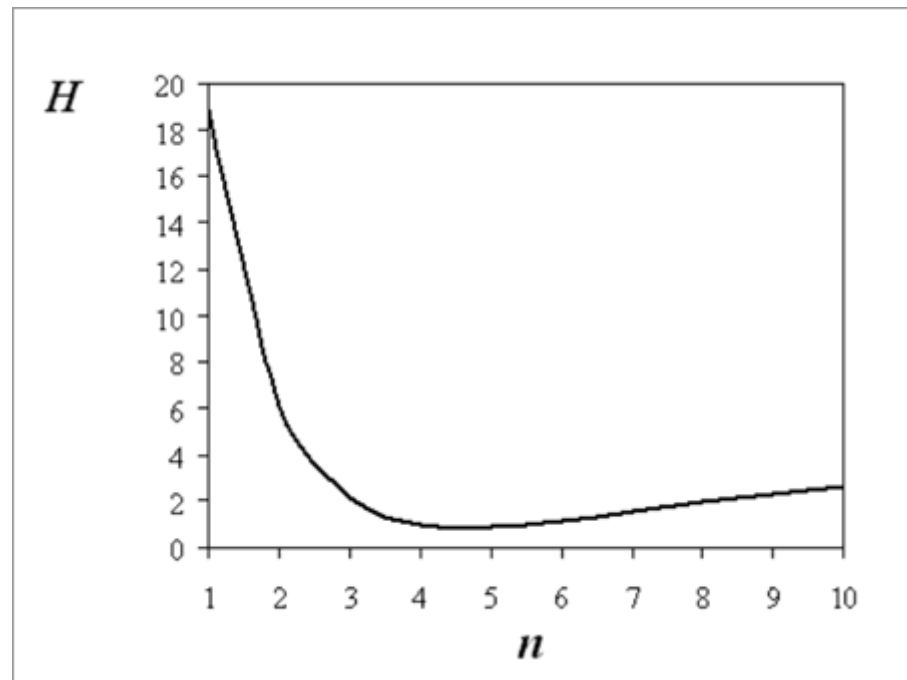


Рисунок 3.3 - Залежність  $H$  від коефіцієнта  $n$

Співвідношення (3.7) показує, що відображення залежності  $\sigma_s(T)$  у координатах  $\ln[\sinh(a \cdot \sigma_p)]$  і  $1/T$  дозволяє визначити ступінь адекватності рівняння (3.4) при описі досліджуваної вибірки сталей, а також знайти параметри цього рівняння. Дійсно, якщо параметри  $Q$  і  $A$  залежать лише від хімічного складу сталей й не залежать від температури й швидкості деформації, то з (3.4) випливають три твердження:



- при постійних значеннях швидкості деформації залежність  $\sigma_s(T)$  повинна спрямлятися в координатах  $\ln[\sinh(a \cdot \sigma_p)]$  і  $1/T$ ;
- прямі, побудовані для однієї сталі, при різних значеннях  $J$ , повинні бути паралельними один одному з кутом нахилу визначальним  $Q$ ;
- координата перетинання цих прямих з віссю ординат повинна лінійно залежати від  $\ln J$ .

При виконанні цих тверджень можна судити про адекватність рівняння (4) і по параметрах прямих визначити  $Q$  і  $A$  для всіх аналізованих сталей.

Зроблений нами аналіз експериментальних даних показав, що рівняння (4) адекватно описує досліджувану вибірку сталей. Так, наприклад, на рис.3.4 представлені експериментальні дані для сталі 08, які показують, що ця залежність — лінійна з коефіцієнтом кореляції порядку  $\gg 0,98$ . Нахил прямих практично не залежить від  $J$ . Для інших сталей отримані коефіцієнти кореляції такого ж порядку.

У результаті обробки експерименту отримане регресійне рівняння для енергії активації деформації  $Q$  вуглецевих сталей залежно від процентного вмісту хімічних елементів:

$$\begin{aligned}
 Q = & 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) + 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) + \\
 & + 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) + \\
 & + 181000 \cdot (V\%) - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%). \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

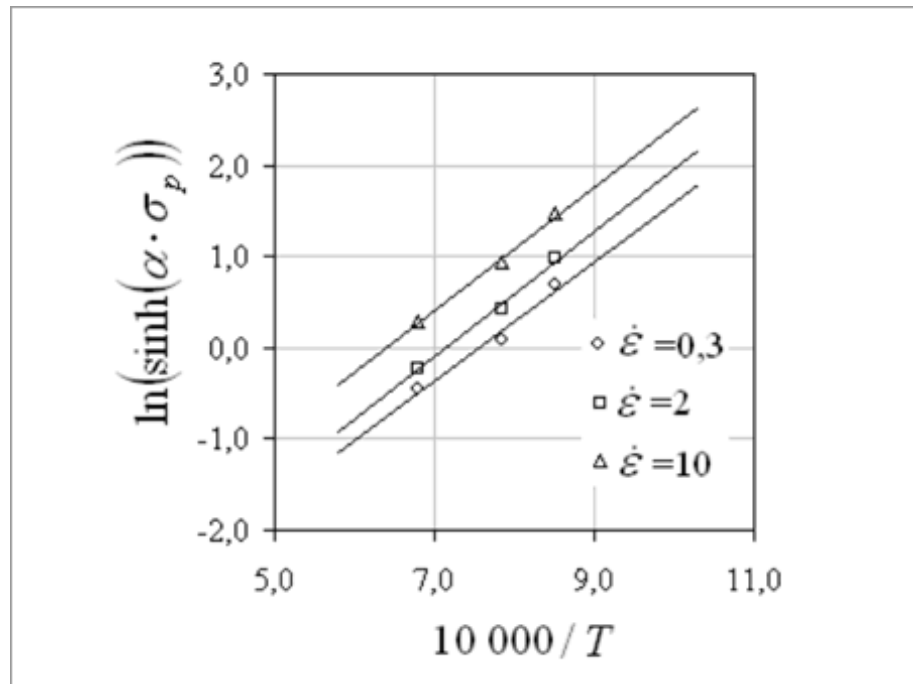


Рисунок 3.4 - Залежність  $\sigma_p(T)$  для сталі 08пс за даними роботи [9]

На рис.3.5. представлено порівняння величин  $Q_{\text{э}}$  отриманих по експериментальним кривим плинущу металу й  $Q$  розрахованої по рівнянню (3.8), з якого випливає, що запропонована залежність добре описує експериментальні дані, при цьому коефіцієнт кореляції рівний 0,994.

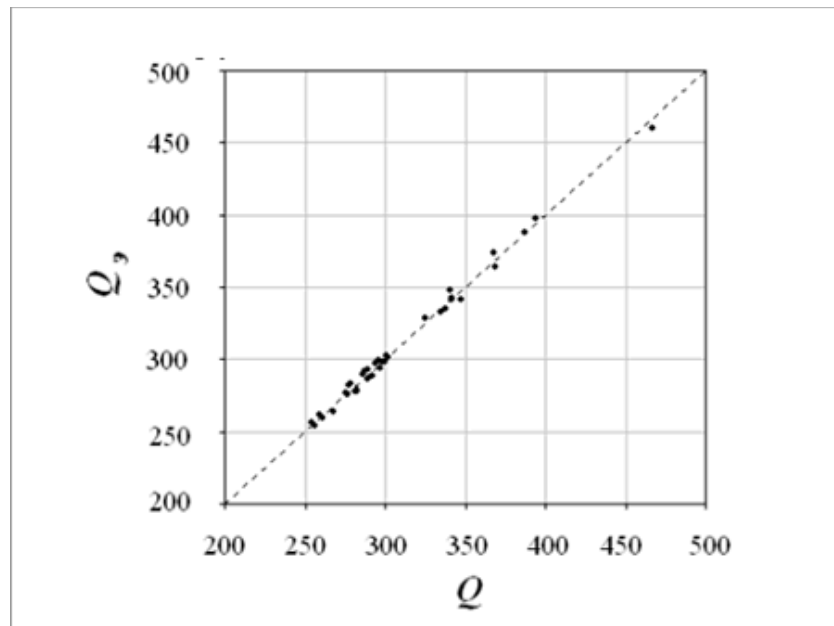


Рисунок 3.5 - Зіставлення експериментальної  $Q_{\text{э}}$  й розрахункової  $Q$  енергії активації ( $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ )

У роботі [5] параметр  $A$  описаний як функція від  $Q$ , а також вмісту  $C\%$  і  $Nb\%$ . Необхідність доповнення додаткового впливу цих елементів, очевидно, обумовлена неточним описом впливу цих елементів на  $Q$ . Порівняння значень  $A$  і  $Q$  показує, що ці величини досить тісно зв'язані простій експонентною залежністю (рис.3.6)%

$$A = 0,146 \cdot \exp(9,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q). \quad (3.8)$$

Порівняння розрахованих по запропонованій залежності значень коефіцієнтів  $A$  відповідає експериментальним даним з коефіцієнтом кореляції 0,964.

У якості експериментальних даних, використовуваних для одержання залежностей параметрів, що входять у деформаційну модель  $\sigma_s$  (2), використовували криві плинні, представлені в роботі [8], отримані на пластометре стиску.

