МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М.ПОТЕБНІ
Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

рівень вищої освіти_____другий (магістерський) рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему___Удосконалення технології термомеханічного зміцнення прокату нержавіючих сталей у потоці прокатного стану_____
_____
_____
_____

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1363-омт*

__Кушніренко О.Г._____
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

Керівник _Бєлоконь Ю.О._____
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент _Воденнікова_О.С._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2024 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. Бєлоконь*__

"_ __ _" _____2024 року

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

_____Кушніренко Олег Георгійович_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта)__Удосконалення технології термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей у потоці прокатного стану_____
_____
_____

керівник роботи (проєкту)_____Бєлоконь Юрій Олександрович _*д.т.н, професор*____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "__"_____ 2024 року №____

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____

3. Вихідні дані до роботи (проєкта)__Розробка термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей марок 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т на прокатному стані 550 в умовах ПрАТ "Дніпроспецсталь_____

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, Додаток*_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
*Презентаційний матеріал 15 слайдах (на 15 сторінках)*_____
_____
_____
_____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Літературний огляд	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н. завідувач кафедри*	
Розрахунково-дослідницька частина	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н. завідувач кафедри*	
Індивідуальне завдання	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н. завідувач кафедри*	
Охорона праці та техногенна безпека	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н. завідувач кафедри*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н. завідувач кафедри*	

7. Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент _____ _____*О.Г.Кушніренко*_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ ____*Ю.О. Бєлоконь*____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної робота магістра: 82 с., 17 табл., 16 рис., 1 дод., 35 джерел

ТЕРМОМЕХАНІЧНЕ ЗМІЦНЕННЯ, НЕРЖАВІЮЧІ СТАЛІ, СТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПРОКАТНИЙ СТАН, ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ.

Об'єкт дослідження – процес термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей спеціального призначення марок 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т в умовах прокатного стану 550.

Мета роботи – розробка та удосконалення технології термомеханічного зміцнення прокату нержавіючих сталей у потоці прокатного стана 550 для забезпечення показників якості у готовому прокаті.

На основі математичного планування експерименту встановлено, що визначальний вплив на формування структури та механічних властивостей має температура кінця прокатки.

Досліджено закономірності формування структури та механічних властивостей нержавіючих сталей при термомеханічному зміцненні. Показано, що обробка забезпечує формування однорідної дрібнозернистої структури з розміром зерна 6-7 балів.

Встановлено оптимальні режими термомеханічної обробки для кожної марки сталі: границя текучості 260-280 МПа, границя міцності 560-580 МПа, ударна в'язкість 190-210 Дж.

Випробування підтвердили високу стабільність процесу - коефіцієнти варіації механічних властивостей не перевищують 5-7%.

Результати роботи мають практичне значення для металургійної промисловості і можуть бути використані при розробці технологій термомеханічного зміцнення інших марок нержавіючих сталей.

ЗМІСТ

Вступ 6
1 Аналіз наукової інформації та стан проблем оптимізації процесу термомеханічного зміцнення сталей спеціального призначення 9
1.1 Теоретичні основи термомеханічного зміцнення 9
1.2 Технологічний процес виробництва сортового прокату 18
1.3 Підвищення експлуатаційних властивостей сталей спеціального призначення 22
1.4 Висновки та постановка завдань дослідження 26
2 Обгрунтування задач та методики дослідження 28
2.1 Методика теоретичних та практичних досліджень 28
2.2 Технологія та обладнання стану 550 ПрАТ «Дніпроспецсталь» ... 32
2.3 Методика вимірів властивостей прокату 39
3 обробка та обговорення результатів дослідження 42
3.1 Розробка математичної моделі процесу термомеханічного зміцнення 42
3.2 Дослідження впливу параметрів обробки на розмір зерна та механічні властивості 48
3.3 Порівняльний аналіз властивостей сталей після різних режимів термомеханічного зміцнення 53
3.4 Розробка технології термомеханічного зміцнення в умовах стану 550 58
3.5 Висновки по 3 розділу 60
4 Охорона праці та техногенна безпека 62
4.1 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих факторів при експлуатації стану 550 62
4.2 Технічні заходи з охорони праці 65
4.3 Огранізаційні заходи з охорони праці 67
4.4 Пожежна безпека 69
4.5 Охорона навколишнього середовища 71
Висновки 74
Перелік джерел посилань 76
Додаток А 80

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми дослідження зумовлена інтенсивним прогресом науково-технічного розвитку в галузі металургії, який вказує на потребу вдосконалення існуючих та впровадження більш прогресивних методів виробництва спеціальних матеріалів. Підвищення якості металевої продукції вимагає значного розширення сортаменту прокатного виробництва. З метою забезпечення надійності роботи устаткування, поліпшення технологічних процесів та використання новітніх методів обробки широко застосовуються термомеханічне зміцнення матеріалів під час прокатки.

Постійно зростаючі вимоги споживачів до якості прокату стимулюють глибоке вивчення впливу різноманітних факторів на кінцеві характеристики продукції. Разом зі збільшенням обсягів виробництва розширюється асортимент по розмірах та марках спеціальних сталей. Це вимагає розробки та впровадження нових технологій термомеханічної обробки, зокрема гартування в потоці прокатного стану.

Особливої актуальності набуває оптимізація процесів термомеханічної обробки сталей спеціального призначення, які широко застосовуються в різних галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Розробка технології гартування прокату нержавіючих сталей у потоці стану дозволяє підвищити ефективність виробництва за рахунок виключення окремої операції гартування з додаткового нагрівання.

Важливим аспектом є дослідження впливу параметрів термомеханічної обробки на структуру та механічні властивості нержавіючих сталей. Визначення оптимальних режимів нагрівання, прокатки та охолодження дозволяє забезпечити необхідний комплекс властивостей готового прокату. При цьому особлива увага приділяється вивченню механізмів зміцнення,

таких як подрібнення зерен аустеніту, збільшення щільності дислокацій та формування дрібнодисперсної мартенситної структури.

Актуальним завданням є також розробка математичних моделей, що описують взаємозв'язок між параметрами термомеханічної обробки та властивостями готового прокату. Це дозволяє оптимізувати технологічні режими та прогнозувати якість продукції. Використання комп'ютерного моделювання дає можливість визначити оптимальні параметри процесу, такі як температура деформації, ступінь деформації та швидкість охолодження, для досягнення бажаних механічних властивостей.

Отже, дослідження процесів термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей при прокатці, розробка нових технологій гартування в потоці стану та створення математичних моделей для оптимізації параметрів обробки є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить підвищити ефективність виробництва та якість металопродукції.

Об'єкт дослідження – сталі спеціального призначення 07Х18Н10 (EN 1.4301 – Євросоюз; AISI 304 – США) та 08Х17Н13М2Т (EN 1.4571 - Євросоюз; AISI 316Ti – США). Ці марки сталей обрані через їх широке застосування в промисловості та потенціал для покращення властивостей за допомогою термомеханічної обробки.

Предмет дослідження – процеси термомеханічного зміцнення сталей спеціального призначення при прокатці, включаючи високотемпературну (ВТМО) та низькотемпературну (НТМО) термомеханічну обробку.

Методи дослідження – експериментальні дослідження процесів обробки металів тиском, механічні випробування та дослідження структури спеціальних сталей; аналітичний розрахунок параметрів термомеханічної обробки; комп'ютерне моделювання процесів деформації та охолодження при прокатці з використанням методу кінцевих елементів.

***Наукова новизна одержаних результатів*:**

1. Вперше встановлено кількісні залежності між параметрами термомеханічної обробки та комплексом механічних властивостей

нержавіючих сталей 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т при прокатці на стані 550.

2. Розроблено математичні моделі процесу термомеханічного зміцнення, що дозволяють прогнозувати механічні властивості та структуру сталей.
3. Визначено оптимальні режими термомеханічної обробки для забезпечення стабільних показників якості прокату.
4. Встановлено закономірності формування структури та властивостей нержавіючих сталей при термомеханічному зміцненні в потоці прокатного стану.

Особистий внесок автора. Магістрант особисто планував та виконував наукові дослідження: проводив експериментальні дослідження процесів термомеханічного зміцнення; виконував механічні випробування та металографічний аналіз; здійснював математичну обробку результатів; розробляв технологічні режими обробки; брав участь у промислових випробуваннях розробленої технології.

Відомості про апробацію результатів роботи. Основні положення магістерської роботи представлені та обговорені на XVII університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2024», що проходила 17-22 квітня 2024 р. у Запорізькому національному університеті та INTERNATIONAL STUDENT PROFESSIONAL CREATIVE COMPETITION «MATERIALS SCIENCE» held at Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine, from January to June 2024

Відомості про публікації здобувача. За матеріалами магістерської роботи опубліковано 1 наукову працю, з них 1 тези доповіді у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг магістерської роботи. Кваліфікаційна робота включає 83 сторінок тексту, 16 рисунок, 15 таблиць, 35 використаних джерел.

1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ СТАЛЕЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1 Теоретичні основи термомеханічного зміцнення

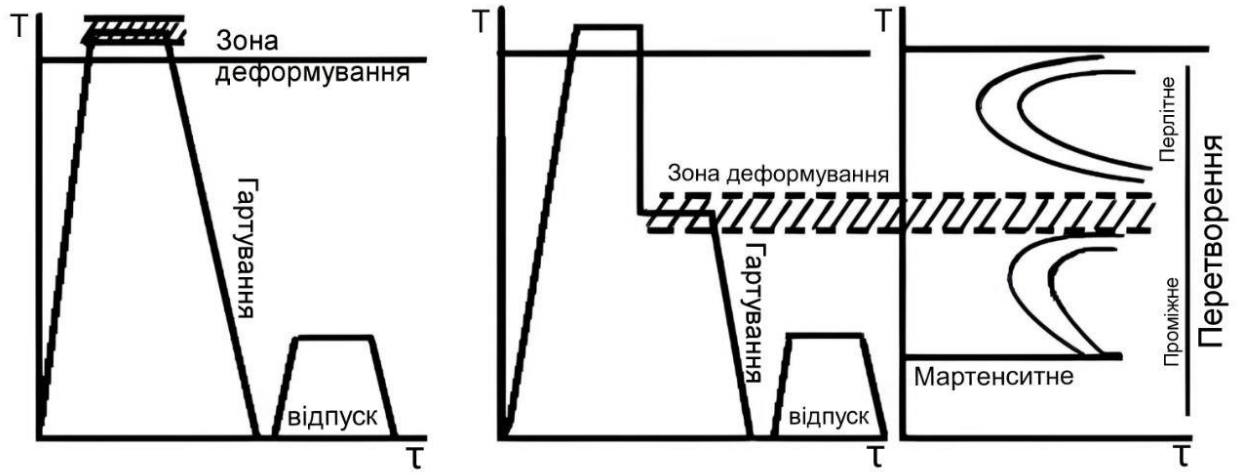
Термомеханічна обробка (ТМО) є одним із найефективніших технологічних процесів зміцнення металів і сплавів, що базується на фундаментальних принципах фізичного матеріалознавства. Сутність ТМО полягає у керованій зміні структури та властивостей матеріалів шляхом комбінованого впливу деформації і термічної обробки. Особливістю цього процесу є те, що пластична деформація здійснюється в температурних інтервалах, де можливе існування певних фаз або структурних станів.

Теоретичною основою ТМО є вчення про дислокації та їх взаємодію з точковими дефектами, границями зерен та фаз. При деформації в аустенітному стані відбувається істотне збільшення щільності дислокацій, яка може досягати 10^{11} - 10^{12} $см^{-2}$. Згідно з сучасними дослідженнями, характер цих змін суттєво залежить від температурно-швидкісних умов деформації та хімічного складу сталі (рис. 1.1).

Особливу роль у формуванні структури відіграє взаємодія дефектів кристалічної решітки з атомами легуючих елементів. У нержавіючих сталях атоми хрому та нікелю створюють локальні спотворення решітки, що призводить до формування атмосфер Коттрелла та вакансійно-домішкових комплексів. Це має принципове значення як для механічних властивостей, так і для забезпечення корозійної стійкості сталі, оскільки запобігає утворенню збіднених хромом зон поблизу границь зерен. Енергія такої взаємодії може сягати значних величин, що суттєво впливає на процеси динамічного повернення та рекристалізації.

Сучасні дослідження показують, що ефективність термомеханічної обробки значною мірою залежить від стану вакансійної підсистеми металу. При деформації концентрація вакансій може перевищувати рівноважну в 10^3-10^4 разів, що істотно прискорює дифузійні процеси. Це явище особливо важливе для нержавіючих сталей, де дифузія хрому визначає не тільки механічні властивості, але й корозійну стійкість.

Надлишкові вакансії активно взаємодіють з дислокаціями, утворюючи специфічні дефектні комплекси, які суттєво впливають на процеси повернення та рекристалізації. Енергія взаємодії вакансії з дислокацією може досягати 0,5-0,7 еВ, що призводить до формування стійких вакансійно-дислокаційних комплексів. Ці комплекси відіграють роль ефективних бар'єрів для руху дислокацій, підвищуючи опір пластичній деформації.



а *б*

а – високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО),

б – низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО)

Рисунок 1.1 – Схема режимів термомеханічної обробки сталі

В результаті такої складної взаємодії формується структура з підвищеною щільністю дислокацій та специфічним розподілом точкових дефектів, що забезпечує унікальне поєднання міцності та пластичності. При

цьому важливо контролювати температурно-часові параметри обробки, оскільки вони визначають кінетику анігіляції надлишкових вакансій та, відповідно, стабільність сформованої структури.

Особливу увагу варто приділити впливу швидкості деформації на механічні властивості. Як показано в дослідженнях [3], при збільшенні швидкості деформації спостерігається помітне зниження пластичності матеріалу. При цьому деформаційне зміцнення починає помітно знижуватися в певному температурному діапазоні з одночасним істотним підвищенням пластичності. Це явище пов'язане з процесами динамічної полігонізації, що стабілізують структурний стан сплаву.

Зміцнення при ТМО забезпечується кількома фундаментальними механізмами. Перший - це подрібнення зерна аустеніту в процесі деформації. При цьому розміри блоків зменшуються в 2-4 рази порівняно зі звичайним гартуванням. Другий механізм пов'язаний зі збільшенням щільності дислокацій та формуванням специфічної дислокаційної субструктури. Третім важливим фактором є утворення більш дрібних пластин мартенситу при гартуванні деформованого аустеніту.

Детальний аналіз механізмів зміцнення при термомеханічній обробці показує їх складну взаємодію та взаємовплив. Субструктурне зміцнення, що є одним з ключових механізмів, пов'язане з формуванням розвиненої субзеренної структури. При цьому розмір субзерен (d) визначається умовами деформації і може бути описаний співвідношенням:

$$d = K \cdot \exp(-\frac{Q}{RT}) \cdot \varepsilon^{-n}$$

де K – константа матеріалу,

Q – енергія активації,

R – газова стала,

T – температура деформації,

ε – ступінь деформації,

n – показник степені (зазвичай 0,3-0,5).

Дислокаційне зміцнення реалізується через формування специфічних дислокаційних структур. Важливо відзначити, що характер розподілу дислокацій суттєво впливає на механічні властивості - рівномірний розподіл забезпечує краще поєднання міцності та пластичності порівняно з локалізованим скупченням дислокацій. Важливо відзначити, що характер розподілу дислокацій суттєво впливає на механічні властивості - рівномірний розподіл забезпечує краще поєднання міцності та пластичності порівняно з локалізованим скупченням дислокацій.

Особливу роль відіграє дисперсійне твердіння, яке при ТМО має свої особливості. Деформація прискорює процеси виділення дисперсних фаз, змінює їх морфологію та характер розподілу. Оптимальний режим ТМО забезпечує формування дрібнодисперсних (20-50 нм) частинок карбідів та інтерметалідів, рівномірно розподілених в об'ємі металу.

Розмір мартенситних пластин, що формуються при охолодженні деформованого аустеніту, також істотно впливає на механічні властивості. Деформація призводить до подрібнення пакетів мартенситу та зменшення розміру окремих пластин, що сприяє підвищенню міцності без значного зниження пластичності. При цьому спостерігається зменшення ширини мартенситних пластин в 1,5-2 рази порівняно зі звичайним гартуванням.

Важливо підкреслити, що всі ці механізми зміцнення діють одночасно та взаємно впливають один на одного. Наприклад, підвищена щільність дислокацій прискорює процеси дисперсійного твердіння, а формування дрібнодисперсних частинок, в свою чергу, впливає на рухливість дислокацій. Така складна взаємодія різних механізмів зміцнення забезпечує унікальний комплекс механічних властивостей, що досягається при ТМО.

Кількісні дослідження дозволили встановити чіткі співвідношення між параметрами структури та механічними властивостями при різних режимах

термомеханічної обробки. Субзеренна структура, що формується при ТМО, характеризується певною ієрархією: мікродвійники створюють первинні бар'єри для руху дислокацій, границі субзерен формують вторинну систему перешкод, а межі зерен завершують цю ієрархічну структуру. Така багаторівнева система бар'єрів забезпечує ефективне блокування руху дислокацій та підвищення міцності.