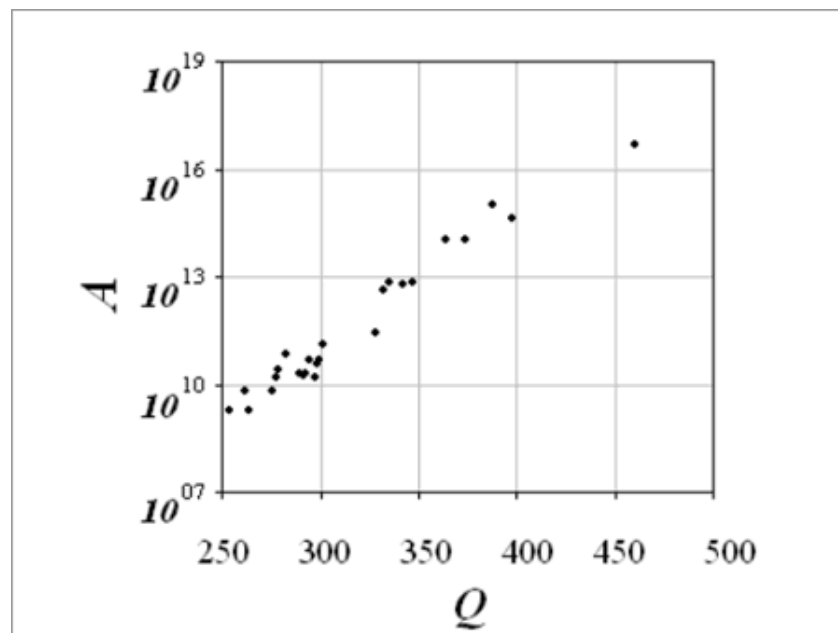


Рисунок 3.6 - Константи  $A$ ,  $s^{-1}$  с  $Q$ , (кДж·моль<sup>-1</sup>)

Згідно з рекомендаціями, наведеними в роботах [5-7], реакція сталі на умови деформації при гарячій прокатці щонайкраще відбивається безрозмірним параметром  $Z / A$ .

Особливий інтерес представляють деформаційні параметри  $\epsilon_p$  і  $\epsilon_x$ , тому що вони являють собою величини деформації, що характеризують момент початку динамічної рекристалізації й кінця динамічного повернення відповідно. Загальноприйнятий [5-7] вид залежності даних параметрів містить у собі як  $Z/A$ , так і розмір вихідного аустенітного зерна. Однак, внаслідок відсутності даних по розміру зерна в роботі [8], визначити вплив хімічного складу сталі й температури нагрівання на розмір вихідного зерна не представляється можливим. Тому дані деформаційні параметри оброблені також від співвідношення  $Z/A$ . Регресійний аналіз даних роботи [8] дозволив одержати наступні рівняння:

$$\sigma_p = 72,06 \cdot (Z/A)^{0,131},$$

$$\sigma_y = 51,66 \cdot (Z/A)^{0,149},$$

$$\epsilon_x = 0,193 \cdot (Z/A)^{0,112},$$

$$\epsilon_p = 0,268 \cdot (Z/A)^{0,107}.$$

Для ілюстрації вірогідності запропонованої моделі на рис. 3.7-3.10 наведені й розрахункові криві плинності металу, і експериментальні значення (крапки)  $\sigma_s$  при певних значеннях  $\sigma$ .

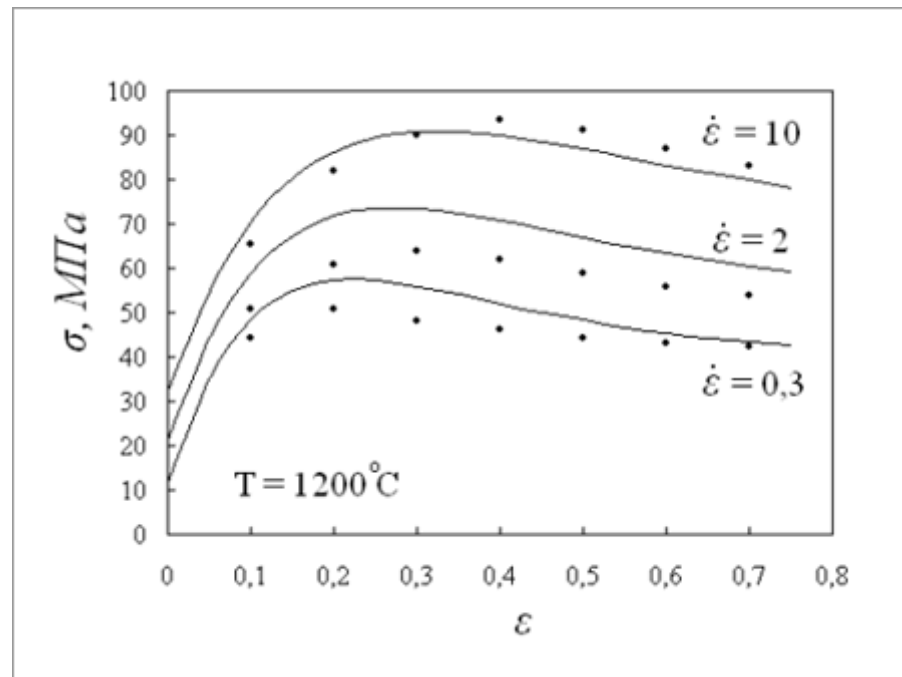


Рисунок 3.7 - Криві плинності сталі 08, [8] (0,087% С; 0,003% Si; 0,34% Mn; 0,025% P; 0,02% S;  $Q=261635 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ )

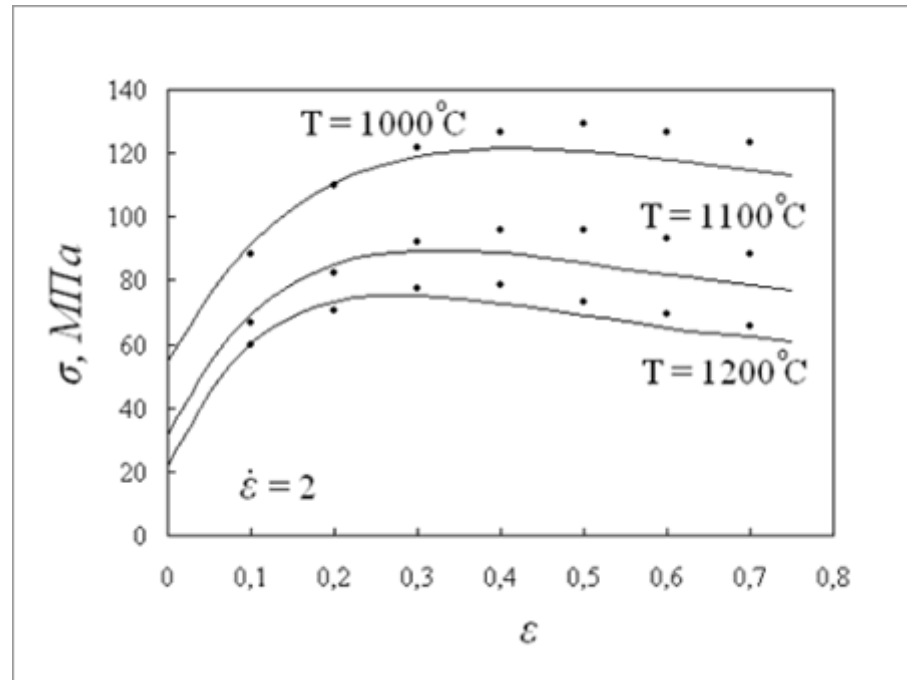


Рисунок 3.8 - Криві плинності сталі 15, [8] (0,15% C; 0,27% Si; 0,48% Mn; 0,014% P; 0,03% S; 0,27% Cu; 0,1% Ni; 0,7% Cr;  $Q=275500$  кДж·моль<sup>-1</sup>)

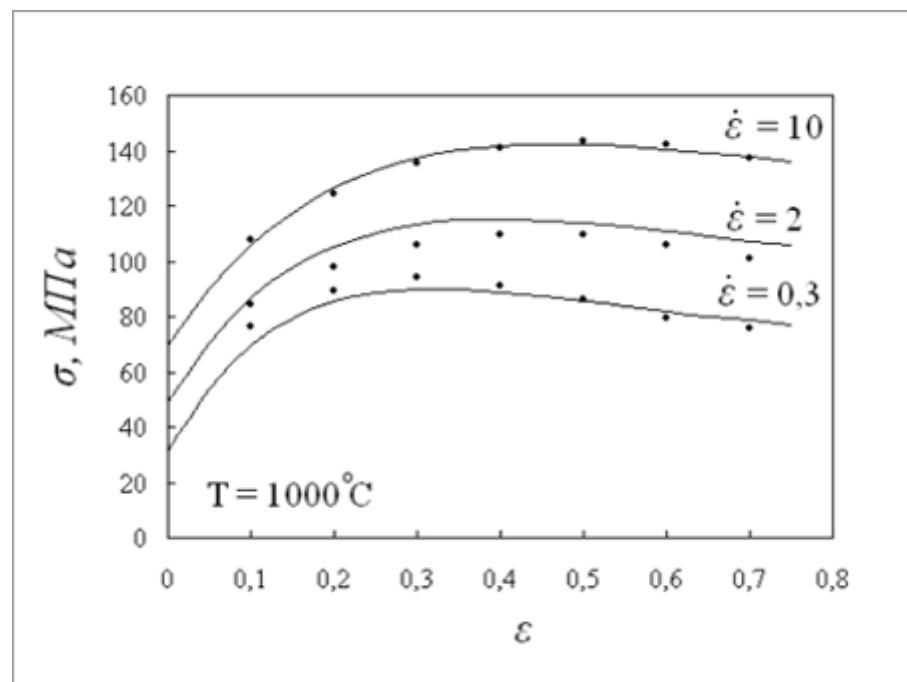


Рисунок 3.9 - Криві плинності сталі 45, [8] (0,43% C; 0,26% Si; 0,74% Mn; 0,022% P; 0,016% S;  $Q=278151$  кДж·моль<sup>-1</sup>)

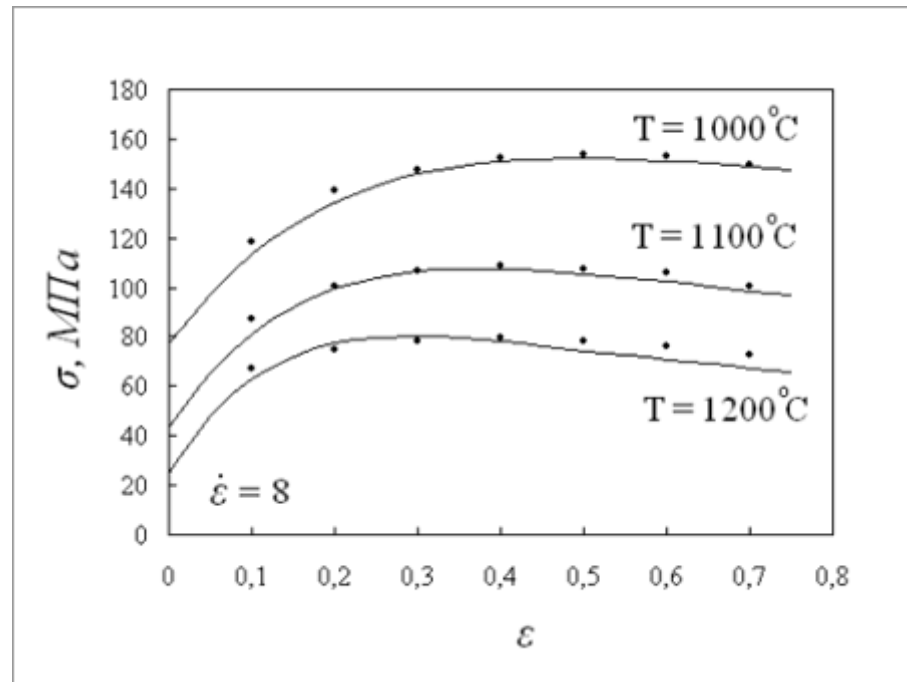


Рисунок 3.10 - Криві плинності сталі 100, [8] (1,00% C; 0,19% Si; 0,17% Mn; 0,023% P; 0,027% S; 0,09% Ni; 0,1% Cr;  $Q=341669 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ )

Представлені на рис.3.7-3.10 результати підтверджують досить високу точність розрахунків опору деформації по запропонованій математичній моделі. Середньоквадратична погрішність розрахунків становить  $\gg 6,1\%$ .

### 3.2 Оптимізація температури кінця прокатки

**Дослід № 1.** За допомогою методу повного факторного експерименту дослідити вплив на температуру кінця прокатки наступних факторів (матеріал – ст 08 пс) :

$X_1$ - температура прокатки на слябінгу,  $T, ^\circ\text{C}$  ;

$X_2$ - температура перед чорною кліттю,  $T, ^\circ\text{C}$ ;

$X_3$ - температура перед чистою кліттю,  $T, ^\circ\text{C}$ ;

Таблиця 3.1.1 - Досліджувані фактори

Характеристика	Фактори		
	Температура прокатки на слябінгу (Т, °С)	Температура перед чорною кліттю (Т, °С)	Температура перед чистою кліттю (Т, °С)
Код	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Основний рівень	1150	1100	950
Інтервал варіації	50	50	50
Верхній рівень (закодоване значення +1)	1200	1150	1000
Нижній рівень (закодоване значення -1)	1100	1050	900

*Складання плану експерименту*

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

Таблиця 3.1.2 - Матриця повного факторного експерименту 2<sup>3</sup>

План	Номер досліду	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>
2 <sup>2</sup>	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	-1
	3	1	1	-1	1
	4	1	1	-1	-1
2 <sup>3</sup>	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<sub>0</sub>» - так називаємо фіктивну зміну – вводимо для розрахунку вільного члена шуканої моделі – коефіцієнта – «b<sub>0</sub>».

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 3.1.3.

Таблиця 3.1.3 - Розрахункова таблиця дисперсії досліду

Дослід	$Y_{0i}$	$ Y_{0i}-Y_0 $	$\Delta Y_{0i}^2$
9	720	5	25
10	725	0	0
11	730	-5	25
	$Y_0 = 725$		$\Sigma = 50$

Тоді

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{0i} - Y_0)^2}{f_1} = \frac{50}{3-1} = 25$$



*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:

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

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 3.1.4 - Результати дослідів,  $T$  (°C)

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат	900	880	895	860	833	827	805	800

По формулі розраховуємо коефіцієнти регресії шуканих моделей:

$$b_0 = \frac{1}{8}[900 + 880 + 895 + 860 + 833 + 827 + 805 + 800] = 850$$

$$b_1 = \frac{1}{8}[900 + 880 + 895 + 860 - 833 - 827 - 805 - 800] = 33.75$$

$$b_2 = \frac{1}{8}[900 + 880 - 895 - 860 + 833 + 827 - 805 - 800] = 10$$

$$b_3 = \frac{1}{8}[900 - 880 + 895 - 860 + 833 - 827 + 805 - 800] = 8.25$$

Таким чином, одержана лінійна модель має заздалегідь наступний вигляд:

$$Y = 850 + 33.75 \cdot x_1 + 10 \cdot x_2 + 8.25 \cdot x_3$$

*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 досліджуваного фактора.

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  $S_{bi}$ .

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{25}{8}} = 1.7678$$

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

$$\Delta b_i = 4.3027 \cdot 1.7678 = 7.6061.$$

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

$$Y = 850 + 33.75 \cdot x_1 + 10 \cdot x_2 + 8.25 \cdot x_3.$$

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

Таблиця 3.1.5 – Розрахунок дисперсії неадекватності

Y		$\Delta Y$	$\Delta Y^2$
Експеримент	Розрахунок		
900	902	-2	4
880	885,5	-5,5	30,25
895	882	13	169
860	865,5	-5,5	30,25
833	834,5	-1,5	2,25
827	818	9	81
805	814,5	-9,5	90,25

800	798	2	4
			$\Sigma 411$

1. По формулі одержуємо оцінку дисперсії неадекватності:

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (Y_n^{експ} - Y_n^{розн})^2}{f_2} = \frac{411}{8-4} = 102.75.$$

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

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

$$F_{f_1, f_2}^{розн} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2} = \frac{102.75}{25} = 4.11..$$

Модель адекватна, оскільки  $F^{табл.} = 19.24$ .

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.

$$\begin{aligned} y &= 850 + 33,75 \left( \frac{X_1 - 1150}{50} \right) + 10 \left( \frac{X_2 - 1100}{50} \right) + 8,25 \left( \frac{X_3 - 950}{50} \right) = \\ &= 303 + 0,675 x_1 + 0,2 x_2 + 0,165 x_3. \end{aligned}$$

Отже рівняння у натуральному виді матиме вигляд:

$$y = 303 + 0,675 x_1 + 0,2 x_2 + 0,165 x_3.$$

### *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 (спрощене) рівняння підставляємо послідовно значення фактора  $X_1$  на нижньому, основному й верхньому рівнях, тобто -1; 0; +1 і одержуємо графік.

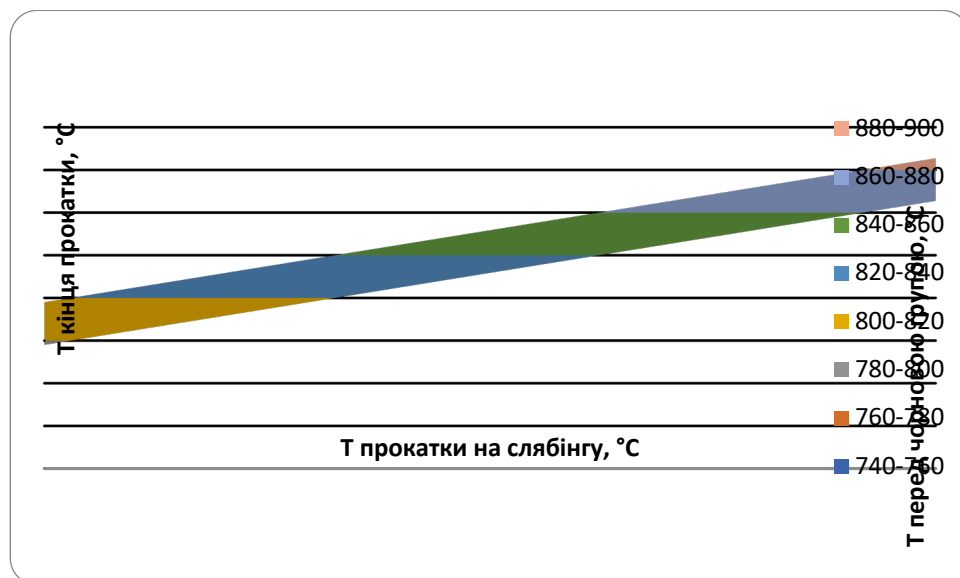


Рисунок 3.11 - Залежність температури кінця прокатки від температури прокатки на слябінгу і температури перед чорною групою клітей (сталь 08пс)