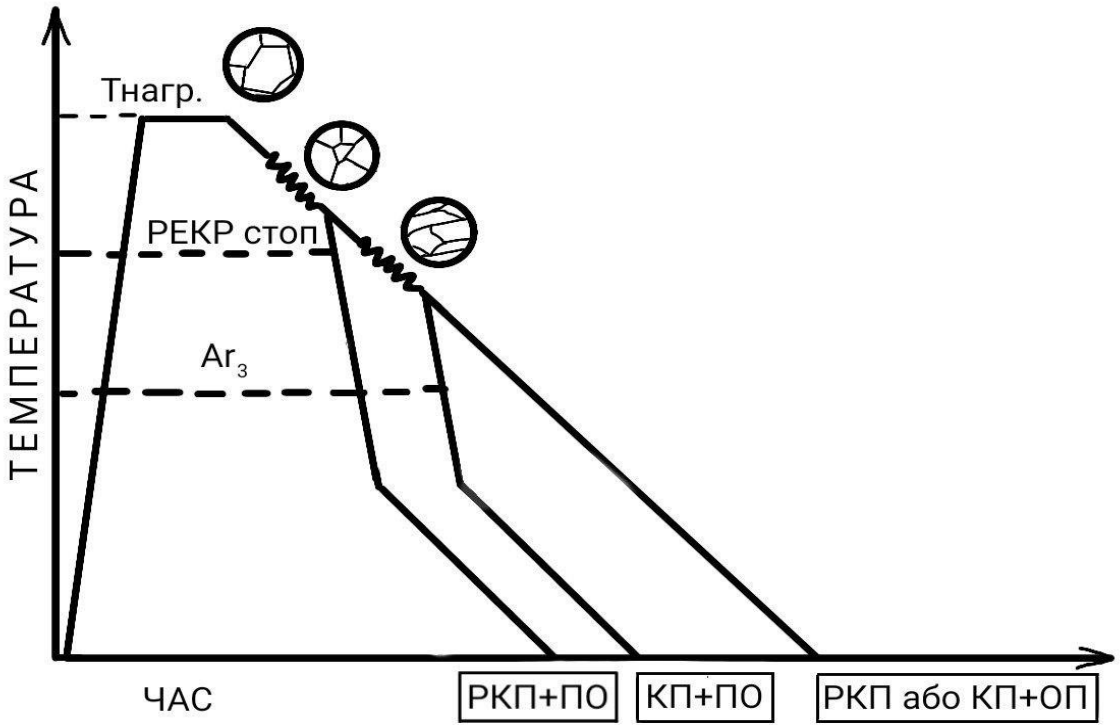
Особливий інтерес представляє явище структурної спадковості при ТМО. Встановлено, що характер розподілу дефектів у деформованому аустеніті значною мірою визначає морфологію та властивості продуктів розпаду при подальшому охолодженні. Наприклад, місця скупчення дислокацій часто стають переважними центрами зародження нових фаз, що дозволяє керувати процесом структуроутворення шляхом створення певного розподілу дефектів при деформації.

При оптимізації режимів ТМО важливо враховувати температурну стабільність сформованої структури. Дослідження показують, що найбільш стійкими є структури, в яких реалізується комплексне зміцнення за рахунок формування розвиненої субструктури та виділення дисперсних фаз. Такі структури зберігають підвищений рівень міцності навіть після тривалого впливу підвищених температур, що особливо важливо для деталей, що працюють в умовах термічних навантажень.

Сучасні методи аналізу дозволили встановити, що ефективність різних механізмів зміцнення залежить від масштабного рівня структурних елементів. На нанорівні (до 100 нм) переважає дисперсійне зміцнення та блокування дислокацій точковими дефектами. На мікрорівні (0,1-10 мкм) основну роль відіграє субструктурне зміцнення. На мезорівні (більше 10 мкм) визначальним стає зернограничне зміцнення. Врахування цієї ієрархії дозволяє розробляти режими ТМО, що забезпечують оптимальне поєднання різних механізмів зміцнення.

Особливу роль у процесах зміцнення відіграють когерентні границі розділу фаз. Дослідження показують, що формування ієрархічно

структурованої мікроструктури з когерентними міжфазними границями сприяє активації множинних механізмів деформації, включаючи дислокації, дефекти упаковки та двійникування (рис. 1.2).



РКП – рекристалізаційна контрольована прокатка;

ПО – прискорене охолодження;

КП – контрольована прокатка;

ОП – охолодження на повітрі;

РЕКРстоп – температура кінця рекристалізації.

Рисунок 1.2 – Термомеханічні обробки [2]

Теоретичний аналіз показує, що внесок різних механізмів зміцнення може бути представлений у вигляді адитивної моделі:

$$\sigma_{заг} = \sigma_т + \sigma_д + \sigma_з + \sigma_ф,$$

де $\sigma_т$ – термічний компонент зміцнення;

$\sigma_д$ – дислокаційне зміцнення;

$\sigma_з$ – зернограничне зміцнення;

$\sigma_ф$ – фазове зміцнення.

Кожен з цих компонентів має свою температурну і швидкісну залежність, що дозволяє керувати процесом зміцнення шляхом вибору відповідних параметрів обробки. У таблиці 1.1 наведено типові значення механічних властивостей, які досягаються при різних режимах ТМО.

Таблиця 1.1 - Механічні властивості сталей після ТМО [2]

Вид обробки	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %
НТМО	2400-2900	2000-2400	5-8	15-30
ВТМО	2100-2700	1900-2200	7-9	25-40
ТО	1400	1100	2	3

Дослідження останніх років значно поглибили розуміння механізмів зміцнення при термомеханічній обробці. Особливу увагу приділяють еволюції дислокаційної структури в процесі деформації та подальшої термічної обробки. При пластичній деформації в аустенітній області відбувається не лише збільшення щільності дислокацій, але й формування специфічної дислокаційної субструктури, характер якої істотно впливає на кінцеві властивості матеріалу.

Зміна щільності дислокацій ρ у процесі деформації може бути описана рівнянням:

$$\frac{d_\rho}{d_\varepsilon} = M\left(k_1\sqrt{\rho} - k_2\rho\right)$$

де ε – ступінь деформації;

M – коефіцієнт Тейлора;

k_1 та k_2 – коефіцієнти генерації та анігіляції дислокацій відповідно.

При цьому внесок дислокаційного зміцнення у загальне зміцнення описується співвідношенням:

$$\sigma_д = \alpha G b \sqrt{\rho}$$

де α – константа взаємодії дислокацій;

G – модуль зсуву;

b – вектор Бюргерса.

Енергія такої взаємодії може сягати значних величин, що суттєво впливає на процеси динамічного повернення та рекристалізації. Швидкість деформації також має визначальний вплив на формування структури через зміну балансу між процесами зміцнення та динамічного повернення. При оптимальних швидкостях деформації (10^{-3}-10^{-1} $с^{-1}$) досягається баланс між процесами генерації та анігіляції дефектів, що забезпечує формування однорідної субзеренної структури. При високих швидкостях деформації спостерігається адіабатичне розігрівання, що може призводити до локалізації деформації та формування неоднорідної структури.

Розмір зерна при термомеханічній обробці також істотно впливає на механічні властивості. Згідно із співвідношенням Холла-Петча, межа текучості матеріалу обернено пропорційна кореню квадратному з розміру зерна:

$$\sigma_т = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

де σ_0 - напруження тертя решітки;

k – коефіцієнт зернограничного зміцнення;

d – розмір зерна.

Це співвідношення пояснює високу ефективність термомеханічної обробки, яка забезпечує формування дрібнозернистої структури.

Важливим теоретичним аспектом є взаємозв'язок між параметрами деформації та кінетикою фазових перетворень. При деформації аустеніту відбуваються значні зміни як у його структурі, так і в термодинамічних та кінетичних характеристиках подальших перетворень. Особливу роль відіграє взаємодія дислокацій з границями зерен та фаз, що призводить до формування специфічної субструктури. Це впливає на температурні інтервали фазових перетворень та морфологію продуктів розпаду аустеніту при подальшому охолодженні.

Сучасна теорія ТМО також враховує вплив легуючих елементів на процеси деформаційного зміцнення та фазові перетворення. Особливо це важливо для високолегованих сталей, де взаємодія дислокацій з атомами легуючих елементів може суттєво впливати на механізми зміцнення. Для нержавіючих сталей важливу роль відіграють елементи, що стабілізують аустеніт та впливають на кінетику карбідоутворення.

Таким чином, теоретичні основи ТМО охоплюють широкий спектр фізичних явищ та механізмів, розуміння яких дозволяє цілеспрямовано керувати структурою та властивостями сталей. Постійний розвиток теоретичних уявлень, підкріплений експериментальними дослідженнями, відкриває нові можливості для вдосконалення технологій термомеханічного зміцнення.

Розвиток теоретичних уявлень про процеси термомеханічного зміцнення тісно пов'язаний із впровадженням сучасних методів дослідження структури. Використання просвічувальної електронної мікроскопії високої роздільної здатності дозволило вивчити тонку структуру матеріалу на нанорівні та встановити механізми формування субзеренних границь. Методи дифракції зворотно-розсіяних електронів (EBSD-аналіз) надали можливість кількісно оцінити розподіл розорієнтувань границь та їх еволюцію в процесі деформації.

Особливу роль у розумінні процесів структуроутворення відіграють in-situ методи дослідження, які дозволяють спостерігати за змінами структури безпосередньо під час деформації та термічної обробки. Застосування синхротронного випромінювання дає можливість вивчати кінетику фазових перетворень та формування дислокаційної структури в режимі реального часу. Це дозволило уточнити існуючі теоретичні моделі та розробити нові підходи до оптимізації режимів ТМО.

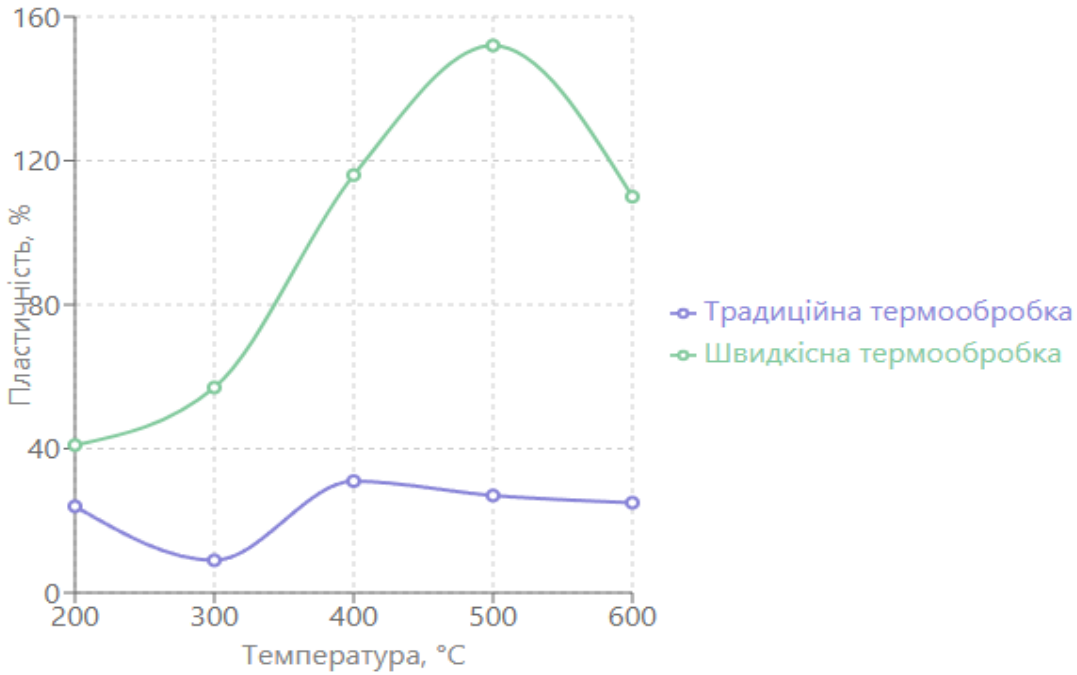
1.2 Методи термомеханічного зміцнення матеріалів

Сучасне матеріалознавство використовує різні методи термомеханічного зміцнення, які відрізняються температурно-часовими режимами, характером деформації та послідовністю операцій. Вибір конкретного методу залежить від хімічного складу сталі, вимог до кінцевих властивостей та технологічних можливостей обладнання.

Одним з базових методів є високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО), яка включає нагрівання сталі до температури аустенітного стану (вище точки Ac3), деформацію при цій температурі та негайне гартування деформованої сталі. При такій обробці відбувається суттєве подрібнення зерна за рахунок багаторазової постдинамічної рекристалізації після кожного проходу деформації. Особливістю ВТМО є її здатність практично повністю усувати розвиток відпускної крихкості та знижувати температурний поріг холодноламкості.

Альтернативним методом є низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО), також відома як аусформінг. При цьому методі сталь після аустенітизації охолоджують до температури вище початку мартенситного перетворення (400-600°C), здійснюють деформацію і проводять гартування. НТМО забезпечує більш високе зміцнення порівняно з ВТМО, однак вимагає значних ступенів деформації (75-95%) та потужного обладнання.

Дослідження [7] показали, що використання швидкісної термічної обробки дозволяє подолати традиційний компроміс між міцністю та пластичністю. При цьому досягається підвищення ударної в'язкості більш ніж на 43% при рівні міцності 1,7 ГПа та покращення міцності більш ніж на 0,5 ГПа при постійній в'язкості 30 Дж.



Рискнок 1.3 – Графік залежності міцності та пластичності [1]

Значний вплив на формування структури має тиск при термічній обробці. Встановлено, що термічна обробка під високим тиском (ВТВТ) дозволяє трансформувати традиційну двофазну пластинчасту структуру в ієрархічно структуровану мікроструктуру з когерентними міжфазними границями. Це забезпечує більш рівномірний розподіл деформації та активацію множинних механізмів зміцнення [6]

Особливе місце серед методів термомеханічного зміцнення займає контрольована прокатка. Цей метод дозволяє отримати оптимальне поєднання міцності та пластичності за рахунок формування дрібнозернистої структури безпосередньо під час гарячої деформації. Процес включає деформацію при температурах 1150-1000°C для первинного подрібнення

зерна, подальше охолодження до 950-900°С та остаточну деформацію при 900-800°С, що забезпечує формування кінцевої дрібнозернистої структури.

Для нержавіючих сталей аустенітного класу, таких як 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т, термомеханічна обробка має ряд особливостей. Для нержавіючих сталей аустенітного класу критично важливим є прецизійний контроль температури деформації. Сучасні системи контролю, оснащені пірометрами з точністю до ±5°С, дозволяють запобігти утворенню δ-фериту та виділенню карбідів хрому по границях зерен. Це має принципове значення для збереження високої корозійної стійкості сталі, оскільки відхилення від оптимального температурного режиму може призвести до формування небажаних фаз та суттєвого погіршення експлуатаційних властивостей.

Сучасні тенденції розвитку методів термомеханічного зміцнення пов'язані з розробкою комбінованих схем обробки. Показовим прикладом є процес Сумітомо, який дозволяє реалізувати комплексне зміцнення за рахунок одночасної дії кількох механізмів. В процесі Сумітомо використовуються ефекти подрібнення зерна, деформаційного наклепу та фазових перетворень, що забезпечує високі показники міцності при збереженні достатньої пластичності.

Важливим напрямком розвитку методів ТМО є впровадження автоматизованих систем керування процесом. Це дозволяє точно контролювати температурно-швидкісні параметри обробки та забезпечувати стабільність властивостей готової продукції. Особлива увага приділяється розробці нових режимів термомеханічної обробки, які дозволяють знизити енергоємність процесу при збереженні високого рівня механічних характеристик.

Сучасне промислове виробництво активно впроваджує нові технологічні рішення у сфері термомеханічного зміцнення. Особливу увагу приділяють створенню гнучких технологічних ліній, що дозволяють швидко адаптувати параметри обробки під різні марки сталей. Такі лінії оснащуються системами online-моніторингу, які в режимі реального часу контролюють:

- температуру металу на всіх етапах обробки
- зусилля та швидкість деформації
- розподіл температури по перерізу заготовки
- кінетику охолодження після деформації

Значний прогрес досягнуто у розробці систем прискореного охолодження. Сучасні установки використовують комбіновані схеми охолодження, що включають:

- спреєве водяне охолодження з регульованою інтенсивністю
- повітряне охолодження з можливістю зміни швидкості потоку
- комбіноване водоповітряне охолодження з програмованим керуванням

Це дозволяє створювати оптимальні умови для формування заданої структури та властивостей в різних зонах виробу.

Автоматизація процесу ТМО включає також системи адаптивного керування, які корегують режими обробки на основі аналізу поточних параметрів процесу. Такі системи використовують математичні моделі, що враховують:

- хімічний склад сталі
- геометричні розміри заготовки
- поточні значення контрольованих параметрів
- статистичні дані про результати попередніх обробок

Це значно підвищує стабільність властивостей та знижує відсоток браку при виробництві.