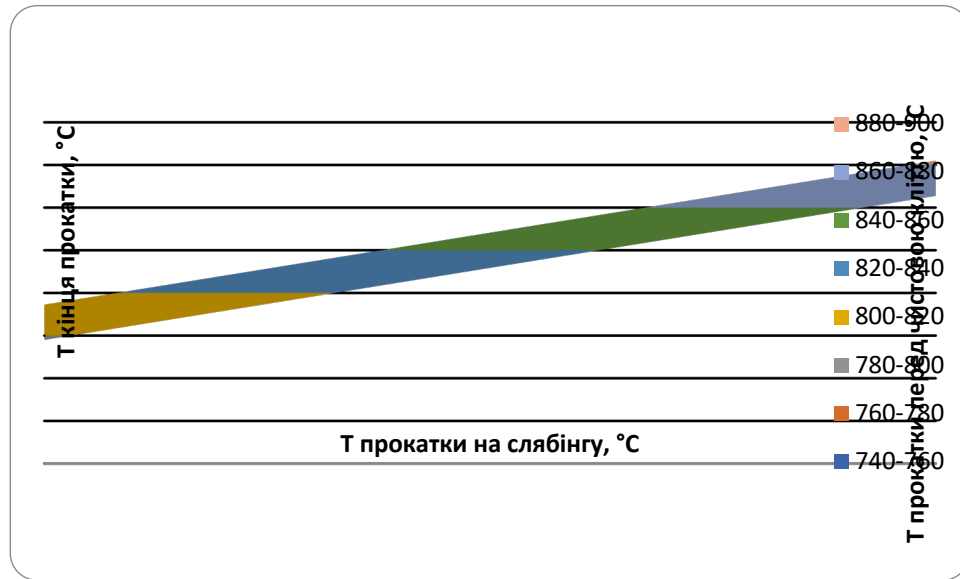


Рисунок 3.12 - Залежність температури кінця прокатки від температури прокатки на слябінгу і температури перед чистовою групою клітей (сталь 08 пс)

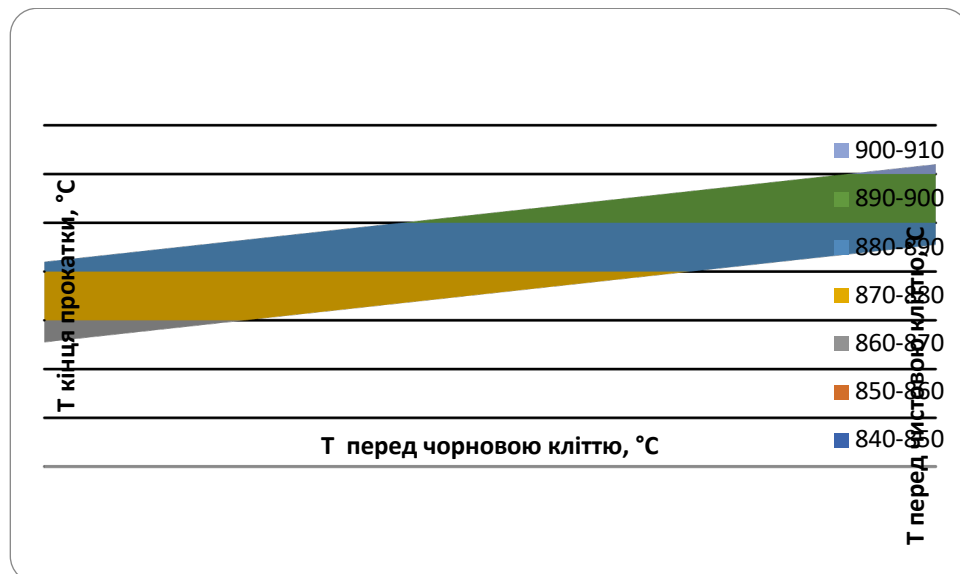


Рисунок 3.13 - Залежність температури кінця прокатки від температури перед чорною групою клітей і чистовою (сталь 08 пс)

**Дослід № 2.** За допомогою методу повного факторного експерименту дослідити вплив на температуру кінця прокатки наступних факторів (матеріал – сталь 08 кп) :

$X_1$ - температура прокатки на слябінгу,  $T, ^\circ\text{C}$  ;

$X_2$ - температура перед чорною кліттю,  $T, ^\circ\text{C}$ ;

$X_3$ - температура перед чистою кліттю,  $T, ^\circ\text{C}$ ;

Таблиця 3.2.1 - Досліджувані фактори

Характеристика	Фактори		
	Температура прокатки на слябінгу ( $T, ^\circ\text{C}$ )	Температура перед чорною кліттю ( $T, ^\circ\text{C}$ )	Температура перед чистою кліттю ( $T, ^\circ\text{C}$ )
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основний рівень	1200	1150	900
Інтервал варіації	50	50	50
Верхній рівень (закодоване значення +1)	1250	1200	950
Нижній рівень (закодоване значення -1)	1150	1100	850

Таблиця 3.2.2 - Результати дослідів,  $T (^\circ\text{C})$

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат	905	888	890	855	830	825	815	780

Одержуємо лінійну модель наступного вигляду:

$$y = 848,125 + 35,625 x_1 + 13,125 x_2 + 11,875 x_3.$$

Визначимо дисперсність дослідів  $f_1$ :

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

$$S^2_y = \frac{\sum \Delta Y^2}{f_1} = \frac{116,67}{2} = 58,333.$$

Визначимо коефіцієнт Стюдента:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y}{N}} = \sqrt{\frac{58,333}{8}} = 2,7003.$$

Розраховуємо довірний інтервал коефіцієнтів:

$$\Delta b = t * S_k = 4.3027 * 2,7003 = 11,618.$$

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

Рівняння набуде вигляду:

$$y = 848,125 + 35.625 x_1 + 13.125 x_2 + 11.875 x_3.$$

Адекватність моделі перевіряємо по критерію Фішера.

$$F_{\text{розр.}}_{f1f2} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2} = \frac{84,375}{58,333} = 1,446.$$

$F_{\text{табл.}} = 19,25$ , отже модель є адекватною, оскільки:

$$F_{\text{табл.}} < F_{\text{розр.}}$$

Отже рівняння у натуральному виді матиме вигляд:

$$y = 534,375 + 0,7125 x_1 + 0,2625 x_2 + 0,2375 x_3.$$



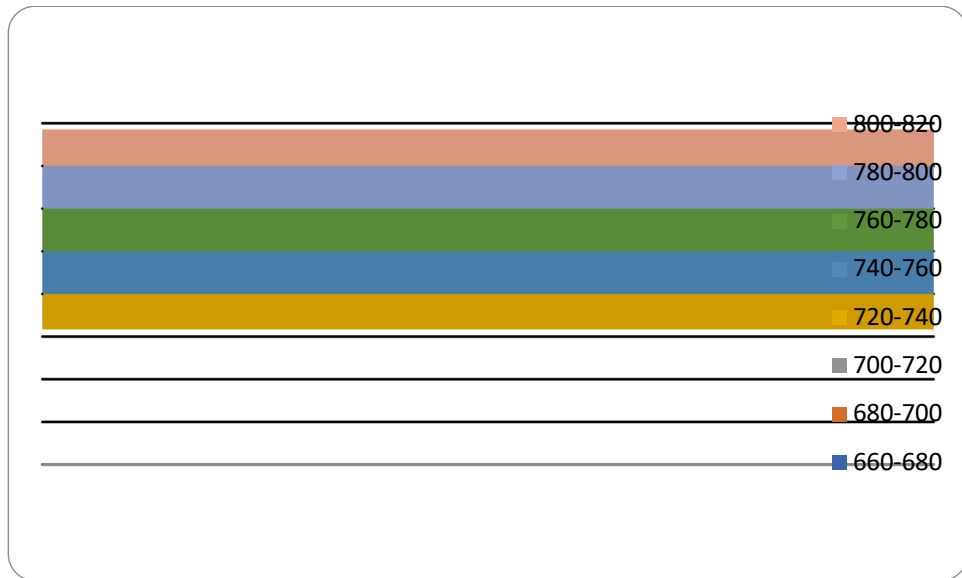


Рисунок 3.14 - Залежність температури кінця прокатки від температури прокатки на слябінгу і температури перед чорною кліттю (08кп)

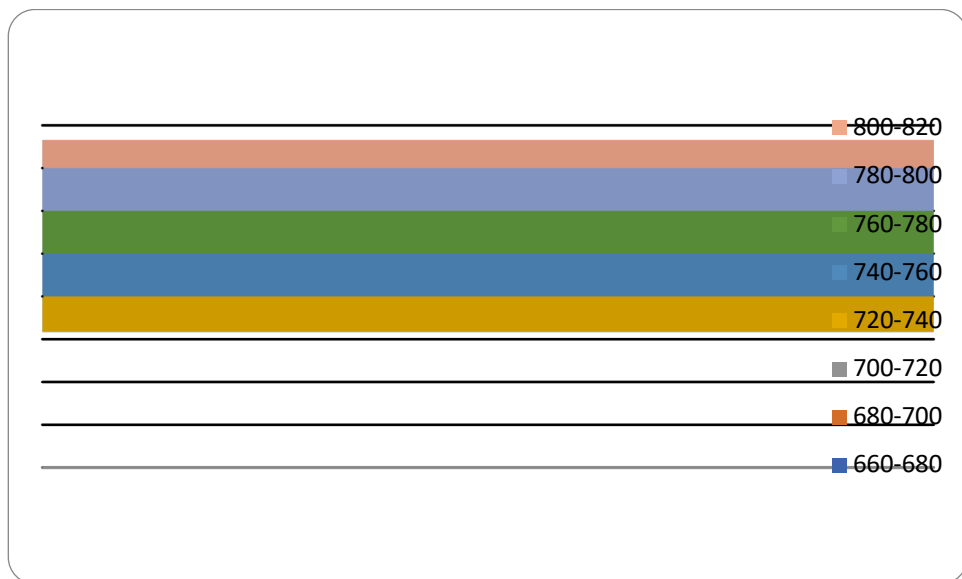


Рисунок 3.15 - Залежність температури кінця прокатки від температури прокатки на слябінгу і температури перед чистовою кліттю (08 кп)

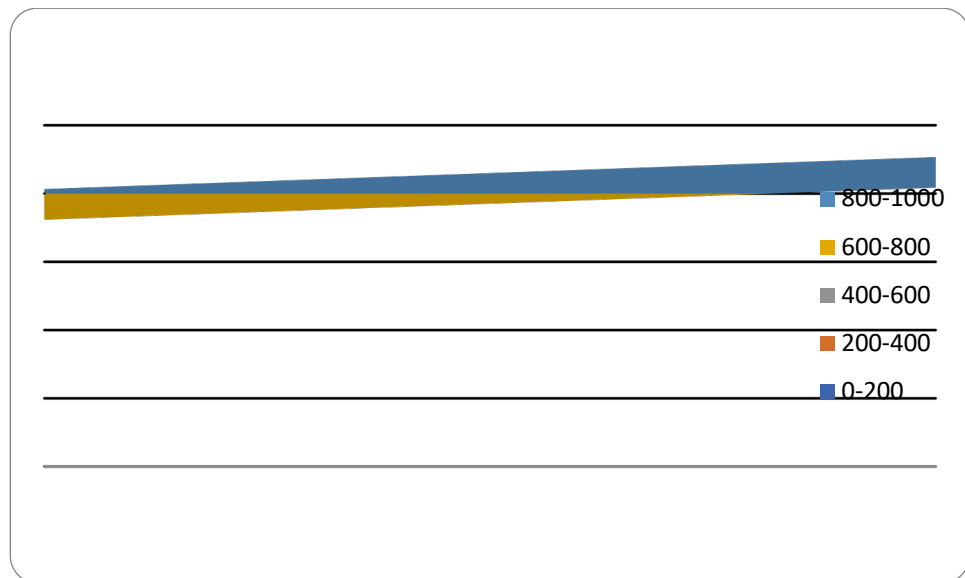


Рисунок 3.16 - Залежність температури кінця прокатки від температури перед чорною і чистою клітями (08 кп)

**Дослід № 3.** За допомогою методу повного факторного експерименту дослідити вплив на температуру кінця прокатки наступних факторів (матеріал – Сталь 2) :

$X_1$ - температура прокатки на слябінгу,  $T, ^\circ\text{C}$  ;

$X_2$ - температура перед чорною кліттю,  $T, ^\circ\text{C}$ ;

$X_3$ - температура перед чистою кліттю,  $T, ^\circ\text{C}$ ;

Таблиця 3. 3.1 - Досліджувані фактори

Характеристика	Фактори		
	Температура прокатки на слябінгу ( $T, ^\circ\text{C}$ )	Температура перед чорною кліттю ( $T, ^\circ\text{C}$ )	Температура перед чистою кліттю ( $T, ^\circ\text{C}$ )
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основний рівень	1250	1200	950
Інтервал варіації	50	50	30
Верхній рівень (закодоване значення +1)	1300	1250	980

Нижній рівень (закодоване значення -1)	1200	1150	920
---	------	------	-----

Таблиця 3.3.2 - Результати дослідів, T (°C)

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат	900	875	885	852	826	820	815	790

Одержуємо лінійну модель наступного вигляду:

$$y = 845,375 + 32,625 x_1 + 9,875 x_2 + 11,125 x_3.$$

Визначимо дисперсність дослідів  $f_1$ :

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

$$S^2_y = \frac{\sum \Delta y^2}{f_1} = \frac{14}{2} = 7.$$

Визначимо коефіцієнт Стьюдента:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y}{N}} = \sqrt{\frac{7}{8}} = 0,9354.$$

Розраховуємо довірний інтервал коефіцієнтів:

$$\Delta b = t * S_k = 4,3027 * 0,9354 = 4,0248.$$

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

Рівняння набуде вигляду:

$$y=845,375 + 32,625 x_1 + 9,875 x_2 + 11.125 x_3.$$

Адекватність моделі перевіряємо по критерію Фішера.

$$F_{\text{розр.}} = \frac{S_{\text{невд}}^2}{S_y^2} = \frac{49,625}{7} = 7,089.$$

$F_{\text{табл.}} = 1,9246$ , отже модель є адекватною, оскільки:

$$F_{\text{табл.}} < F_{\text{розр.}}$$

Отже рівняння у натуральному виді матиме вигляд:

$$y= 559,542+ 0,6525 x_1 + 0,1975 x_2 + 0,37 x_3.$$

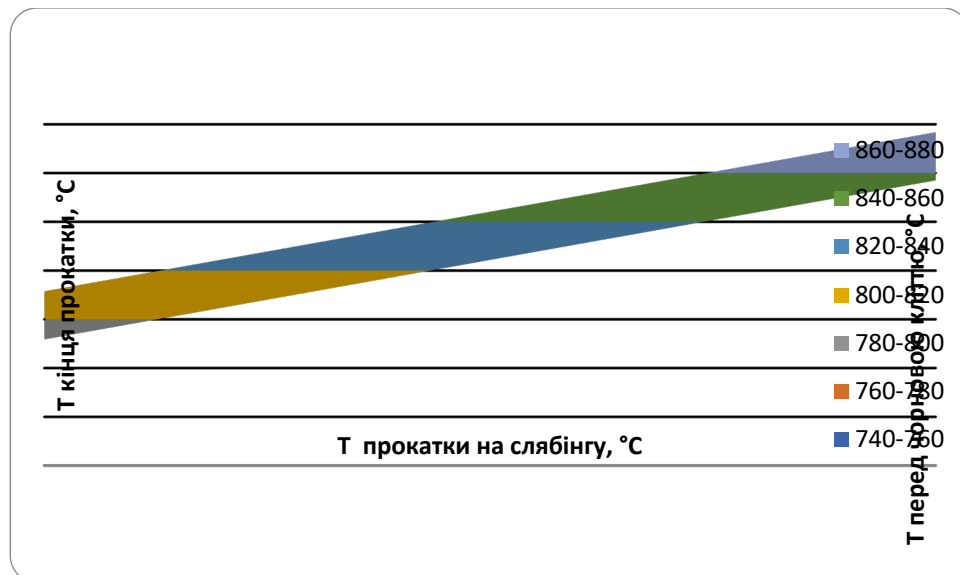


Рисунок 3.17 - Залежність температури кінця прокатки від температури прокатки на слябінгу і температури перед чорною кліткою (Ст2)

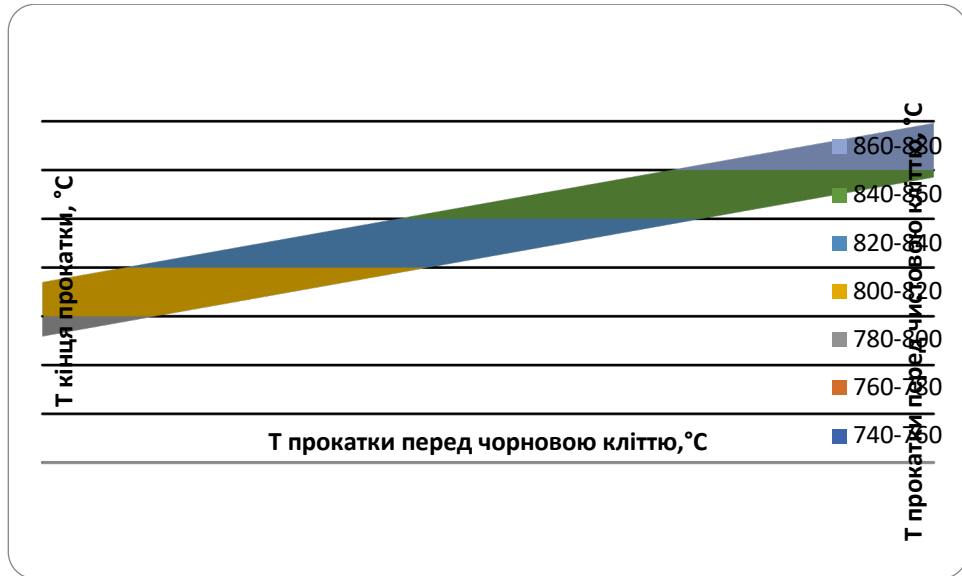


Рисунок 3.18 - Залежність продуктивності стана від температури прокатки на слябінгу і температури перед чистою кліттю (Ст2)

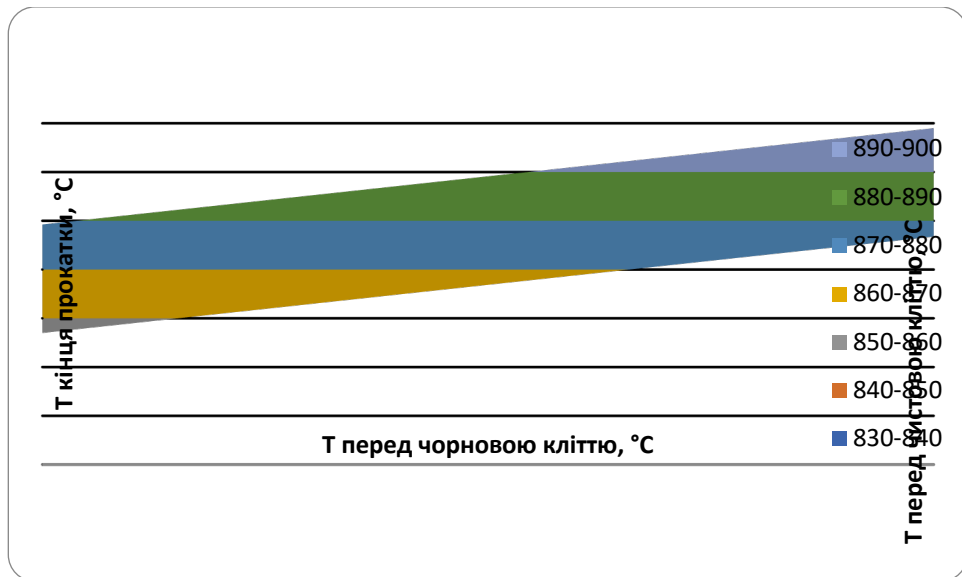


Рисунок 3.19 - Залежність продуктивності стана від температури перед чорною і чистою клітцями (Ст2)