Економічна ефективність сучасних методів термомеханічного зміцнення досягається за рахунок декількох факторів. По-перше, суміщення операцій деформації та термічної обробки дозволяє знизити енергоспоживання на 25-30% порівняно з традиційними технологіями. По-друге, скорочується загальний час виробничого циклу, що підвищує продуктивність обладнання. Розрахунки показують, що впровадження сучасних методів ТМО може знизити собівартість продукції на 15-20%.

Важливим аспектом розвитку методів ТМО є їх екологічна спрямованість. Сучасні технологічні лінії проектуються з урахуванням жорстких екологічних вимог:

- впроваджуються системи рециркуляції охолоджувальної води
- встановлюються високоефективні фільтри для очищення повітря
- використовуються енергозберігаючі нагрівальні пристрої
- застосовуються екологічно безпечні мастильні матеріали

Особливу увагу приділяють розробці технологій з мінімальним утворенням окалини. Це досягається за рахунок:

- використання захисних атмосфер при нагріванні
- оптимізації температурно-часових параметрів обробки
- застосування спеціальних покриттів на поверхні заготовок

Одним з перспективних напрямків є створення гібридних технологій ТМО, які поєднують класичні методи з новими видами впливу на метал. Наприклад:

- ультразвукова обробка в процесі деформації
- електропластична деформація
- магнітно-імпульсна обробка
- плазмове модифікування поверхні

Такі технології дозволяють отримати унікальні комбінації властивостей, недосяжні при використанні традиційних методів ТМО.

1.3 Підвищення експлуатаційних властивостей сталей спеціального призначення

Експлуатаційні властивості сталей спеціального призначення визначаються комплексом механічних, фізичних та хімічних характеристик, що забезпечують їх надійну роботу в конкретних умовах експлуатації. Термомеханічна обробка дозволяє цілеспрямовано впливати на ці характеристики шляхом формування оптимальної структури матеріалу.

Основою підвищення експлуатаційних властивостей є формування дрібнозернистої структури з високою щільністю дислокацій та рівномірним розподілом дисперсних фаз. При цьому особливу увагу приділяють стабільності структури при робочих температурах. Дослідження показують, що для нержавіючих сталей аустенітного класу найбільш ефективним є комплексний підхід до зміцнення, який включає оптимізацію хімічного складу та параметрів термомеханічної обробки.

За даними досліджень [5], обробка при тиску 6 ГПа та температурі 1473 К дозволяє отримати унікальну ієрархічно організовану структуру з когерентними міжфазними границями. Така структура забезпечує збільшення пластичності в 2 рази при одночасному підвищенні міцності, що раніше вважалося неможливим.

Дослідження механізмів руйнування [5] показали, що в матеріалах, оброблених під високим тиском, спостерігається рівномірний розподіл мікротріщин та більш однорідна морфологія поверхні руйнування. Замість видовжених тріщин вздовж границь розділу формуються численні ізольовані мікротріщини, що перетинають B2-фазу, а шляхи руйнування викривляються між двома фазами.

Комплексні дослідження (Uranga and Rodríguez-Ibabe) демонструють, що оптимізація параметрів термомеханічної обробки повинна враховувати:

- температурний інтервал деформації
- швидкість охолодження після деформації
- ступінь накопиченої деформації
- режим завершальної термічної обробки

Особливо важливим є контроль карбідоутворення в нержавіючих сталях. За даними [7], швидкість охолодження після деформації повинна забезпечувати формування дрібнодисперсних карбідів, рівномірно розподілених в структурі, замість крупних виділень по границях зерен.

Важливим етапом у розвитку технологій термомеханічного зміцнення стало дослідження еволюції дислокаційної структури при різних режимах

обробки. За даними [3], щільність дислокацій може істотно змінюватися залежно від температурно-швидкісних умов деформації. У ФЦК фазі щільність дислокацій швидко зростає з 3.53×10^{14} м$^{-2}$ до 11.78×10^{14} м$^{-2}$ при деформації до 15%, тоді як в ОЦК фазі збільшення відбувається повільніше - з 3.44×10^{14} м$^{-2}$ до 8.56×10^{14} м$^{-2}$.

Суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик вдається досягти при використанні багатостадійних режимів термомеханічної обробки. При цьому на кожному етапі вирішуються конкретні завдання щодо формування структури та властивостей. Наприклад, попередня деформація при підвищених температурах забезпечує подрібнення зерна, тоді як завершальна обробка при знижених температурах сприяє формуванню розвиненої дислокаційної субструктури.

Особливу увагу при розробці режимів термомеханічної обробки приділяють забезпеченню стабільності структури та властивостей в процесі експлуатації. Це досягається шляхом оптимізації співвідношення між різними структурними складовими та механізмами зміцнення. За даними досліджень [5], формування когерентних міжфазних границь забезпечує не тільки підвищення міцності, але й стабільність структури при циклічних навантаженнях.

Для нержавіючих сталей аустенітного класу критично важливим є збереження високої корозійної стійкості після термомеханічної обробки. Згідно з дослідженнями [7], швидкість охолодження після деформації має вирішальний вплив на розподіл хрому в структурі сталі. При оптимальних режимах охолодження забезпечується рівномірний розподіл легуючих елементів, що запобігає локальній сенсибілізації та розвитку корозійних процесів.

Сучасні дослідження [3] показують перспективність використання нових схем термомеханічної обробки, що включають елементи інтенсивної пластичної деформації. У діапазоні швидкостей деформації 10^{-4} - 10^{-2} с$^{-1}$ спостерігається найкраще поєднання механічних властивостей, що пов'язано

з формуванням оптимальної дислокаційної структури. При цьому важливо забезпечити стабільність отриманої структури при робочих температурах, що досягається оптимізацією режимів завершальної термічної обробки.

Розвиток методів термомеханічної обробки тісно пов'язаний із впровадженням нових технологічних рішень та обладнання. Сучасні установки для термомеханічної обробки оснащуються системами автоматичного контролю та регулювання параметрів процесу, що дозволяє з високою точністю витримувати задані режими обробки. Як показано в роботі [5], для забезпечення високого тиску при термічній обробці ефективним є використання багатопуансонних апаратів, що дозволяють створювати тиск до 6 ГПа при температурах до 1473 К.

Важливим напрямком є розробка комбінованих методів зміцнення, що поєднують термомеханічну обробку з іншими видами впливу на матеріал. Дослідження [7] демонструють, що швидкісна термічна обробка в поєднанні з контрольованою деформацією дозволяє досягти унікального поєднання міцності та в'язкості. При цьому спостерігається зменшення схильності до відпускної крихкості та покращення комплексу механічних властивостей.

Підвищення експлуатаційних властивостей сталей спеціального призначення також досягається за рахунок оптимізації хімічного складу та використання нових систем легування. За даними (Uranga and Rodríguez-Ibabe), легування мікродобавками дозволяє суттєво впливати на процеси структуроутворення при термомеханічній обробці та підвищувати стабільність структури при експлуатації. При цьому важливо забезпечити збалансоване співвідношення легуючих елементів для досягнення необхідного комплексу властивостей.

Перспективним напрямком є розробка адаптивних технологій термомеханічної обробки, що дозволяють корегувати параметри процесу в залежності від фактичного стану матеріалу. Це досягається за рахунок використання систем онлайн-моніторингу структури та властивостей, як показано в дослідженнях [3]. Такий підхід особливо ефективний при обробці

великогабаритних виробів, де важливо забезпечити рівномірність властивостей по всьому об'єму.

1.4 Висновки та постановка завдань дослідження

Проведений аналіз наукової літератури показує, що термомеханічна обробка є потужним інструментом для покращення властивостей нержавіючих сталей. За останні роки досягнуто значного прогресу в розумінні процесів, що відбуваються при поєднанні деформації та термічної обробки. Це дозволило розробити нові, більш ефективні методи зміцнення матеріалів.

Особливий інтерес представляють нержавіючі сталі аустенітного класу 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т, які широко використовуються в різних галузях промисловості. Аналіз показує, що правильно підібрані режими термомеханічної обробки дозволяють істотно підвищити їх експлуатаційні характеристики. При цьому важливо ретельно контролювати температуру обробки та швидкість охолодження, щоб зберегти високу корозійну стійкість цих сталей.

Сучасні технологічні процеси, такі як контрольована прокатка та процес Сумітомо, відкривають нові можливості для управління структурою та властивостями металу. Проте їх впровадження в промислове виробництво вимагає вирішення ряду складних наукових та технічних завдань. Зокрема, недостатньо вивчені закономірності формування структури в умовах реального виробництва, де параметри обробки можуть відхилятися від ідеальних.

Аналіз літературних даних також показує, що існуючі технологічні схеми виробництва прокату не повністю використовують потенціал термомеханічного зміцнення. Це пов'язано з відсутністю надійних критеріїв вибору оптимальних режимів обробки та математичних моделей для прогнозування кінцевих властивостей. Особливо гостро стоїть питання

забезпечення стабільності властивостей по перерізу прокату та їх відтворюваності в промислових умовах.

На основі виявлених проблем сформульовано мету роботи - розробка та удосконалення технології термомеханічного зміцнення прокату нержавіючих сталей у потоці прокатного стана 550 для забезпечення показників якості у готовому прокаті на рівні загартованих зразків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити вплив параметрів термомеханічної обробки на формування структури та властивостей нержавіючих сталей, приділяючи особливу увагу температурі, ступеню та швидкості деформації.

- провести порівняльний аналіз різних режимів обробки та вибрати найбільш ефективну технологію зміцнення, враховуючи особливості прокатного виробництва в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь».

- використовуючи методи математичного планування експерименту, оптимізувати параметри процесу для забезпечення стабільно високих показників якості.

- встановити взаємозв'язок між структурою металу та його механічними властивостями, що дозволить краще контролювати процес зміцнення.

- розробити практичні рекомендації та математичні моделі для впровадження розробленої технології у прокатне виробництво ПрАТ «Дніпроспецсталь».

Вирішення цих завдань дозволить не тільки покращити якість продукції, але й зробити процес термомеханічного зміцнення більш економічним. Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення технологій виробництва широкого спектру виробів з нержавіючих сталей.

2 ОБГРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методика теоретичних та практичних досліджень

Методологічною основою роботи є системний підхід до вивчення процесів термомеханічного зміцнення (ТМО) нержавіючих сталей, що базується на фундаментальних принципах фізичного матеріалознавства та сучасних досягненнях у цій галузі.

Теоретична складова ґрунтується на аналізі існуючих моделей деформаційного зміцнення [21] та механізмів структуроутворення при ТМО. Значна увага приділяється встановленню залежностей між параметрами обробки та кінцевими властивостями матеріалу. Математичне моделювання надає можливість прогнозувати результати та оптимізувати технологічні параметри.

Експериментальна частина виконується з використанням повного факторного експерименту за методом Бокса-Уілсона, що сприяє визначенню оптимальних параметрів при мінімальній кількості випробувань. Основними факторами впливу обрано: мінімальний час нагріву у томильній зоні, загальний час нагріву та температуру кінця прокатки. Це забезпечує можливість встановлення кількісних залежностей між режимами обробки та властивостями матеріалу.

Вивчення структури металу проводиться сучасними методами металографічного аналізу. Оптична мікроскопія визначає розмір зерна та загальні особливості будови, тоді як електронна мікроскопія розкриває тонку структуру матеріалу. Рентгеноструктурний аналіз застосовується для виявлення фазового складу та оцінки внутрішніх напружень.

Механічні характеристики сталей визначаються згідно з вимогами ДСТУ на сучасному випробувальному обладнанні. Універсальна випробувальна машина з точністю вимірювання зусилля ±0,5% гарантує

достовірне визначення показників міцності та пластичності. Оцінка в'язкості здійснюється на маятниковому копрі з енергією удару до 300 Дж.

Контроль температурних режимів забезпечується комплексом вимірювальних приладів. Стаціонарні пірометри здійснюють постійний моніторинг температури металу з точністю ±5°С, а переносний пірометр "Промінь" фіксує локальні значення в ключових точках технологічного циклу. Система термопар контролює температурний режим у нагрівальній печі.

Обробка експериментальних даних виконується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Це забезпечує побудову регресійних моделей, проведення статистичного аналізу та оптимізацію параметрів. Візуалізація результатів сприяє виявленню прихованих закономірностей між параметрами.

Достовірність результатів підтверджується застосуванням стандартизованих методик та статистичною обробкою даних. Перевірка адекватності математичних моделей здійснюється за критерієм Фішера, а оцінка значущості коефіцієнтів регресії - за критерієм Стьюдента.

На підставі попередніх випробувань та виробничого досвіду встановлено оптимальні діапазони варіювання факторів експерименту: час витримки у томильній зоні - 40-50 хвилин, загальний час нагріву - 160-210 хвилин, температура кінця прокатки - 1020-1100°С. Такі параметри гарантують стабільність зміцнення та високу якість продукції.

Ключовим етапом роботи є оцінка механічних властивостей металу після обробки. Розроблена схема передбачає комплексне вивчення характеристик міцності, пластичності та в'язкості. Випробування на розтяг виконуються на зразках згідно з ДСТУ.

Особливу увагу приділено визначенню ударної в'язкості як критично важливого показника експлуатаційної надійності виробів. Випробування проводяться на стандартних зразках з V-подібним надрізом за кімнатної

температури. Для забезпечення точності вимірювань від кожної партії металу аналізується не менше трьох зразків.

Металографічний аналіз включає підготовку мікрошліфів за стандартною технологією та їх травлення у спеціальних реактивах. Структура нержавіючих сталей виявляється методом електролітичного травлення, що чітко окреслює границі зерен та структурні складові. Мікроструктура вивчається при збільшеннях від 100 до 1000 крат.

Кількісна оцінка структурних параметрів здійснюється методами комп'ютерного аналізу зображень, що автоматизує процес вимірювання розміру зерна. Спеціалізоване програмне забезпечення будує гістограми розподілу та виконує статистичну обробку даних.

Математична обробка результатів базується на сучасних методах аналізу. Кожна серія випробувань супроводжується розрахунком середніх значень параметрів, середньоквадратичних відхилень та довірчих інтервалів. Вплив технологічних факторів оцінюється за допомогою дисперсійного аналізу

Для математичної обробки результатів експерименту використовуються основні залежності.

Формула (2.1) використовується для визначення похибки експерименту при дублюванні дослідів.

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Y_{oi} - Y_o)^2}{f_1} \qquad (2.1)$$

де n – кількість дублів на основному рівні;

i – номер дублю;

Y_{oi} – значення параметра оптимізації в і-ом дублі;

Y_o – середнє арифметичне результатів усіх дублів;

f_1 – число ступіней свободи $(f_1 = n - 1)$.

Розрахунок коефіцієнтів регресії рівняння при використанні ПФЕ виконується за формулою (2.2).

$$b_{j=}\sum_{j=1}^{n}\frac{X_{jn}\cdot Y_n}{N} \tag{2.2}$$

де b_j – значення j-го коефіцієнту регресії;

X_{jn} – значення j-го фактору в n-ом досліді в кодованому вигляді;

Y_n – значення параметру оптимізації в n-ом досліді;

N – число дослідів в матриці планування.

Для оцінки дисперсії неадекватності застосовується формула (2.3), а розрахункове значення критерію Фішера визначається за формулою (2.4).

$$S^2_{\text{неад}}=\frac{\sum_{n=1}^{N}\left(y_n^{\text{экспер}}-y_n^{\text{расч}}\right)^2}{f_2} \tag{2.3}$$

де $f_2 = N – K'$, K' – число коефіцієнтів моделі, включи b_0.

$$F^{\text{расч}}_{f1,f2}=\frac{S^2_{\text{неад}}}{S^2_y} \tag{2.4}$$

Отримане значення порівнюється з табличним для перевірки адекватності моделі..

Запропонована методика забезпечує отримання повної інформації щодо впливу режимів ТМО на властивості нержавіючих сталей. Математичні моделі, побудовані на основі експериментальних даних, створюють наукове підґрунтя для оптимізації технології та стабільного забезпечення високої якості продукції.

2.2 Технологія та обладнання стану 550 ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Об’єктом дослідження є середньосортовий прокатний стан ПрАТ «Дніпроспецсталь». Прокатний стан 550 призначений для виробництва сортового прокату широкого асортименту. Основу стану складають чотири робочі кліті, розміщені в одну лінію, де перша виконує обтискну функцію, друга і третя - чорнову, а четверта - чистову прокатку. Максимальний переріз заготовки становить 185×185 мм, мінімальний - 140×140 мм, при довжині від 2 до 6 метрів.

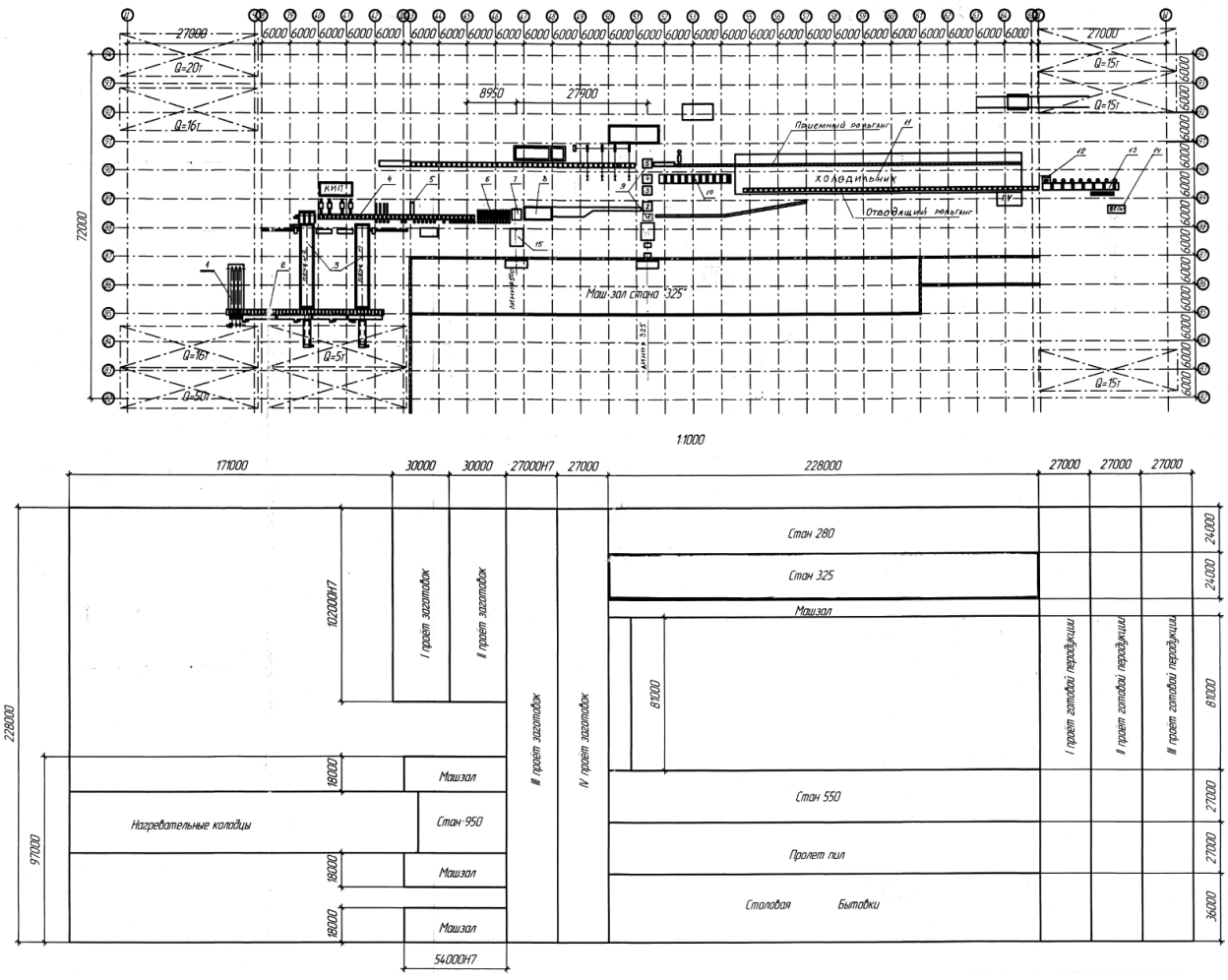


Рисунок 2.1 – Структура прокатного цеху

Дослідження проводились на нержавіючих сталях аустенітного класу спеціального призначення марок 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т з сортаменту

стану 550. Згідно з ТР 62-01, гартування прокату діаметром 45-130 мм здійснювалось у потоці стану 550 без спеціального нагрівання.

Сталь 07Х18Н10 належить до сталей спеціального призначення аустенітного класу. Завдяки особливому хімічному складу з 17-19% Cr та 9-11% Ni сталь має спеціальні властивості: високу корозійну стійкість в особливо агресивних середовищах, жароміцність до 600°С та специфічні немагнітні характеристики. Ці властивості визначають її застосування у відповідальних вузлах обладнання хімічної промисловості, в атомній енергетиці, медичному обладнанні та спеціальному приладобудуванні.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 07Х18Н10, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
до 0,07	до 0,8	до 2	9-11	до 0,02	до 0,035	17-19	до 0,5	до 0,3

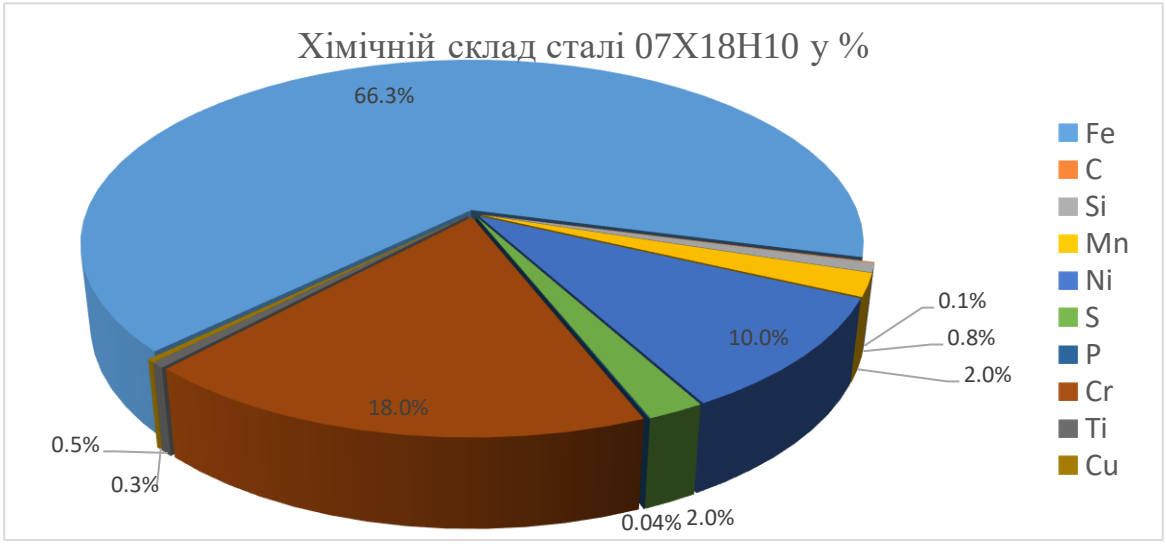


Рисунок 2.2 – Хімічній склад сталі 07Х18Н10

Сталь 08Х17Н13М2Т також відноситься до сталей спеціального призначення з більш високими експлуатаційними характеристиками. Підвищений вміст нікелю (12-14%) та легування молібденом (2-3%) і титаном забезпечують особливі властивості: надвисоку корозійну стійкість в окисних середовищах, стійкість до міжкристалітної корозії, жаростійкість та

довговічність при циклічних навантаженнях. Ці характеристики роблять сталь незамінною для виготовлення особливо відповідальних деталей в атомній енергетиці, хімічному машинобудуванні та обладнанні нафтопереробної промисловості.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сталі 08Х17Н13М2Т, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu	Mo
до 0,08	до 0,8	до 2	12-14	до 0,02	до 0,035	16-18	до 0,7	до 0,3	2-3

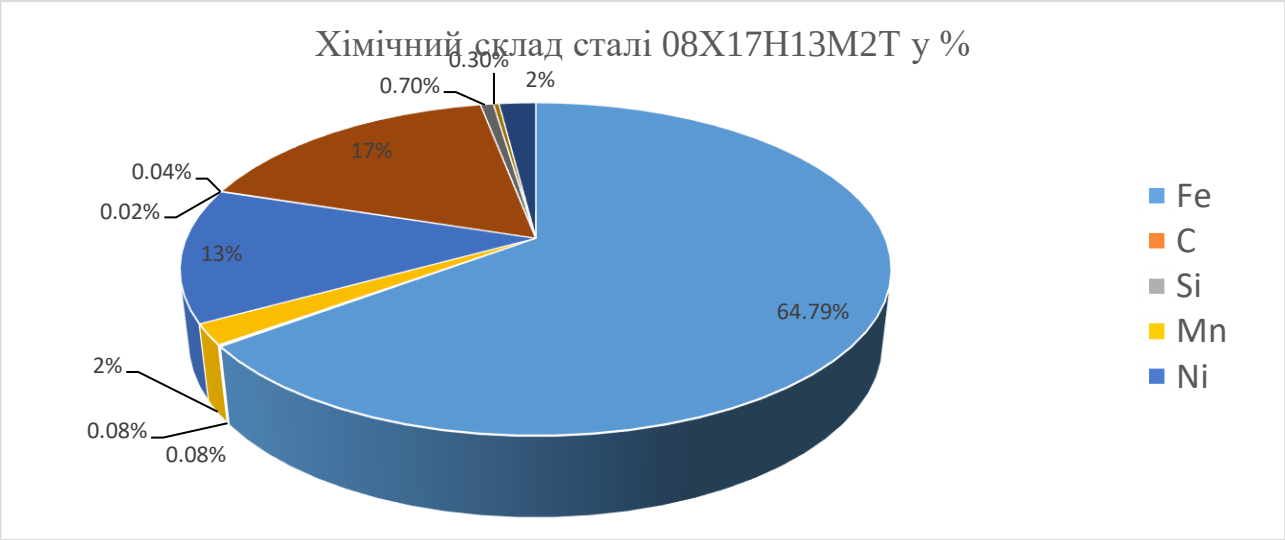


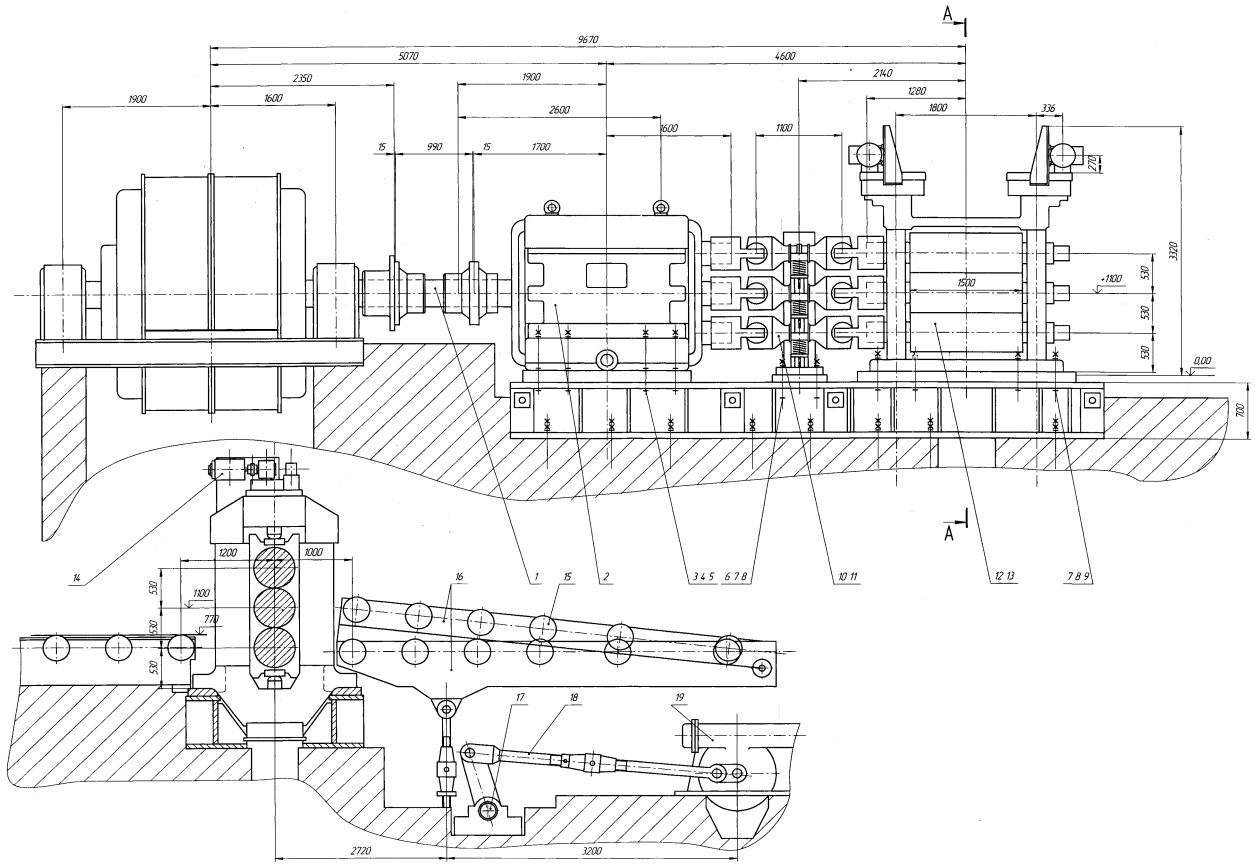
Рисунок 2.3 – Хімічний склад сталі 08Х17Н13М2Т

Обидві марки сталей спеціального призначення потребують особливого підходу при термомеханічній обробці для забезпечення необхідного комплексу спеціальних властивостей. Специфіка хімічного складу та вимоги до кінцевих властивостей визначають необхідність точного контролю параметрів деформації та термічної обробки в процесі прокатки.

Основне обладнання включає методичну піч, систему робочих клітей та транспортні механізми. Методична піч має три зони: нагріву, томильну та видачі, з максимальною температурою нагріву 1250°С. Механізований

пристрій подачі та штовхач забезпечують переміщення заготовок по поду печі. Поштучне завантаження сприяє рівномірності нагріву металу.

Перша робоча кліть оснащена валками діаметром 550 мм з довжиною бочки 1500 мм. На вхідній стороні встановлено маніпулятор-кантувач на підйомно-хитному столі №2, який забезпечує поворот заготовки на кут 90° або 180°. Унікальною особливістю є наявність кантуючої шайби перед четвертою кліттю для автоматичного провертання предчистового розкату. Конструкція першої обтискної кліті «тріо» стану представлена на рис. 2.2.



1 - Головний приводний електродвигун; 2 - Шестеренна кліть; 3,4,5 - Група кріплення електродвигуна; 6,7,8 - Група кріплення шестеренної кліті; 7,8,9 - Група кріплення станини; 10,11 - Універсальні шпинделі; 12,13 - Опорні валки; 14 - Натискний механізм; 15 - Транспортні ролики поворотного рольганга; 16 - Рама поворотного рольганга; 17-19 - Механізм повороту рольганга

Рисунок 2.4 – Схема обтискної кліті «тріо» стану 550

Транспортна система включає рольганги та шлеперні механізми [16]. Довжина рольгангу перед четвертою кліттю сягає 35 м, що запобігає випрямленню розкату. Між першою та другою клітями розташований додатковий рольганг довжиною 12 м для акумулювання металу. Передача розкату виконується чотири- і шестинитковими шлеперами з кроком 3200 і 1600 мм.

Технологічний процес розпочинається з нагріву заготовок. Для перетину 140-147 мм час витримки у томильній зоні складає 40 хв, для 180-185 мм - 50 хв. Загальна тривалість нагріву становить відповідно 2 год 40 хв та 3 год 30 хв.

Калібрування валків реалізовано за схемою "квадрат-коло-квадрат" [24]. У першій кліті застосовуються ящичні калібри для максимального обтиснення, у наступних - витяжні калібри для формування кінцевого профілю. Швидкість прокатки в чистовій кліті не перевищує 2,5 м/с, що сприяє точному контролю температурного режиму.

Процес деформації металу у клітях відбувається за чітко розрахованою схемою обтиснень. При прокатці нержавіючих сталей сумарний коефіцієнт витяжки становить 3,5-4,2, що забезпечує необхідний ступінь пропрацювання структури металу. Схема зміни перерізу металу при прокатці показана на рис. 2.5. У першій кліті відбувається максимальне обтиснення заготовки - до 25%, що сприяє руйнуванню литої структури. У наступних проходах ступінь деформації поступово знижується до 12-15% в останній кліті. Така схема обтиснень у поєднанні з контрольованим охолодженням під вентиляторами створює оптимальні умови для термомеханічного зміцнення металу.

Особливості термомеханічної обробки нержавіючих сталей марок 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т вимагають точного дотримання температурно-деформаційних режимів прокатки. При обробці цих марок сталей важливо забезпечити рівномірність деформації по перерізу для запобігання утворення різнозернистості структури. Для цього застосовується спеціальна схема кантування розкату між проходами, що забезпечує пропрацювання всього

об'єму металу. Температура початку деформації для цих марок сталей підтримується в межах 1150-1180°C, що запобігає надмірному зміцненню металу та перевантаженню обладнання.