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Основи гігієни, фізіології і психології

Велике значення в створенні оптимальних умов праці має взаємини, що складаються в колективі, між працівниками, що прийнято називати соціальним кліматом. Для створення найбільш сприятливих умов праці в ОЦ необхідно враховувати психофізіологічні особливості людини, а також загальну гігієнічну обстановку. Установлено, що привести людину в поганий настрій значно легше, ніж створити обстановку, що сприяє гарному настрою. Працівник, що знаходиться в стані нервового порушення (в результаті ненормальних виробничих взаємин), допускає багато помилок при роботі на ЕОМ. Товариські ділові відносини між працюючими, особливо між керівником та виконавцями, створюють гарну робочу обстановку, усувають нервозність і тим самим позитивно впливають на продуктивність праці і її безпеку. Дуже важливу роль грає планування робочого місця. Практика показує, що планування робочого місця повинне задовольняти вимогам зручності виконання робіт і економії енергії й часу оператора, раціонального використання виробничих площ і зручності обслуговування пристроїв ЕОМ, дотримання правил техніки безпеки.

Необхідно враховувати при плануванні робочого місця зручність розташування дисплеїв, клавіатури, пульта ЕОМ, а також зони досяжності рук оператора. Ці зони, установлені на підставі антропометричних даних людського тіла, дають можливість раціонально розмістити як по горизонталі, так і по вертикалі клавіатуру пульта, його сигналізацію і т.д. Найбільш зручне сидіння, що має виїмку, що відповідає формі стегон, і нахил назад. Спинка стільця повинна бути вигнутої форми, що обіймає попереk. Довжина її 0,3 м, ширина - 0,11 м, радіус вигину 0,3 - 0,35 м.

Варто брати до уваги при організації робочого місця дані антропометрії. Рух працівника необхідно сконцентрувати так, щоб групи м'язів його були навантажені рівномірно, а зайві непродуктивні рухи усунуті.

Поліпшення виробничої обстановки включає раціональне рішення наступних питань: кольору у виробничому інтер'єрі, освітлення, чистоти повітряного середовища, зменшення вібрацій і шуму, обробки підлог і стель і ін. Раціональне колірне оформлення приміщень спрямоване на поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці, підвищення його продуктивності й безпеки. Фарбування виробничих приміщень ЦГПТЛ впливають на нервову систему людини, його настрої, сприйняття запаху, смаку й у кінцевому рахунку на продуктивність праці. Тому так важливий вибір кольору приміщень ЦГПТЛ. Необхідно враховувати, що колір є сильним психологічним стимулятором: червоний колір збільшує мускульну напругу, жовтогарячий - стимулює діяльність, жовтий - стимулює зір і нервову систему, зелений - заспокоює, блакитний - послабляє мускульну напругу, фіолетовий - створює відчуття спокою. Сприйняття світла в більшому ступені залежить від освітленості. Під впливом різних джерел світла колір поверхні змінює тон. Коефіцієнт відображення світла матеріалами й устаткуванням усередині приміщень має велике значення для освітлення. Освітлення приміщень і устаткування повинне бути м'яким, без блиску, фарбування інтер'єра приміщень ЦГПТЛ повинне бути спокійне для візуального сприйняття.

Приміщення ЦГПТЛ, їхні розміри (площа, кубатура) повинні в першу чергу відповідати кількості працюючих і розташовуваному в них комплексу технічних засобів. У них передбачають відповідні параметри температури, освітлення, чистоти повітря, забезпечують ізоляцію від стороннього шуму і т.п. Для забезпечення нормальних умов праці санітарні норми встановлюють на одного працюючого обсяг приміщення не менш 15 м<sup>3</sup>; площа приміщення, відгородженого глухими стінами чи перегородками, не менш 4,5 м<sup>2</sup>. [31, 32]

## 4.2 Метеорологічні умови виробничого середовища в обчислювальному центрі

Під метеорологічними умовами виробничого середовища відповідно до стандартів розуміють сполучення температури, відносній вологості і швидкості повітря.[31] Оптимальні і припустимі параметри повітряного середовища в приміщенні ЦГПТЛ представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в приміщеннях ЦГПТЛ

Температура зовнішнього повітря	Параметри повітряного середовища на постійних робочих місцях					
	Оптимальні			Припустимі		
	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість переміщення, м/с, не більше	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість переміщення, м/с, не більше
Нижче +10 <sup>0</sup> С	20 – 22	40 – 60	0,2	18 – 22	Не більше 70	0,3
Вище +10 <sup>0</sup> С	20 – 25	40 – 60	0,5	Не більше, чим на 3 <sup>0</sup> С нижче середньої температури зовнішнього повітря самого жаркого місяця	70 при 24 <sup>0</sup> С й нижче, 65 при 25 <sup>0</sup> С, 60 при 26 <sup>0</sup> С, 55 при 27 <sup>0</sup> С, 50 при 28 <sup>0</sup> С	0,3

По ступеню тяжкості роботи в ОЦ відносяться до I категорії: легкі фізичні роботи з енерговитратами до 174 Вт (150 к кал / годину).



При роботі в машинному залі ОЦ людина зіштовхується із впливом таких фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, як підвищений рівень шуму, підвищена температура зовнішнього середовища, недостатня освітленість робочої зони, можливість поразки електричним струмом, статична електрика, небезпечне іонізуюче випромінювання. Крім того, робота в ОЦ зв'язана з впливом таких психофізіологічних факторів, як розумова перенапруга, перенапруга зорових і слухових аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження.

Під метеорологічними умовами виробничого середовища відповідно до ГОСТ 12.1.005 – 88 розуміють сполучення температури, відносної вологості, швидкості руху і запиленості повітря. З метою створення нормальних умов для роботи в ОЦ установлені норми виробничого мікроклімату (ГОСТ 12.1.005 – 88). Нормативні і фактичні параметри мікроклімату наведені в таблиці 7.2.

Джерелом шуму в ОЦ являються ПЕОМ, шум виникає від вбудованого в ПЕОМ вентилятора охолодження процесора. Також шум виникає від джерел аеродинамічного шуму. Джерелами цього шуму можуть бути будь-які машини і пристрої, застосовувані в ОЦ.

Гранично припустимий рівень шуму в машинному залі ОЦ за ГОСТ 12.1.003 – 83 повинен становити 65 дБ. Фактичний рівень шуму в машинному залі кафедри обробки металів тиском, у якому виконувалася дана робота, становить 80 дБ. Високі рівні шуму викликають труднощі в розпізнаванні кольорових сигналів, знижують гостроту зору, зорову адаптацію, порушують сприйняття візуальної інформації. Тривалі впливи шуму приводять до погіршення слуху і появи приглухуватості.

Таблиця 4.2 - Нормативні і фактичні параметри мікроклімату в машинному залі обчислювального центру

Найменування приміщення	Параметри повітряного середовища					
	Нормативні			Фактичні		
	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с
Машинний зал	20 – 22 взимку	40 – 60	0,1	18 – 20 взимку	55 – 65	0,1
	20 – 24 літом	до 75	0,2	22 – 24 літом		

На мікроклімат дуже впливають джерела теплоти, що знаходяться в приміщенні ОЦ. Найбільшу кількість теплоти виділяють ПЕОМ і оргтехніка (принтери, ксерокси, сканери) - в середньому до 80 % сумарних тепловиділень. Тепловиділення від приладів освітлення становлять у середньому 12 %. Надходження теплоти від обслуговуючого персоналу – 1%, від сонячної радіації – 6 %, приплив теплоти через непрозорі конструкції, що обгороджують - 1 %.

Гранично припустимий рівень теплового випромінювання в машинному залі ОЦ відповідно до ГОСТ 12.1.005 – 88 не повинен перевищувати 310 Вт/м<sup>2</sup>. Фактична інтенсивність теплового випромінювання в даному машинному залі дорівнює 290 Вт/м<sup>2</sup>, що не перевищує припустиму.

Джерелом іонізуючого випромінювання в ОЦ являються дисплеї ПЕОМ. Іонізуюче випромінювання, при тривалому його впливі, викликає в людини стомленість і головний біль. Іонізуюче випромінювання в машинному залі ОЦ не повинне перевищувати 100 мРг /годину. Фактичне іонізуюче випромінювання – 190 мРг /годину.

Джерелом поразки електричним струмом в ОЦ можуть бути: все електроустаткування ОЦ (при недотриманні правил техніки безпеки), провідники електричного струму, що знаходяться під напругою,

електрощитові. При поразці електричним струмом людина може дістати важку травму або позбавитися життя.