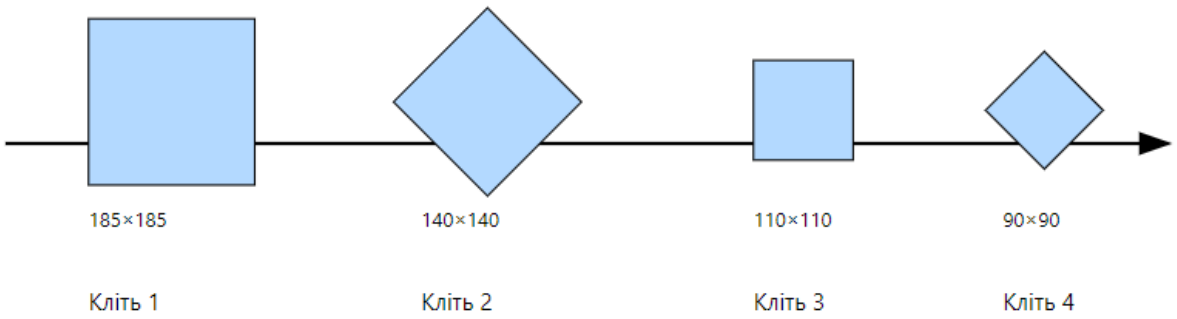


Рисунок 2.5 – Схема зміни перерізу металу при прокатці

Система контролю включає моніторинг температури за допомогою стаціонарних пірометрів та переносного пірометра "Промінь" [15]. Температура кінця прокатки підтримується в діапазоні 1020-1100°C. Після розкрою метал охолоджується під вентиляторами, розташованими на холодильнику, у прийомній кишені та на ділянці охолодження.

Охолодження валків відбувається у відкритій системі з витратою води 40-50 м³/год на кожну кліть[33]. Відпрацьована вода проходить відстоювання у підвальному приміщенні перед поверненням у систему.

За час експлуатації на стані освоєно понад 200 різних профілерозмірів, включаючи конструкційні, інструментальні та нержавіючі марки сталей [11]. Контроль якості продукції проводиться згідно з ДСТУ 5949 на ділянці великого сорту після охолодження металу.

Робочі кліті стану мають ряд конструктивних особливостей, що впливають на технологічні можливості обладнання [17]. Станини клітей виготовлені з високоміцного чавуну та мають закриту конструкцію для підвищення жорсткості. Відстань між клітями розрахована з урахуванням оптимальних кутів захвату металу та необхідності його транспортування між проходами.

У першій обтискній кліті крім ящичних калібрів використовуються і спеціальні овальні калібри для прокатки круглих профілів великого діаметру.

Підшипникові вузли робочих валків оснащені підшипниками кочення особливої конструкції, що дозволяють компенсувати можливі перекоси валків під навантаженням. Змащування підшипникових вузлів здійснюється централізованою системою з використанням спеціальних мастил, стійких до високих температур та навантажень.

Електропривід стану включає систему головних двигунів постійного струму та допоміжні приводи рольгангів і маніпуляторів [20]. Потужність головного приводу першої кліті становить 1500 кВт, що забезпечує необхідний момент для деформації металу на першому проході. Система керування приводами дозволяє регулювати швидкість прокатки в межах від 0,5 до 2,5 м/с [30].

Особливої уваги заслуговує система розкрою металу, яка включає летючі ножиці за четвертою кліттю [22]. Конструкція ножиць забезпечує точність різу ±10 мм при швидкості руху металу до 2 м/с. Керування ножицями здійснюється за допомогою спеціальної системи, що враховує швидкість руху металу та задану довжину різу.

Важливу роль у забезпеченні якості прокату відіграють допоміжні системи стану. Система видалення окалини включає гідрозбив перед першою кліттю та додаткові форсунки між клітями для змиву вторинної окалини[25]. Тиск води в системі підтримується насосною станцією потужністю 250 кВт, що забезпечує ефективне очищення поверхні металу. Холодильник стану оснащений двосекційними шлеперами та рейковими візками для транспортування прокату [19]. Його конструкція дозволяє одночасно розміщувати до 100 прутків довжиною 6 метрів, що у поєднанні з системою вентиляторів високого тиску забезпечує оптимальні умови для термозміцнення металу. Регулювання інтенсивності охолодження здійснюється зміною кількості працюючих вентиляторів та їх продуктивності відповідно до марки сталі та необхідних механічних властивостей.

Для налагодження стану при переході на новий профіль використовується спеціальний комплект вимірювального інструменту [18], що включає шаблони, калібри та мікрометричні прилади. Це дозволяє контролювати геометричні параметри прокату безпосередньо в процесі налаштування калібрів.

2.3 Методика вимірів властивостей прокату

Для визначення властивостей прокату розроблено комплексну методику досліджень, що базується на вимогах ДСТУ 5949. Вона включає механічні випробування, металографічний аналіз та статистичну обробку отриманих результатів.

Відбір проб для випробувань здійснюється від охолоджених прутків на ділянці великого сорту[28]. Для забезпечення достовірності результатів від кожної партії металу відбирається не менше трьох зразків. Перед проведенням випробувань зразки не піддаються додатковій термічній обробці, що дозволяє оцінити ефективність термомеханічного зміцнення безпосередньо в потоці стану.

Механічні випробування включають визначення:

- границі текучості ($\sigma_{0,2}$)
- границі міцності (σ_{β})
- відносного подовження (δ)
- ударної в'язкості (KCV)

Випробування на розтяг проводяться на універсальній випробувальній машині з точністю вимірювання зусилля ±0,5%. Для визначення ударної в'язкості використовується маятниковий копер з енергією удару до 300 Дж. Випробування проводяться на стандартних зразках з V-подібним надрізом при кімнатній температурі.

Для проведення механічних випробувань використовуються зразки стандартних розмірів згідно з ДСТУ. Випробування на розтяг проводяться на

циліндричних зразках діаметром 10 мм з розрахунковою довжиною 50 мм. Швидкість навантаження при випробуваннях на розтяг підтримується в межах 5-10 мм/хв, що забезпечує можливість точної фіксації показників текучості матеріалу.

Для випробувань на ударну в'язкість використовуються зразки перетином 10×10 мм довжиною 55 мм з V-подібним надрізом глибиною 2 мм. Випробування проводяться при кімнатній температурі (20±2)°C. Для оцінки стабільності властивостей по перерізу прокату зразки вирізаються з різних зон - центральної та периферійної.

Всі випробування проводяться в акредитованій лабораторії при стабільних кліматичних умовах: температура повітря (20±5)°C, відносна вологість не більше 80%[12].

Металографічні дослідження проводяться для визначення структури металу та розміру зерна [4]. Підготовка мікрошліфів виконується за стандартною методикою з подальшим травленням у спеціально підібраних реактивах.

Для виявлення структури нержавіючих сталей застосовується електролітичне травлення, що забезпечує чітке виявлення границь зерен та структурних складових.

Аналіз мікроструктури проводиться на оптичному мікроскопі при збільшеннях від 100 до 1000 крат [8]. Для кількісної оцінки розміру зерна використовується метод комп'ютерного аналізу зображень. Програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес вимірювання та отримати статистично достовірні дані про розподіл розмірів зерен.

Статистична обробка результатів випробувань проводиться з використанням методів математичної статистики[10]. Для кожної серії експериментів розраховуються основні статистичні параметри: середнє значення, середньоквадратичне відхилення, довірчий інтервал та коефіцієнт варіації[9].

Оцінка достовірності результатів здійснюється за критерієм Стьюдента при рівні значущості α = 0,05. Для перевірки однорідності результатів використовується критерій Фішера.

За допомогою статистичної обробки визначаються:

- стабільність властивостей металу
- відтворюваність результатів
- відповідність вимогам нормативної документації

Для аналізу впливу параметрів термомеханічної обробки на властивості металу використовується регресійний аналіз [14]. Це дозволяє встановити кількісні залежності між режимами обробки та кінцевими властивостями прокату.

На основі статистичної обробки результатів випробувань формуються висновки про:

- стабільність технологічного процесу
- відповідність властивостей прокату вимогам нормативної документації
- ефективність термомеханічного зміцнення
- можливості оптимізації режимів обробки

3 ОБРОБКА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розробка математичної моделі процесу термомеханічного зміцнення

Для визначення оптимальних параметрів технологічного процесу термомеханічного зміцнення використовувався метод математичного планування експерименту. Цей метод дозволяє при мінімальній кількості дослідів отримати математичну модель процесу та визначити ступінь впливу кожного з досліджуваних факторів.

В якості основних факторів впливу було обрано[26]:

- X_1 - мінімальний час нагріву у томильній зоні (хв)
- X_2 - загальний час нагріву (хв)
- X_3 - температура кінця прокатки (°С)

Вибір даних факторів обумовлений їх суттєвим впливом на кінцеві властивості металу та можливістю їх регулювання в умовах промислового виробництва. Діапазони варіювання факторів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Досліджувані фактори

Характеристика	Фактори		
	X1	X2	X3
Основний рівень	45	185	1060
Інтервал варіювання	5	25	40
Нижній рівень (кодовані значення –1, –)	40	160	1020
Верхній рівень (кодовані значення +1, +)	50	210	1100

Параметрами оптимізації обрано основні характеристики, що визначають якість термомеханічно зміцненого металу:

- Y_1 - середній розмір зерна
- Y_2 - ударна в'язкість
- Y_3 - границя текучості

- Y_4 - границя міцності

Реалізація плану експерименту проводилась в умовах стану 550 ПрАТ "Дніпроспецсталь". Для забезпечення достовірності результатів кожен дослід дублювався тричі. Результати експериментів наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – План експерименту

Номер досліду	Значення факторів в кодованому вигляді			
	X_0	X_1	X_2	X_3
1	+	+	+	+
2	+	–	+	+
3	+	+	–	+
4	+	–	–	+
5	+	+	+	–
6	+	–	+	–
7	+	+	–	–
8	+	–	–	–

На основі отриманих експериментальних даних проведено розрахунок коефіцієнтів регресії. Для визначення значущості коефіцієнтів використовувався критерій Стьюдента. В результаті отримано наступні математичні моделі процесу термомеханічного зміцнення:

для середнього розміру зерна: $Y_1 = 6{,}33 + 0{,}246X_1 + 0{,}428X_3$

для ударної в'язкості: $Y_2 = 205{,}5+27{,}5X_1+42{,}5X_3$

для границі текучості: $Y_3 = 249{,}0-23{,}875X_1-26{,}625X_3$

для границі міцності: $Y_4 = 575{,}02-17{,}25X_1-19{,}75X_3$

де X_1 - мінімальний час нагріву у томильній зоні;

X_3 - температура кінця прокатки.

Аналіз отриманих рівнянь регресії показує, що фактор x_2 (загальний час нагріву) виявився статистично незначущим для всіх досліджуваних параметрів і був виключений з моделей. Найбільший вплив на формування структури та властивостей має температура кінця прокатки (x_3), що видно з величини відповідних коефіцієнтів регресії.

Знаки перед коефіцієнтами у рівняннях вказують на характер впливу факторів: позитивні значення свідчать про збільшення параметра при зростанні фактора, негативні - про зменшення. Так, підвищення температури кінця прокатки призводить до збільшення розміру зерна та ударної в'язкості, але знижує показники міцності. Перевірка адекватності отриманих моделей проводилась за критерієм Фішера. Результати розрахунку дисперсії неадекватності наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок дисперсії досліду

Дослід	y_e	$\lvert y_{oe} - y_o \rvert$	Δy_e^2	$\sum \Delta y$
9	6,3	0,1	0,0001	
10	6,48	0,08	0,0004	11,84
11	6,45	0,05	0	
	y_0 = 6,4			

Розрахункові значення критерію Фішера для всіх моделей виявились меншими за табличні, що свідчить про адекватність отриманих математичних моделей. Графічні залежності досліджуваних параметрів від факторів впливу представлені на рис. 3.1-3.4.

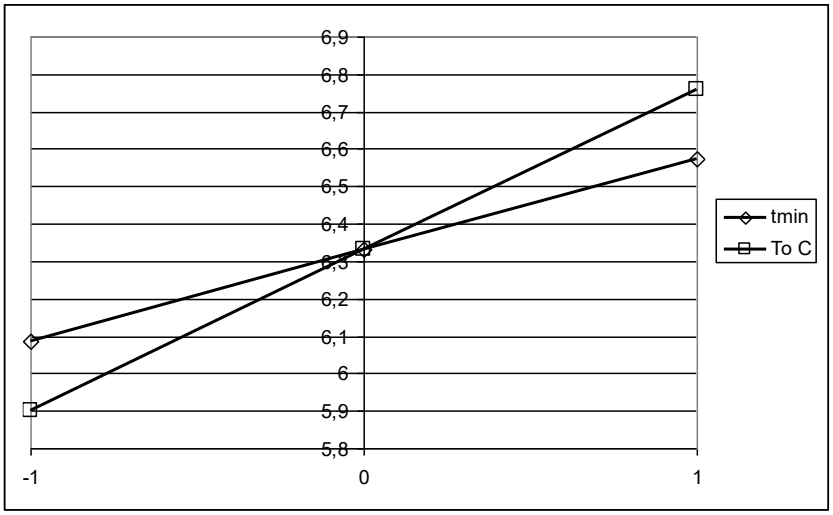


Рисунок 3.1 – Графічна залежність середнього розміру зерна від мінімального часу нагрівання у томленій зоні і температури кінця прокатки в кодованому виді

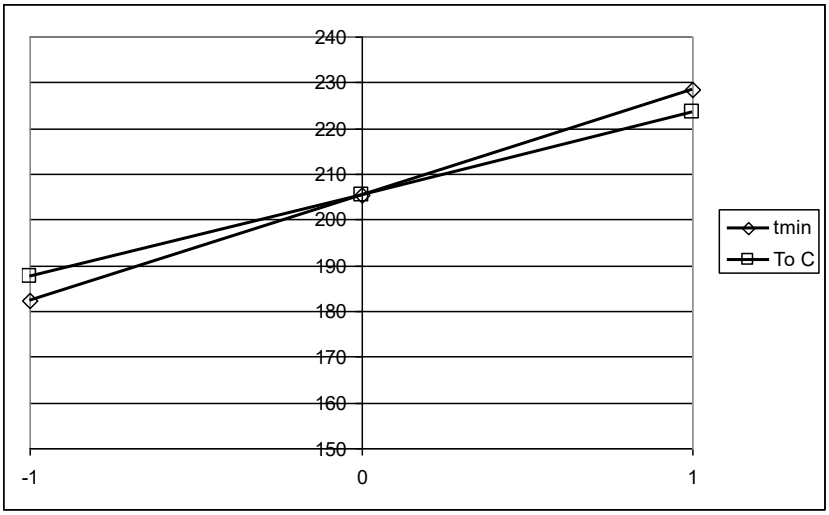


Рисунок 3.2 – Графічна залежність ударної в’язкості від мінімального часу нагрівання у томленій зоні і температури кінця прокатки в кодованому виді

Як видно з рис. 3.2, підвищення температури кінця прокатки призводить до збільшення ударної в'язкості. Це пояснюється формуванням більш однорідної структури при підвищених температурах деформації.

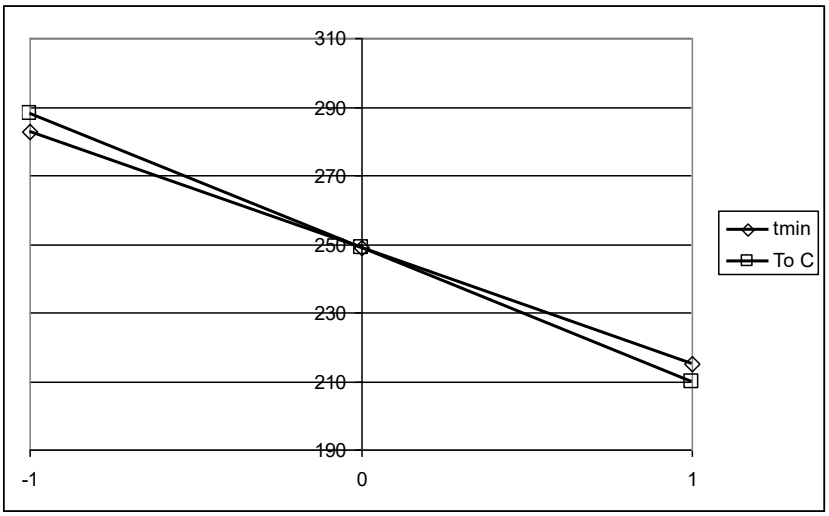


Рисунок 3.3 – Графічна залежність границі текучості від мінімального часу нагрівання у томленій зоні і температури кінця прокатки в кодованому виді

Аналіз залежності, представленої на рис. 3.3, показує, що зниження температури кінця прокатки сприяє підвищенню границі текучості за рахунок більш інтенсивного зміцнення металу.

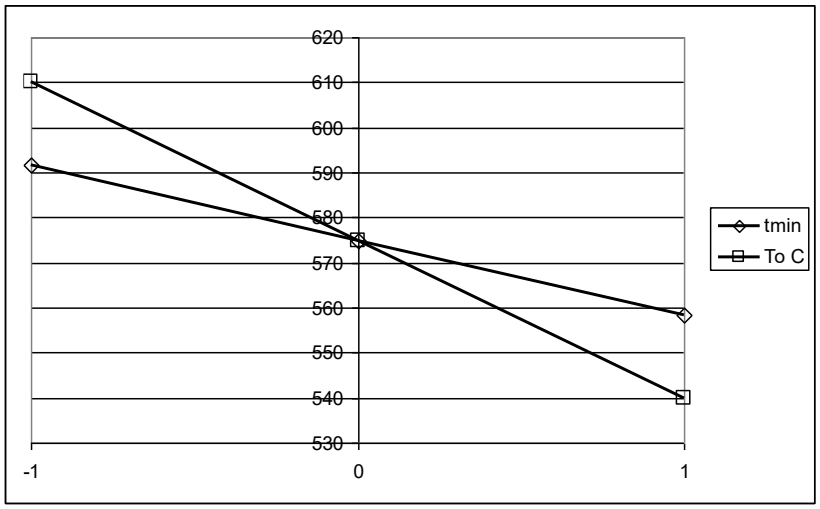


Рисунок 3.4 – Графічна залежність границі міцності від мінімального часу нагрівання у томленій зоні і температури кінця прокатки в кодованому виді

З рис. 3.4 видно, що характер впливу досліджуваних факторів на границю міцності аналогічний їх впливу на границю текучості.

На основі отриманих математичних моделей побудовано оптимальні поверхні відгуку, які представлені на рис. 3.5-3.8.

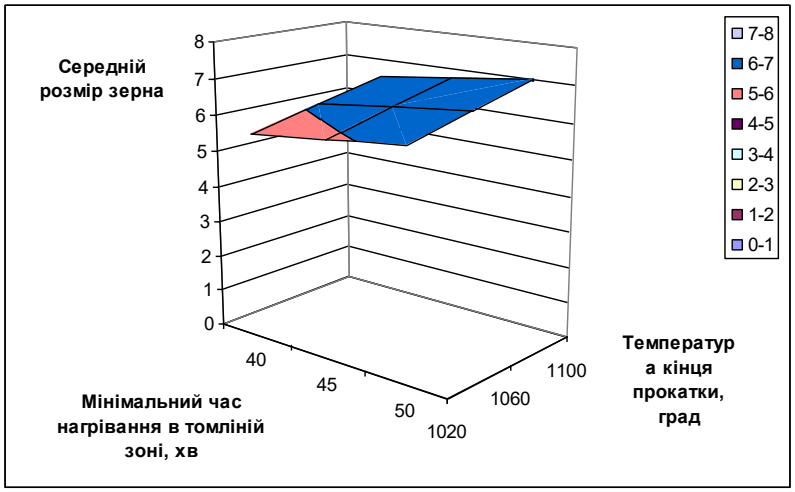


Рисунок 3.5 – Оптимальні поверхні відгуку середнього розміру зерна

Аналіз поверхні відгуку (рис. 3.5) дозволяє визначити область оптимальних значень параметрів процесу для отримання необхідного розміру зерна.

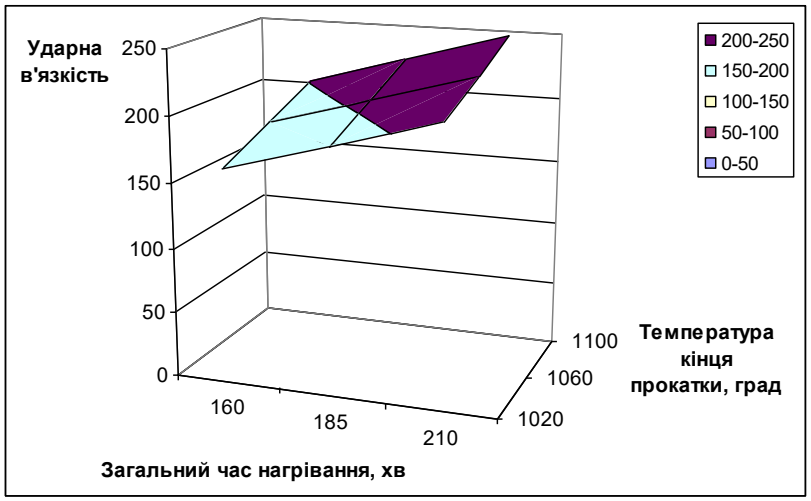


Рисунок 3.6 – Оптимальні поверхні відгуку ударної в’язкості

Поверхня відгуку ударної в'язкості (рис. 3.6) показує, що максимальні значення цього показника досягаються при підвищених температурах кінця прокатки.

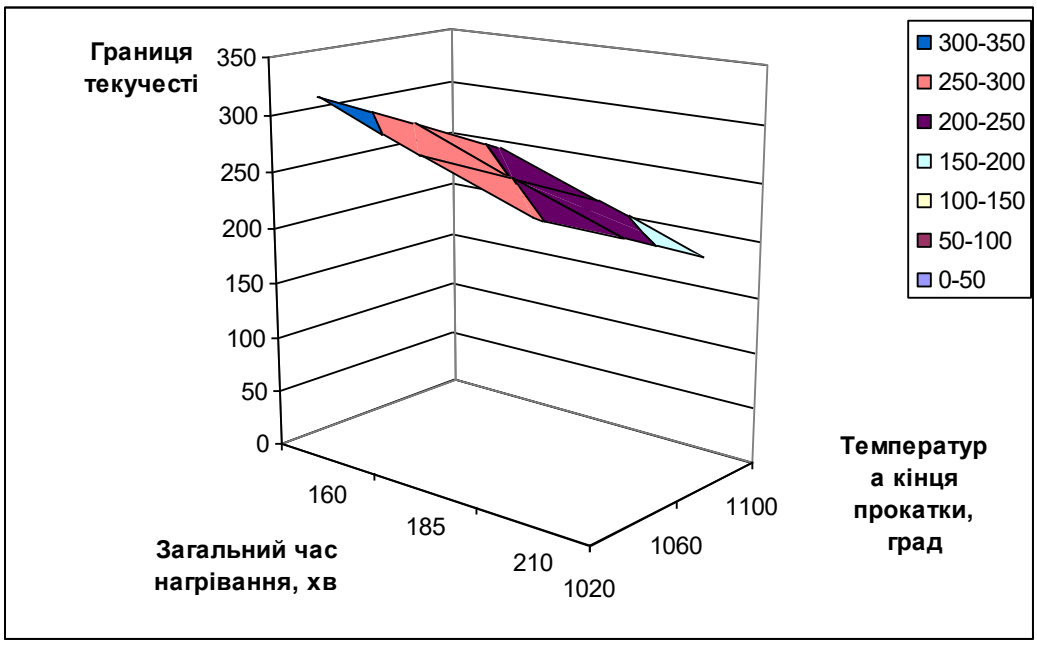


Рисунок 3.7 – Оптимальні поверхні відгуку границі текучості

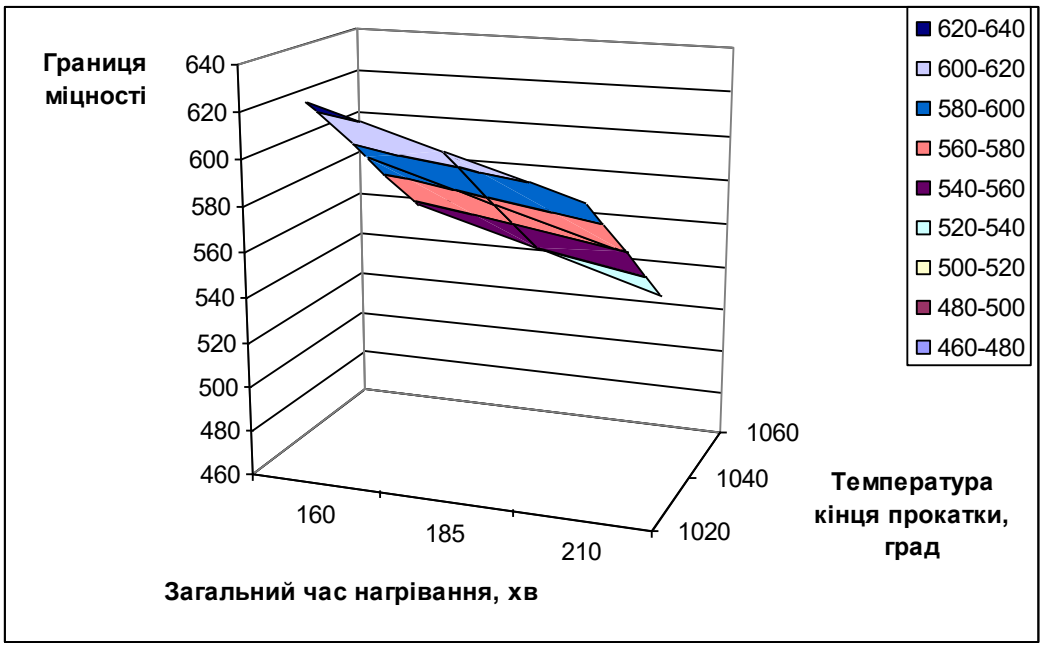


Рисунок 3.8 – Оптимальні поверхні відгуку границі міцності

Аналіз поверхонь відгуку міцнісних характеристик (рис. 3.7 та 3.8) дозволяє визначити режими термомеханічної обробки, що забезпечують необхідний комплекс механічних властивостей.

3.2 Дослідження впливу параметрів обробки на розмір зерна та механічні властивості

В даному розділі представлені результати дослідження впливу режимів термомеханічного зміцнення на структуру та механічні властивості нержавіючих сталей спеціального призначення. Дослідження проводились для сталей 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т, які широко використовуються у відповідальних вузлах обладнання хімічної промисловості, атомної енергетики та спеціального приладобудування.

Оцінка впливу параметрів обробки на структуру металу проводилась за результатами металографічного аналізу зразків, відібраних після різних режимів термомеханічного зміцнення. Особлива увага приділялась

визначенню розміру зерна як одного з ключових параметрів, що визначає комплекс механічних властивостей сталей спеціального призначення.

Результати статистичної обробки вимірювань розміру зерна для сталі 07Х18Н10 наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення розміру зерна в металі сталі 07Х18Н10 після термомеханічного зміцнення

Число випадків	Середнє значення	Нижня границя 95% довірчого інтервалу	Верхня границя 95% довірчого інтервалу
78	6,333333	6,110322	6,556345
Мінімальне значення	Максимальне значення	Дисперсія	Стандартне відхилення
5,0	10,0	0,978355	0,989117

Для оцінки рівномірності формування структури побудовано частотну діаграму розподілу розміру зерна, яка представлена на рис. 3.9.

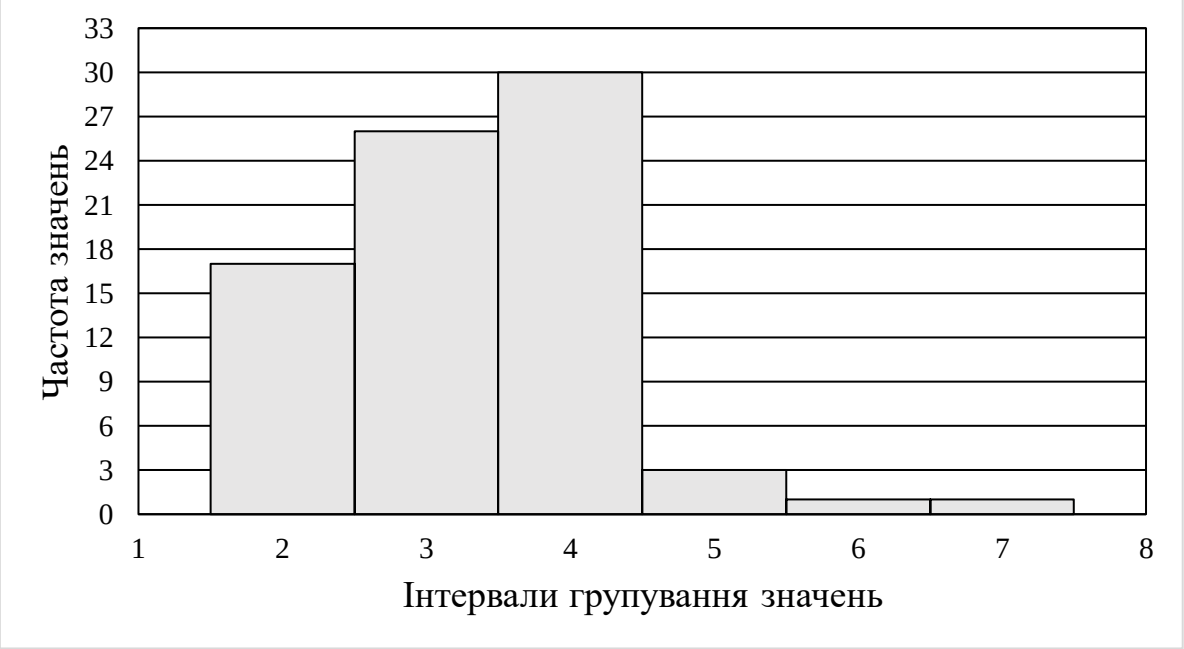


Рисунок 3.9 – Розподіл розміру зерна в сталі 07Х18Н10 після термомеханічного зміцнення

Аналогічні дослідження були проведені для сталі 08Х17Н13М2Т. Результати вимірювань розміру зерна представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Значення розміру зерна в металі сталі 08Х17Н13М2Т після термомеханічного зміцнення

Число випадків	Середнє значення	Нижня границя 95% довірчого інтервалу	Верхня границя 95% довірчого інтервалу
63	6,190476	5,983899	6,397054
Мінімальне значення	Максимальне значення	Дисперсія	Стандартне відхилення
5	9	0,672811	0,820251

Розподіл розміру зерна для сталі 08Х17Н13М2Т показано на рис. 3.10.

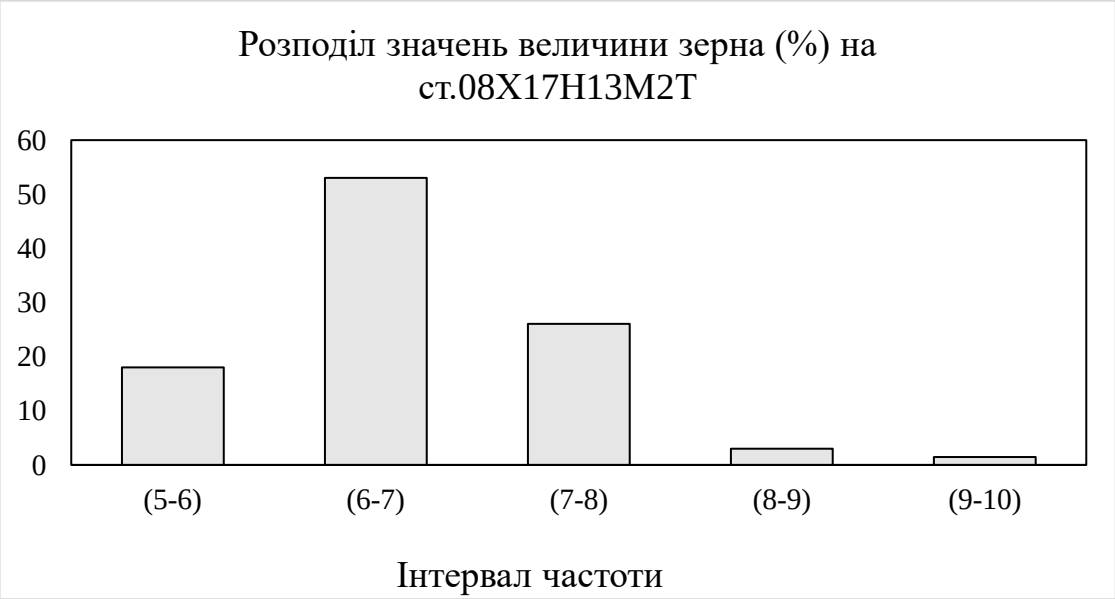


Рисунок 3.10 – Розподіл розміру зерна в сталі 08Х17Н13М2Т після термомеханічного зміцнення

Порівняльний аналіз отриманих даних показує, що для обох марок сталей термомеханічне зміцнення забезпечує формування дрібнозернистої структури з середнім розміром зерна 6-7 балів. При цьому сталь 07Х18Н10 демонструє більш рівномірний розподіл розміру зерна, що підтверджується меншим значенням стандартного відхилення. Це може бути пов'язано з

особливостями легування та різною кінетикою рекристалізаційних процесів при термомеханічній обробці досліджуваних сталей.