Причини нещасливих випадків від впливу електроструму різноманітні і численні. Основними являються:

- безпосередній дотик до відкритих і струмонесучих частин і проводів;
- дотик до струмоведучих частин, ізоляція яких ушкоджена;
- дотик до струмоведучих частин із низьким опором ізоляції;
- дотик до металевих частин предметів, що випадково оказались під напругою;
- помилкова подача напруги під час ремонтів і оглядів устаткування;
- відсутність або порушення захисного заземлення (статична напруга).

Електричний струм, протікаючи через живий організм, проводить термічне, електролітичне і біологічне впливи.

Найважливішими факторами, що впливають на результат поразки струмом, являються: сила і тривалість впливу струму, що протікає через людину; індивідуальні властивості людини й умови навколишнього середовища. Для оцінки впливу струму на людину встановлені наступні приблизні граничні значення:

- поріг відчуття – 2 мА;
- поріг невідпускаємого струму – 20...25 мА;
- поріг фібіляції – 50 мА;
- безумовно смертельний струм – 100 мА і більш.

Для поглинання шуму в машинному залі ОЦ варто установити звукоізоляцію. Для цього можна використовувати волокнисто-пористі матеріали: скловолокно, фібролітові плити, поліуретановий паропласт. Також потрібно установити підвісну стелю, що складається з каркаса, панелей з касетами зі звукоізоляційного матеріалу, освітлювальних установок з вентиляційними ґратами й елементів їхнього кріплення.

Для підтримки параметрів повітряного середовища в припустимих межах, забезпечення надійної роботи ПЕОМ і комфорту персоналу в ОЦ

варто передбачати системи опалення і вентиляції. Система опалення повинна забезпечити достатнє і рівномірне нагрівання повітря в приміщеннях у холодний період року. В приміщенні машинного залу, у якому проводилася дана робота, застосовується система центрального водяного опалення, що відрізняється гігієнічністю, надійна в експлуатації і забезпечує можливість регулювання температури в широких межах. Система вентиляції призначена для забезпечення встановлених норм мікрокліматичних параметрів і чистоти повітря в машинних залах і інших приміщеннях ОЦ.

Щоб усунути недостатню освітленість робочої зони в машинному залі в підвісну стелю потрібно умонтувати визначену кількість світильників.

При оцінці умов електробезпечності в ОЦ і розробці захисних заходів необхідно визначити припустимі значення сили струму для людини і допустимі напруження дотику при включенні його в електричний ланцюг (ГОСТ 12.1.038 – 82). Заходом безпеки при небезпеці дотику в однофазній мережі може бути зниження робочої напруги електроустаткування, тобто використання устаткування з напругою не більш 220 В. Заходом безпеки при небезпеці дотику в трифазній мережі може бути виконання трифазної мережі за схемою з ізольованої нейтраллю чи за схемою з глухозаземленням. Застосування захисного заземлення здійснює захист співробітників ОЦ від поразки електричним струмом.

З метою запобігання помилкових дій обслуговуючого персоналу, випадкової подачі напруги на працюючих рекомендується вивішувати попереджувальні плакати і знаки безпеки.

Перед початком усіх видів ремонтних робіт в ОЦ рекомендується перевірка відсутності напруги в мережі й устаткуванні.

При проведенні усіх видів ремонтних робіт співробітникам, що проводять ремонт, варто користатися засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) і дотримуватися всіх Правил техніки безпеки щоб уникнути одержання травми від удару електричним струмом.

При роботі на дисплеях в ОЦ потрібно дотримуватися наступних вимог: тривалість робочого дня повинна складати 4 години, перерва через кожні 1,5 – 2 години (тривалість 15 хвилин). Також варто використовувати дисплеї з випромінюванням не більш 100 мРг/годину (Low Radiation).

З метою створення сприятливих умов зорової роботи в машинному залі ОЦ передбачається встановлення світильників з люмінесцентними лампами типу ЛБ – 40.[31, 32]

З метою запобігання поразки електричним струмом передбачається встановлення захисного заземлення, розрахунок якого приведений нижче.[30]

Опір прямокутної металевої пластини (плити), поставленої на ребро, можна обчислити по наступній наближеній формулі (при  $t$  більше 0,5b):

$$R = \frac{\rho}{4 \sqrt{a} b}; \text{ Ом} \quad (4.1)$$

Розміри пластини:  $a = 300$  см;  $b = 250$  см. Глибина закладення пластини  $t = 250$  см. Ґрунт – суглинок.

Для суглинку  $c = 1 \cdot 10^4$  Ом·см. Підставляючи значення у формулу (7.1), дістанемо:

$$R = \frac{1 \cdot 10^4}{4 \cdot \sqrt{300 \cdot 250}} = \frac{10^4}{4 \cdot \sqrt{75000}} = 9,129 \text{ Ом.}$$

Тому опір захисного заземлення, відповідно до Правил устрою електроустановок (ПУЕ), для установок з напругою до 1000 В повинен бути не менше 4 Ом (у всіх випадках) або не більш 10 Ом (при потужності генераторів і трансформаторів менш 100 кВА), те розглянута прямокутна пластина, що володіє опором 9,129 Ом, може бути використана в якості одного заземлювача.

Обчислювальний центр по вибухово-пожежній небезпеці згідно СНІП 2.01.02 – 85 відноситься до категорії В, а по вогнестійкості конструкцій згідно СНІП 2.01.02 – 85 до 2-го ступеня.

Причинами пожеж в ОЦ можуть бути несправність усіх видів електроустаткування, використовуваного в ОЦ, мереж приладів освітлення, замикання електромереж, розряди статичної електрики, порушення правил безпеки, необережне і халатне поводження з вогнем.

З метою усунення зазначених причин, а також для запобігання поширення вогню проектом передбачені наступні заходи:

- підтримування опору ізоляції струмоведучих частин не нижче величин, регламентованих Правилами техніки безпеки;
- захист ізоляції від теплового, механічного й агресивного впливу навколишнього середовища за допомогою прокладки проводів у трубках;
- устрій механічних і електричних блокувань для виключення помилкових дій;
- захист відкритих струмоведучих частин від улучення на них сторонніх предметів;
- дотримання працюючими інструкцій і правил;
- установлення зовнішніх і внутрішніх протипожежних водопроводів;
- встановлення пожежної сигналізації;
- встановлення системи автоматичного пожежегасіння;
- всі пожежно небезпечні місця обладнані первинними засобами пожежегасіння.

Засоби індивідуального захисту служать для захисту робітників від шкідливих і небезпечних факторів виробничого процесу. Працівники обчислювального центра забезпечуються засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) безкоштовно, згідно зі штатним розписом на підставі типових галузевих норм; загальна річна потреба в ЗІЗ для обчислювального центра складе:

- халат бавовняний – 12 шт.;
- рукавички діелектричні – по мірі зносу.

На підставі СНіП 2.09.04 – 87 виробничий процес в ОЦ по санітарно-гігієнічній характеристиці відноситься до групи 1 а. В зв'язку з цим склад побутових і допоміжних приміщень для працівників ОЦ повинний бути наступним: гардеробна, умивальня, вбиральня.

Загальна кількість працюючих в обчислювальному центрі 12 чоловік: начальник обчислювального центра – 1; інженер електрик обчислювальних машин – 1; технік електрик обчислювальних машин – 1; ведучий програміст – 1; програміст – 2; оператор ЕОМ – 5; електрик – 1.

Крім того, з метою пожежної профілактики в машинному залі ОЦ передбачається встановлення первинних засобів пожежегасіння: вогнегасники, характеристика яких наведена в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Характеристика вогнегасників ОЦ

Найменування приміщення	Площа, м <sup>2</sup>	Вуглекислотний вогнегасник, типу
		ОУ – 5; ОУ – 8
Машинний зал обчислювального центру	120	1

Гардеробна призначена для збереження вуличного, домашнього і спеціального одягу робітників. Кожному робітнику виділена одна подвійна шафа для домашнього і спеціального одягу. Кількість подвійних шаф дорівнює загальному числу працюючих і складає 12 штук.

В обчислювальному центрі відповідно до санітарно-побутових норм встановлений умивальник зі змішувачем гарячої і холодної води, розрахований на обслуговування 20 чоловік.

Для заповнення вологи і мінеральних солей в обчислювальному центрі встановлюється питний фонтанчик із прісною водою й автомат з підсоленою газованою водою, видалення яких від робочих місць не менше 50 метрів.

Вбиральня в обчислювальному центрі з двох окремих із одним санітарним приладом у кожному і їх віддалення від обчислювального центра не перевищує 50 м. [30]

### 4.3 Нормування освітлення

В залежності від природи джерела світлової енергії розрізняють природне, штучне і спільне висвітлення. По конструкційних особливостях природне висвітлення розділяється на бічне, верхнє і комбіноване. У приміщеннях ЦГПТЛ, як правило, застосовують бічне природне висвітлення. В тих випадках, коли одного природного висвітлення в приміщенні недостатньо, улаштовується сполучене висвітлення, при цьому додаткове штучне висвітлення застосовується не тільки в темне, але й у світлий час доби.

В даний час норми освітленості встановлені СНіП II-4-79. Для штучного освітлення регламентована найменша освітленість на робочих поверхнях у приміщеннях ЦГПТЛ, для природного і штучного - коефіцієнт природної освітленості (КПО), що визначається відношенням (у відсотках) освітленості в даній крапці всередині приміщення  $E_{вн}$  до одночасно вимірюваної зовнішньої горизонтальної освітленості під відкритим небом  $E_{нар}$ :

$$КПО = \left( \frac{E_{вн}}{E_{нар}} \right) \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

Норми освітленості побудовані на основі класифікації робіт з визначених кількісних ознак. Ведучою ознакою, що визначає розряд робіт, є найменший розмір деталей, що розрізняються. В свою чергу розряди поділяються на чотири підрозряди в залежності від коефіцієнта відображення тла і контрасту між деталями і тлом.