Для оцінки впливу термомеханічного зміцнення на механічні властивості сталей були проведені комплексні випробування, що включають визначення характеристик міцності, пластичності та в'язкості. Результати випробувань границі текучості представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати випробувань границі текучості (σ_1) сталей

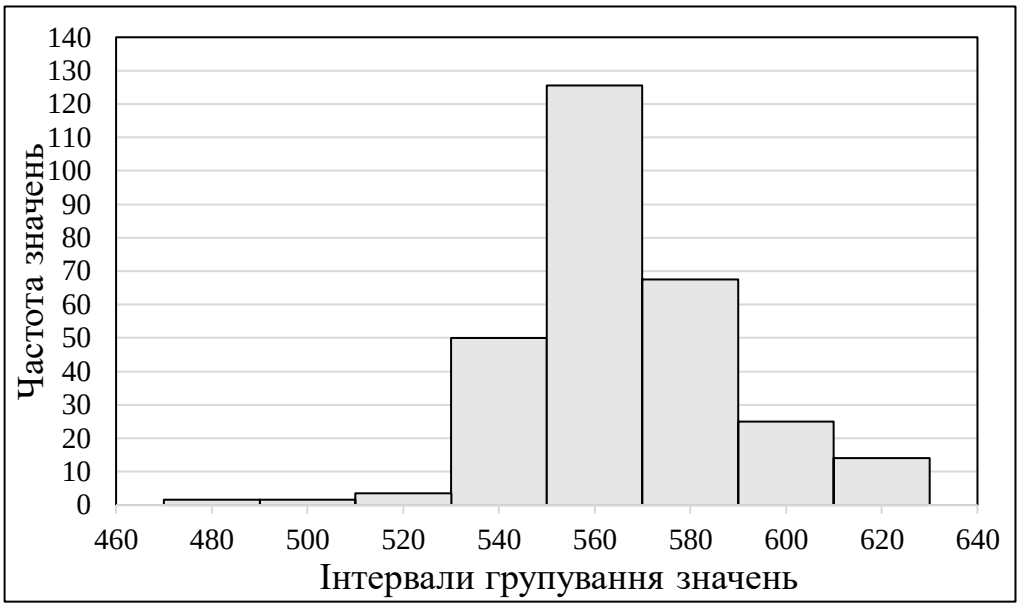
Марка сталі	07Х18Н10	08Х17Н13М2Т
Число випадків	277	275
Середнє значення, МПа	273,99	266,13
Мінімальне значення, МПа	141,0	141,0
Максимальне значення, МПа	395,0	395,0
Стандартне відхилення	23,92	27,27

На рис. 3.11 представлено порівняльні гістограми розподілу значень границі текучості для сталі 07Х18Н10 із загартуванням у потоці стану та з окремого нагріву в КПЦ.

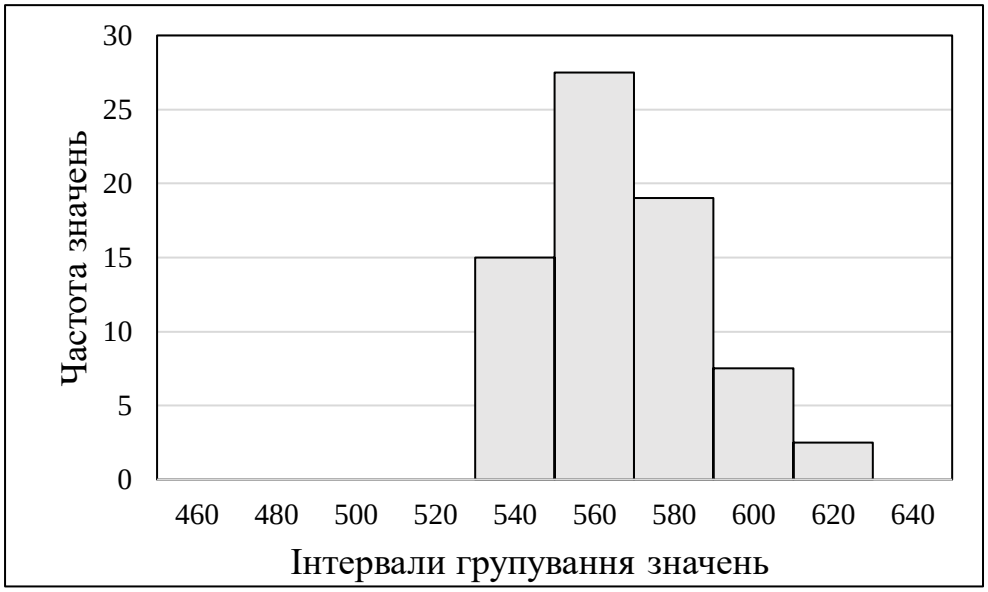
Особливий інтерес представляють результати випробувань на ударну в'язкість, оскільки цей показник є критично важливим для сталей спеціального призначення. Результати випробувань наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати випробувань ударної в'язкості

Марка сталі	07Х18Н10	08Х17Н13М2Т
Число випадків	687	603
Середнє значення, МПа	205,52	193,47
Мінімальне значення, МПа	130,0	100,0
Максимальне значення, МПа	300,0	300,0
Стандартне відхилення	31,57	40,71



а)



б)

Рисунок 3.11 – Розподіл границі текучості сталі 07Х18Н10: а) із загартуванням у потоці стану б) із загартуванням у КПЦ

Порівняльний аналіз механічних властивостей показує, що обидві марки сталей після термомеханічного зміцнення мають високий та стабільний рівень характеристик міцності та в'язкості. При цьому сталь 07Х18Н10 демонструє дещо вищі показники ударної в'язкості, що може бути пов'язано з більш однорідною структурою.

Для оцінки стабільності процесу термомеханічного зміцнення було розраховано коефіцієнти відтворюваності (Cpk) для різних показників якості. Результати розрахунків наведені в таблиці 3.8.

Як видно з наведених даних, для більшості показників коефіцієнт відтворюваності перевищує 1,0, що свідчить про стабільність процесу термомеханічного зміцнення. Найбільш стабільними є показники міцності (Cpk > 1,15), тоді як показники ударної в'язкості демонструють дещо більший розкид значень (Cpk ≈ 0,7).

Таблиця 3.8 – Розрахунок коефіцієнта відтворюваності процесу (Cpk)

Марка сталі	Показники якості	Середнє значення	Мінімальне припустиме значення (НГ)	Середньо-квадратичне відхилення	Коефіцієнт Cpk
07Х18Н10	Границя текучості	249,97	195 МПа	23,90	1,15
	Границя міцності	575,02	500-700СПа	28,16	1,99
	Ударна в'язкість	205,52	85 ДЖ	31,57	0,67
08Х17Н13М2Т	Границя текучості	266,13	196 Ипа	27,27	1,29
	Границя міцності	564,52	500-7300 МПа	19,61	1,65
	Ударна в'язкість	193,47	85 Дж	40,71	0,73

3.3 Порівняльний аналіз властивостей сталей після різних режимів термомеханічного зміцнення

В даному розділі проводиться порівняльний аналіз поведінки сталей 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т при термомеханічному зміцненні в однакових умовах. Незважаючи на те, що обидві сталі відносяться до аустенітного класу, різниця в їх хімічному складі (особливо вміст нікелю та наявність молібдену

в сталі 08Х17Н13М2Т) може суттєво впливати на процеси структуроутворення при термомеханічній обробці.

Порівняння механічних властивостей обох марок сталей після термомеханічного зміцнення в потоці стану наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Порівняння властивостей сталей при однакових режимах термомеханічного зміцнення

Показник	07Х18Н10	08Х17Н13М2Т	Різниця (%)
Серредній розмір зерна, бал	6,33 ±0,989	6,19 ±0,820	2,2
Границя текучості, МПа	273,99 ±23,92	2666,13 ±27,27	2,9
Границя міцності, МПа	575,02 ±28,16	564,52 ±19,61	1,8
Відносне подовження , %	62,30 ±3,16	58,32 ±3,46	6,8
Ударно в’язкисть, Дж	205,52 ±31,57	193,47 ±40,371	5,9

Аналіз отриманих даних показує, що при однакових режимах термомеханічного зміцнення сталь 07Х18Н10 демонструє дещо вищі показники механічних властивостей. Особливо помітна різниця у характеристиках пластичності та ударної в'язкості: відносне подовження вище на 6,8%, а ударна в'язкість – на 5,9%.

Така різниця може бути пояснена особливостями легування досліджуваних сталей. Сталь 08Х17Н13М2Т, маючи більший вміст легуючих елементів (особливо молібдену), характеризується підвищеною схильністю до деформаційного зміцнення, що призводить до дещо нижчих показників пластичності.

Аналіз температурних залежностей показує, що сталь 08Х17Н13М2Т більш чутлива до зміни температури кінця прокатки. Так, при підвищенні температури від 1020°С до 1100°С зниження границі текучості для сталі 08Х17Н13М2Т складає 15%, тоді як для сталі 07Х18Н10 - лише 12%.

Суттєві відмінності спостерігаються також у формуванні структури досліджуваних сталей. Незважаючи на близькі середні значення розміру зерна (6,33 бала для 07Х18Н10 та 6,19 бала для 08Х17Н13М2Т), характер розподілу розміру зерна різний. Сталь 07Х18Н10 демонструє більш однорідну структуру, що підтверджується меншим розкидом значень – стандартне відхилення складає 0,989 бала проти 1,12 бала для сталі 08Х17Н13М2Т.

Різна поведінка сталей при термомеханічному зміцненні проявляється також у характері деформаційного зміцнення. У таблиці 3.10 наведено порівняльні дані щодо зміцнення сталей при різних ступенях деформації.

Таблиця 3.10 – Характеристики деформаційного зміцнення досліджуваних сталей

Ступінь деформації, %	07Х18Н10 Приріст міцності, МПа	08Х17Н13М2Т Приріст міцності, МПа
25	180	210
15	120	150
12	100	125

Більш інтенсивне зміцнення сталі 08Х17Н13М2Т пов'язане з наявністю в її складі молібдену та підвищеним вмістом нікелю, що впливає на рухливість дислокацій при деформації. Це необхідно враховувати при виборі режимів термомеханічної обробки для забезпечення оптимального комплексу властивостей.

Важливою особливістю поведінки досліджуваних сталей є їх чутливість до температурно-швидкісних умов деформації. При термомеханічному зміцненні в потоці стану температура початку деформації для сталі 07Х18Н10 повинна підтримуватися в межах 1150-1180°С, тоді як для сталі 08Х17Н13М2Т оптимальний інтервал становить 1180-1200°С. Це пов'язано з різною температурою початку рекристалізації цих сталей.

В таблиці 3.11 представлено вплив температури кінця прокатки на стабільність властивостей досліджуваних сталей.

Таблиця 3.11 – Коефіцієнти варіації механічних властивостей при різних температурах кінця прокатки

Температура кінця прокатки, °С	Коефіцієнт варіації властивостей, %					
	07Х18Н10			08Х17Н13М2Т		
	$\sigma_в$	$\sigma_т$	Ударна в'язкість	$\sigma_в$	$\sigma_т$	Ударна в'язкість
1020	4,2	5,1	13,3	5,1	6,2	15,4
1060	3,8	4,7	11,8	4,8	5,7	14,2
1100	4,5	5,3	13,1	5,4	6,5	16,1

Як видно з наведених даних, сталь 08Х17Н13М2Т характеризується більшим розкидом значень механічних властивостей при всіх досліджених температурах кінця прокатки. Особливо це помітно для показників ударної в'язкості, де коефіцієнт варіації на 25-30% вище, ніж у сталі 07Х18Н10.

На основі проведеного порівняльного аналізу поведінки досліджуваних сталей можна сформулювати наступні рекомендації щодо режимів їх термомеханічного зміцнення.

Для сталі 07Х18Н10:

- температура початку деформації повинна підтримуватися в межах 1150-1180°С

- оптимальна температура кінця прокатки становить 1040-1060°С

- сумарний ступінь деформації має складати 65-70%

- швидкість охолодження після деформації повинна бути не менше 10°С/с

Для сталі 08Х17Н13М2Т, враховуючи її підвищену чутливість до температурно-швидкісних параметрів обробки, рекомендуються наступні режими:

- температура початку деформації 1180-1200°С

- температура кінця прокатки 1060-1080°С

- сумарний ступінь деформації 60-65%

- швидкість охолодження після деформації 12-15°С/с

Дотримання цих рекомендацій забезпечує отримання наступного комплексу властивостей:

Таблиця 3.12 – Очікувані механічні властивості при рекомендованих режимах обробки

Показник	07Х18Н10	08Х17Н13М2Т
Границя текучості, МПа	270-280	260-270
Границя міцності, МПа	570-580	560-570
Відносне подовження, %	60-65	57-60
Ударна в'язкість, Дж	200-210	190-200
Розмір зерна, бал	6-7	6-7

При цьому коефіцієнт варіації всіх показників не перевищує 5% для сталі 07Х18Н10 та 7% для сталі 08Х17Н13М2Т, що свідчить про стабільність процесу термомеханічного зміцнення.

За результатами порівняльного аналізу властивостей сталей 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т після різних режимів термомеханічного зміцнення можна зробити наступні висновки:

1. Незважаючи на належність до одного структурного класу, досліджувані сталі демонструють різну поведінку при термомеханічному зміцненні, що обумовлено особливостями їх легування. Сталь 08Х17Н13М2Т, маючи більший вміст легуючих елементів, проявляє підвищену чутливість до температурно-швидкісних параметрів обробки.
2. При однакових режимах обробки сталь 07Х18Н10 забезпечує більш стабільні показники механічних властивостей. Коефіцієнти варіації для

всіх характеристик на 20-25% нижчі порівняно зі сталлю 08Х17Н13М2Т.

3. Різниця в характері деформаційного зміцнення досліджуваних сталей вимагає диференційованого підходу до вибору режимів термомеханічної обробки. Для сталі 08Х17Н13М2Т необхідні більш високі температури початку деформації та більш інтенсивне охолодження після прокатки.
4. Розроблені режими термомеханічного зміцнення забезпечують отримання стабільного комплексу механічних властивостей для обох марок сталей при суттєвому спрощенні технологічного процесу порівняно з традиційною термічною обробкою.
5. Встановлені закономірності впливу параметрів обробки на структуру та властивості досліджуваних сталей можуть бути використані при розробці технології термомеханічного зміцнення інших аустенітних сталей спеціального призначення.

3.4 Розробка технології термомеханічного зміцнення в умовах стану 550

На підставі проведених досліджень та аналізу отриманих результатів розроблено технологію термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей спеціального призначення в умовах стану 550 ПрАТ "Дніпроспецсталь". Технологічний процес включає наступні основні етапи:

1. Нагрівання заготовок у методичній печі
2. Прокатка за розробленими режимами
3. Контрольоване охолодження в потоці стану
4. Контроль якості готового прокату

В таблиці 3.13 представлено рекомендовані технологічні параметри для різних марок сталей та перерізів прокату.

Таблиця 3.13 - Технологічні параметри термомеханічного зміцнення

Параметр	Переріз заготовки, мм	
	140-147	180-185
Час витримки у томильній зоні, хв	40	50
Загальний час нагріву, год	2:40	3:30
Температура кінця прокатки, °С	1020-1100	1020-1100

Основними технологічними особливостями розробленого процесу є:

1. Режим нагріву заготовок:

- температура нагріву в методичній печі - 1250°С
- поштучне завантаження для забезпечення рівномірності нагріву
- контроль температури за допомогою стаціонарних пірометрів

2. Схема деформації в клітях стану:

- перша кліть: максимальне обтиснення до 25%
- друга та третя кліті: проміжні проходи зі ступенем деформації 15-20%
- четверта кліть: чистова прокатка з обтисненням 12-15%

3. Система охолодження:

- розміщення вентиляторів по маршруту металу
- регулювання інтенсивності охолодження
- контроль температури металу за допомогою пірометра "Промінь"

Для забезпечення якості продукції розроблено комплексну систему контролю, яка включає:

1. Контроль температурного режиму:

- температура нагріву в печі (±10°С)
- температура кінця прокатки (±15°С)
- температура охолодження металу

2. Контроль геометричних параметрів:

- розміри перерізу по проходах
- точність розмірів готового прокату (±0,5 мм)
- площинність та прямолінійність прутків

3. Контроль якості поверхні:

- наявність дефектів прокатного походження
- якість видалення окалини
- стан поверхні після охолодження

4. Контроль механічних властивостей:

- відбір проб від кожної партії металу
- випробування на розтяг
- визначення ударної в'язкості
- контроль твердості

5. Металографічний контроль:

- аналіз мікроструктури
- вимірювання розміру зерна
- оцінка однорідності структури

Для реалізації розробленої технології на стані 550 впроваджено наступні технічні рішення:

Таблиця 3.15 – Технічні рішення для забезпечення процесу термомеханічного зміцнення

Ділянка стану	Впроваджені заходи	Призначення
Нагрівальна піч	Модернізація системи контролю температури	Точний контроль температури нагріву
Прокатні кліті	Встановлення додаткових пірометрів	Контроль температури по проходах
Ділянка охолодження	Оптимізація розміщення вентиляторів	Забезпечення рівномірного охолодження
Ділянка контролю	Впровадження автоматизованої системи контролю розмірів	Оперативний контроль якості

3.5 Висновки по 3 розділу

На основі повного факторного експерименту розроблено математичні

моделі процесу термомеханічного зміцнення, які дозволяють прогнозувати механічні властивості та структуру нержавіючих сталей спеціального призначення. Встановлено, що найбільший вплив на формування властивостей має температура кінця прокатки, тоді як загальний час нагріву виявився статистично незначущим фактором.