Норми освітленості приміщень ЦГПТЛ залежать від прийнятої системи освітлення. При цьому для бічного освітлення КПО нормується мінімальним, а для верхнього і бічного - середнім.

СНіП II-4-79 передбачають переважне використання люмінесцентних ламп. Якщо використання цих ламп по техніко-економічних причинах



неможливо чи недоцільно (наприклад, при низьких значеннях освітленості люмінесцентні лампи роблять сутінкове, дискомфортне враження), то дозволяється застосовувати лампи накаливання. Для малоекономічних ламп накаливання встановлені зменшені норми освітленості.

Коефіцієнт пульсації освітленості  $K_{п}$  визначається по формулі (4.3):

$$K_{п}=(E_{\max} - E_{\min})/2E_{\text{ср}} \quad (4.3)$$

Контрастність  $K$  визначається по формулам (4.4):

$$K = (B_0 - B_{\phi})/ B_{\phi}; \quad K =(B_{\phi} - B_0)/ B_{\phi} . \quad (4.4)$$

де  $B_{\phi}$  – ясність фону, кд/м<sup>2</sup>;  $B_0$  – ясність об'єкту, кд/м<sup>2</sup>.

Крім кількісних, нормують і якісні показники освітленості. Так, для обмеження несприятливої дії пульсуючих потоків газорозрядних ламп регламентований в межах 10 - 20% в залежності від розряду зорової роботи. У випадку, коли виникнення стробоскопічного ефекту неможливо, допускається збільшення  $K_{п}$  до 30%.

Недолік освітленості робочої зони також несприятливо діє на працівників ОЦ. Робота з ПЕОМ належить до розряду робіт малої точності (розмір об'єкта 1 – 5 мм), що по СНіП – 4 – 79 класифікується в V розряд зорової роботи, підрозряд А. В таблиці 4.4 наведені характеристики освітлення для даної категорії робіт.

Фактичне  $E = 250$  лк. Невідповідність нормам освітленості приводить до погіршення зору, загального самопочуття, стомлюваності, унаслідок чого знижується працездатність персоналу і продуктивність праці.

Таблиця 4.4 - Норми освітленості по СНіП – 4 – 79

Розряд, характеристика зорової роботи і найменший розмір об'єкту	Підрозряд	Контраст об'єкта з фоном	Фон	Вид освітлення							
				Штучне	Природне		Сполучене				
					При бічному освітленні		При бічному освітленні				
				Е, лк		КЕО, %					
Малої точності: розмір об'єкта 1–5 мм	А	Малий	Темний	300	200	3,0	0,8	1,0	1,8	0,5	0,6

Крім кількісних нормуються і якісні показники освітленості. Так, для обмеження несприятливої дії пульсуючих світлових потоків газорозрядних ламп встановлене граничне значення коефіцієнта пульсації освітленості робочих місць  $K_p$  для машинних залів 15 %. Пульсація освітленості в ОЦ викликає стомлення зору, а при спостереженні деталей, що рухаються - стробоскопічний ефект, тобто явище перекручування зорового сприйняття швидкості і напрямку руху [30].

## ВИСНОВКИ

Розглянуті режими температури та швидкості деформації на сучасних великомасштабних станах. Один із ключових факторів, який визначає якість гарячекатаної штабової сталі, - це режим температури та швидкості прокатки. Структура металу та його фізико-механічні властивості в значній мірі залежать від температури завершення прокатки. Для досягнення бажаної структури та фізико-механічних характеристик штабової продукції необхідно завершувати прокатку при визначеній температурі.

Представлена модель температурного режиму прокатки, яка враховує умови температури та швидкості деформації під час прокатки. Визначення зміни температури штаби проводилося для визначених перерізів під час їх послідовного проходження через робочі кліті чорнової групи.

Дослідження показали, що завдяки впровадженню процесу гарячої прокатки із прискоренням призвело до збільшення продуктивності стану на 6%. Встановлено, що температурний режим прокатки визначає структуру та механічні властивості гарячекатаних штаб. Велике значення мають температура завершення та температура змотування штаби на рулоні. За допомогою підвищення температури завершення прокатки, зокрема через прискорення, можна розширити можливості для виробництва більш якісних штаб з вищими механічними властивостями та рівномірною товщиною по довжині.

Розглянуті основні проблеми при прокатному виробництві та методи боротьби із забрудненням навколишнього середовища.

Проаналізовані фактори, що впливають на працездатність працівників обробних цехів, та запропоновані заходи для забезпечення їхньої безпеки, такі як зменшення шуму та покращення умов освітлення на робочому місці, а також зниження ризику ураження електричним струмом шляхом розрахунку захисного заземлення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Федоринов В. А., Сатонин А. В., Грибков Э. П. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография. Краматорск : ДГМА, 2010. 244 с.
2. Серета Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.
3. *Серета Б.П.* Прокатне виробництво : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 312 с.
4. Василёв Я.Д., Сафьян М.М. Производство полосовой и листовой стали : учебник для вузов. Киев : Вища школа, Головное издательство, 1976. 192 с.
5. Данченко В. Н., Миленин А. А., Кузьменко В. И., Гриневич В. А. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Днепропетровск : Системные технологии. 2005. 448 с.
6. Сатонин А. В. Численное конечно-разностное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации различных технологических схем обработки давлением. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. Краматорськ : ДДМА. 2001. С. 559-564.
7. Коновалов Ю. В. Черная металлургия Донбасса ретроспектива–перспектива. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні*. Краматорськ : ДДМА. 2002. С.66–73.
8. Medina S.F., Hernandez C.A. The Influence of Chemical Composition on Peak Strain of Deformed Austenite in Low Alloy and Microalloyed Steels. *Acta Mater.* 1996. Vol. 44. No. 1. P. 149-154.

9. Hernandez C.A., Medina S.F. and Ruiz J. Modelling Austenite Flow Curves in Low Alloy and Microalloyed Steels. *Acta Mater.* 1996. Vol. 44. No. 1. P. 155-163.
10. Серода Б.П. Теорія будови рідкого, кристалічного та аморфного стану речовини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 238 с.
11. Medina S.F. and Hernandez C.A. General Expression of the Zener-Hollomon Parameter as a Function of the Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steels. *Acta Mater.* 1996. Vol. 44. No. 1. P. 137-148.
12. Серода Б.П. Термічна обробка металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 270 с.
13. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев : Наукова думка, 1976. 403 с.
14. Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А., Горелик В.С. Технология прокатного производства. Киев : Вища школа. 1989. 311 с.
15. Бондаренко Ю.В., Белоконь Ю.О. Проценко В.М., Явтушенко А.В., Кругляк Д.О. Вдосконалення технології сортової прокатки дуплексної неіржавкої сталі з метою поліпшення якості металу. *Металургія.* 2021. Вип. 2. С. 75-79.
16. Sheyko S., Mishchenko V., Belokon Y. Formation of the properties and structure of rolled low-alloyed steel under the hot deformation process. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* 2022. 57(2). P. 402-406.
17. Sheyko S., Belokon Y., Kripak A., Tsyganov V., Kulabneva E. Development of rational chemical composition of special steel with increased mechanical and performance characteristics. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* 2023. 58(4). P. 795–803.
18. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.

19. Жук А. Я., Малышев Г. П., Желябина Н. К., Клевцов О. М. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование : монография. Запорожье : ЗГИА, 2008. 224 с.
20. Яковченко А.В., Пугач А.А., Ивлева Н.И. Анализ точности известных методов расчета напряжений течения металла в зависимости от химического состава стали. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2011. № 2(23). С. 69-80.
21. СерEDA Б.П. Металознавство і термічна обробка чорних і кольорових металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 302 с.
22. Laasraoui A., Jonas J.J. Prediction of steel flow stresses at high temperature and strain rates. *Metall. Trans. A*. 1991. No. 22. P. 1545-1558.
23. 19. Moreira A., Junior J., Balancin O. Prediction of steel flow stresses under hot working conditions. *Materials Research*. 2005. Vol. 8, No. 3. P. 309-315.
24. СерEDA Б.П., Белоконь Ю.О. Теорія прокатки : навч.-метод. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 2013. 102 с.
25. СерEDA Б.П., Белоконь Ю.О., Онiщенко А.М. Теорія обробки металів тиском : навч.-метод. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 132 с.
26. Belokon Y., Temin H. The research thermoplastic deformation modes of dual-phase special alloys for obtaining rational intermetallic structure. *METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials. (Brno, May 26 – 28, 2021)*. Brno, 2021. P. 348-353.
27. 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.
28. СерEDA Б.П., Кругляк І.В., Белоконь Ю.О. Конструкції агрегатів цехів обробки металів тиском : навч.-метод. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 168 с.

- 29.Середа Б.П., Кругляк І.В., Белоконь Ю.О. Оптимізація процесів обробки металів тиском : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2007. 149 с.
- 30.Середа Б.П., Коваленко А.К., Бабаченко Е.В., Белоконь Ю.А. Разработка математических моделей напряженно-деформированного состояния металла, обеспечивающих комплексную технико-экономическую оценку исследуемых процессов. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях.* Харьков : НТУ "ХПИ". 2011. № 47. С. 81-83.
- 31.Вышинский В.В., Ленский Ю.Н., Комов И.Г. и др. Охрана труда в черной металлургии. / 2-е изд. перераб. и доп. Киев : Техника, 1986. 192с.
- 32.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.