Комплексний аналіз структури та властивостей досліджуваних сталей показав, що термомеханічне зміцнення забезпечує формування дрібнозернистої структури з розміром зерна 6-7 балів. При цьому сталь 07Х18Н10 демонструє більш рівномірний розподіл розміру зерна (стандартне відхилення 0,989 бала) порівняно зі сталлю 08Х17Н13М2Т (стандартне відхилення 1,12 бала).

Порівняльні дослідження показали суттєві відмінності в поведінці сталей при термомеханічному зміцненні:

- сталь 08Х17Н13М2Т потребує більш високих температур початку деформації (1180-1200°С)
- інтенсивність деформаційного зміцнення сталі 08Х17Н13М2Т на 15-20% вище
- коефіцієнти варіації механічних властивостей для сталі 08Х17Н13М2Т на 20-25% більші

Розроблено та обґрунтовано диференційовані режими термомеханічного зміцнення для кожної марки сталі, що забезпечують стабільне отримання необхідного комплексу властивостей:

- границя текучості 260-280 МПа
- границя міцності 560-580 МПа
- ударна в'язкість 190-210 Дж

Результати досліджень створюють наукову основу для розробки промислової технології термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей спеціального призначення в умовах прокатного виробництва.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих факторів при експлуатації стану 550

Прокатний стан 550 являє собою складний технологічний комплекс, що включає нагрівальні печі, чотири робочі кліті (перша кліть - обтискна тріо; друга, третя кліть - чорнові тріо; четверта кліть - чистове дуо), рольганги, допоміжне обладнання та системи управління. Технологічний процес прокатки характеризується високими температурами металу, значними механічними навантаженнями та інтенсивним режимом роботи обладнання, що створює цілий комплекс небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Основною особливістю виробничого процесу є безперервність роботи стану при прокатці партії металу. При цьому персонал виконує операції з настройки обладнання, контролю якості прокату, перевалки валків та обслуговування механізмів. Робочі місця вальцювальників розташовані біля клітей стану, де концентрується найбільша кількість небезпечних факторів.

Механічні небезпеки на стані 550 пов'язані насамперед з роботою прокатних клітей. Швидкість обертання валків досягає 2,5 м/с, а зусилля прокатки може перевищувати 1000 кН. При захопленні металу валками виникають значні динамічні навантаження, що передаються на все обладнання кліті. Особливу небезпеку становить можливість захоплення частин одягу або тіла працівника валками, що обертаються, або елементами трансмісії.

Транспортування розкату між клітями здійснюється за допомогою рольгангів зі швидкістю до 2 м/с. При цьому можливе викидання металу з рольгангів, особливо при нерівномірному русі або заклинюванні роликів. Гарячий метал, що рухається з високою швидкістю, становить серйозну небезпеку для персоналу, який знаходиться поряд.

Особливої уваги потребує процес перевалки валків, який виконується при зміні профілерозміру або при зношенні калібрів. Маса валків досягає кількох тонн, а їх транспортування здійснюється мостовими кранами. При цьому існує ризик падіння вантажу через несправність вантажозахоплювальних пристроїв або помилкові дії персоналу.

Термічні фактори небезпеки визначаються високою температурою металу, що прокатується. Заготовки нагріваються в методичній печі до температури 1150-1250°С. Температура поверхні металу на виході з останньої кліті становить 1020-1100°С. Інтенсивність теплового випромінювання на робочих місцях вальцювальників може досягати 1,5-2,0 кВт/м², що значно перевищує допустимі норми.

Нагрівальна піч є потужним джерелом теплового випромінювання. Температура зовнішніх поверхонь кладки печі досягає 80-100°С. При роботі з піччю існує небезпека опіків при випадковому контакті з гарячими поверхнями або при викиді полум'я через вікна видачі заготовок.

Валки і проводки клітей в процесі роботи нагріваються до температур 60-80°С. При налаштуванні калібрів та заміні проводок існує ризик отримання термічних опіків. Особливо небезпечні бризки води при попаданні її на розжарений метал, що може призвести до опіків парою.

Шум є одним з найбільш істотних фізичних факторів на стані 550. Основними джерелами шуму є:

- Удари при захопленні металу валками (до 115 дБА)
- Робота зубчастих передач (85-95 дБА)
- Рух металу по рольгангах (80-90 дБА)
- Робота насосів і вентиляторів (75-85 дБА)

При цьому характер шуму - імпульсний, що посилює його шкідливий вплив на організм працівників.

Вібрація обладнання стану має різну природу. Загальна вібрація виникає при роботі головних приводів та допоміжних механізмів. Локальна вібрація передається через органи управління при налаштуванні клітей. Рівні

вібрації перевищують допустимі значення при порушенні балансування валків або зношенні підшипників.

Запиленість повітря робочої зони обумовлена:

- Відшаруванням окалини при прокатці
- Викидами пилу з нагрівальної печі
- Абразивним зношенням валків і проводок
- Роботою систем гідрозбиву окалини

К онцентрація пилу в повітрі може досягати 10-15 мг/м³, при цьому пил містить оксиди заліза та легуючих елементів, що мають фіброгенну дію.

Освітленість робочих місць забезпечується комбінованою системою освітлення. Однак через велику висоту цеху та забруднення світильників рівні освітленості часто не відповідають нормативним вимогам, особливо в нічні зміни та в зонах обслуговування обладнання.

Хімічні фактори на стані пов'язані з використанням мастильно-охолоджуючих рідин та технологічних мастил. При їх нагріванні відбувається випаровування та утворення масляного туману. В повітря робочої зони можуть надходити продукти термічного розкладання мастил, що мають подразнюючу дію.

Психофізіологічні навантаження персоналу обумовлені:

- Необхідністю швидкого прийняття рішень
- Значними фізичними зусиллями при налаштуванні обладнання
- Напруженою увагою протягом всієї зміни

До аварійних ситуацій, що можуть виникнути на стані, відносяться:

- Обрив розкату в клітях
- Заклинювання валків
- Руйнування елементів приводу
- Загоряння мастил та електрообладнання

Комплексна оцінка умов праці на основних робочих місцях стану 550 показує, що за більшістю факторів вони відносяться до класу 3.1-3.2 (шкідливі умови праці 1-2 ступеня). Це вимагає впровадження додаткових

заходів з охорони праці та забезпечення працівників ефективними засобами індивідуального захисту.

4.2 Технічні заходи з охорони праці

На прокатному стані 550 реалізовано комплексну систему технічних заходів з охорони праці, що забезпечує безпечну експлуатацію обладнання та захист персоналу від впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Захист від механічних небезпек реалізується через багаторівневу систему огороджувальних та запобіжних пристроїв. Робочі кліті обладнані захисними кожухами, що повністю закривають валки та шпинделі з боку робочих місць вальцювальників. Конструкція кожухів забезпечує їх швидкий монтаж та демонтаж при перевалках, при цьому використовується надійна система блокування, яка виключає можливість пуску стану при знятих огородженнях.

Для захисту персоналу від викидання металу рольганги по всій довжині захищені бортовими огородженнями висотою 300 мм. У місцях підвищеного ризику встановлені додаткові металеві щити висотою до 2 м, а для безпечного переміщення персоналу обладнані спеціальні містки з поручнями.

Значна увага приділяється безпеці вантажопідйомних операцій. Мостові крани вантажопідйомністю 30 тонн оснащені комплексом захисних пристроїв, включаючи обмежувачі вантажопідйомності, кінцеві вимикачі механізмів та систему аварійного гальмування. При перевалці валків використовуються спеціальні траверси з дистанційним керуванням захватами, що значно знижує ризик травмування персоналу.

Система аварійної зупинки стану побудована за принципом багаторівневого захисту. Головний пост аварійної зупинки розміщений на пульті оператора, додаткові кнопки аварійної зупинки встановлені на робочих місцях вальцювальників. Вздовж рольгангів протягнуті тросові вимикачі, а на захисних огородженнях встановлені кінцеві вимикачі. При

спрацюванні будь-якого елементу системи відбувається миттєва зупинка всіх механізмів стану.

Захист від впливу високих температур забезпечується комплексом теплозахисних пристроїв. Нагрівальна піч обладнана системою водяного охолодження рами завантажувального вікна та механізованим заслоном. На робочих місцях встановлені теплозахисні екрани з алюмінієвої фольги та водоохолоджувані панелі. Для створення комфортних умов праці використовуються потужні повітряні душуючі установки.

Ефективна система охолодження валків підтримує їх температуру не вище 60°С. Витрата води регулюється автоматично залежно від температурного режиму прокатки. Якість охолоджуючої води постійно контролюється системою датчиків, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які відхилення від норми.

Для зниження рівня виробничого шуму впроваджено комплекс заходів, що включає встановлення шумопоглинаючих кожухів на зубчастих клітях та віброізоляцію фундаментів головних двигунів. Стіни цеху оброблені спеціальними звукопоглинаючими панелями, а системи вентиляції оснащені глушниками.

Боротьба з вібрацією ведеться шляхом динамічного балансування всіх обертових частин. Регулярно проводиться контроль стану підшипників та співвісності валів, що дозволяє своєчасно виявляти та усувати джерела підвищеної вібрації.

Система вентиляції забезпечує ефективне видалення забрудненого повітря та подачу свіжого. Місцеві відсмоктувачі над клітями та витяжні зонти над нагрівальною піччю працюють у поєднанні з потужною загальнообмінною вентиляцією цеху. Все повітря перед викидом в атмосферу проходить багатоступеневе очищення.

Освітлення робочих місць організовано за принципом багаторівневої системи. Загальне верхнє освітлення цеху доповнюється локальним

освітленням клітей, що забезпечує необхідну освітленість робочих зон. На випадок відключення електроенергії передбачено аварійне освітлення.

Електробезпека забезпечується застосуванням захисного заземлення, подвійної ізоляції електроприводів та системи захисного відключення[33]. Регулярно проводяться випробування опору ізоляції та перевірка працездатності захисних пристроїв.

Всі технічні засоби безпеки об'єднані в єдину автоматизовану систему контролю, яка забезпечує постійний моніторинг параметрів технологічного процесу та стану захисних пристроїв. Це дозволяє своєчасно виявляти потенційні небезпеки та запобігати аварійним ситуаціям.

4.3 Організаційні заходи з охорони праці

Безпечна експлуатація стану 550 неможлива без чіткої системи організаційних заходів, що регламентують порядок виконання робіт та навчання персоналу безпечним методам праці. Особлива увага приділяється підготовці працівників та контролю за дотриманням вимог охорони праці.

Процес допуску працівників до роботи на стані організований таким чином, щоб забезпечити їх повну готовність до безпечного виконання своїх обов'язків. Перед початком самостійної роботи кожен працівник проходить попередній медичний огляд, вступний та первинний інструктажі з охорони праці. Важливим етапом підготовки є стажування протягом 2-15 змін під керівництвом досвідченого працівника, що дозволяє на практиці освоїти безпечні прийоми роботи.

Навчання персоналу проводиться за комплексною програмою, яка включає теоретичну підготовку та практичне відпрацювання навичок безпечної роботи. Особлива увага приділяється вивченню технологічного процесу та відпрацюванню дій в аварійних ситуаціях. Для підтримання необхідного рівня знань проводиться щорічна перевірка знань з охорони праці.

Для кожної професії на стані розроблена та постійно актуалізується необхідна нормативна документація. Інструкції з охорони праці, технологічні карти та схеми безпечного виконання операцій розробляються з урахуванням специфіки роботи на конкретному обладнанні та регулярно переглядаються при зміні умов праці.

Організація робіт підвищеної небезпеки здійснюється з особливою ретельністю. Такі роботи, як перевалка валків, ремонтні та вогневі роботи, проводяться тільки за нарядом-допуском з призначенням відповідальних осіб та проведенням цільового інструктажу. При виконанні газонебезпечних робіт та робіт на висоті додатково впроваджуються спеціальні заходи безпеки.

Важливим аспектом організації безпечної роботи є раціональний режим праці та відпочинку персоналу. З урахуванням важких умов праці запроваджені регулярні технологічні перерви, передбачені додаткові перерви при підвищеній температурі повітря. Для відновлення працездатності обладнані спеціальні кімнати відпочинку з кондиціонерами.

На дільниці стану створена необхідна інфраструктура для забезпечення безпечних умов праці. Функціонує кабінет з охорони праці, де проводяться навчання та інструктажі. Санітарно-побутові приміщення оснащені всім необхідним для підтримання особистої гігієни працівників. У доступних місцях розміщені пункти надання першої медичної допомоги.

Медичне забезпечення організовано на основі профілактичного підходу. Регулярні медичні огляди дозволяють своєчасно виявляти відхилення у стані здоров'я працівників. Перед кожною зміною проводиться контроль стану здоров'я персоналу. Всі працівники навчені прийомам надання першої допомоги та мають доступ до необхідних медичних засобів.

Контроль за дотриманням вимог охорони праці здійснюється на всіх рівнях управління. Керівники змін та майстри контролюють безпеку робіт безпосередньо на робочих місцях. Служба охорони праці підприємства проводить регулярні перевірки та аудити. До контролю залучаються також представники профспілкового комітету та комісія з охорони праці.

Для підвищення ефективності організаційних заходів впроваджена система мотивації персоналу до безпечної праці. Поряд із відповідальністю за порушення вимог безпеки діє система заохочення за сумлінне ставлення до питань охорони праці. Регулярно проводяться конкурси на краще робоче місце та кращого працівника з охорони праці.

Постійне вдосконалення організаційних заходів здійснюється з урахуванням змін у технологічному процесі, результатів аналізу травматизму та пропозицій працівників. Це дозволяє підтримувати високий рівень безпеки праці та культури виробництва на стані 550.

4.4 Пожежна безпека

Прокатний стан 550 відноситься до категорії Г по вибухопожежній та пожежній небезпеці, оскільки в процесі виробництва обробляються негорючі речовини та матеріали в гарячому стані. Проте наявність значної кількості мастил, електрообладнання та високих температур створює потенційну небезпеку виникнення пожеж, що вимагає впровадження комплексної системи протипожежного захисту.

Аналіз можливих причин виникнення пожеж на стані показує, що найбільшу небезпеку становить перегрів електрообладнання та кабельних ліній, загоряння мастил в системах змащення, а також порушення правил безпеки при проведенні вогневих робіт. Додатковим фактором ризику є можливість розбризкування розплавленого металу при аварійних ситуаціях.

На стані впроваджено сучасну систему пожежної сигналізації, яка забезпечує раннє виявлення загорянь. Теплові та димові сповіщувачі, встановлені в найбільш небезпечних місцях, дозволяють виявити пожежу на початковій стадії. Система оповіщення персоналу та автоматичний зв'язок з пожежною частиною забезпечують швидке реагування на загрозу пожежі.

Особлива увага приділяється оснащенню стану первинними засобами пожежогасіння[32]. Біля електрообладнання розміщені вуглекислотні

вогнегасники, на робочих місцях - порошкові вогнегасники. Їх тип та кількість підібрані з урахуванням специфіки можливих загорянь. Регулярні перевірки та своєчасна заміна вогнегасників гарантують їх постійну готовність до використання.

Надійне протипожежне водопостачання забезпечується кільцевою водопровідною мережею з пожежними гідрантами. Внутрішній протипожежний водопровід з пожежними кранами дозволяє оперативно подати воду в будь-яку точку цеху. Насосна станція підтримує необхідний тиск в системі, а резервуари забезпечують запас води для гасіння пожежі.

Найбільш пожежонебезпечні ділянки стану захищені автоматичними системами пожежогасіння. Маслопідвали обладнані дренчерними завісами, електрошафи - автоматичними системами газового пожежогасіння. Трансформаторні приміщення та кабельні тунелі захищені спеціальними системами, що враховують особливості цих об'єктів.

Безпечна евакуація персоналу при пожежі забезпечується продуманим плануванням евакуаційних шляхів. Евакуаційні виходи розташовані з урахуванням максимально допустимої відстані до них з будь-якої точки цеху. Світлові покажчики та аварійне освітлення дозволяють орієнтуватися при задимленні, а система димовидалення створює безпечні умови для евакуації.

Важливу роль у забезпеченні пожежної безпеки відіграє навчання персоналу. Всі працівники проходять протипожежні інструктажі та практичні тренування з евакуації. На стані створена добровільна пожежна дружина з числа працівників, які пройшли спеціальну підготовку та здатні оперативно реагувати на загрозу пожежі.

Особливий порядок встановлено для проведення вогневих робіт. Їх виконання допускається тільки після оформлення наряду-допуску, ретельної підготовки місця проведення робіт та забезпечення необхідними засобами пожежогасіння. Після завершення робіт здійснюється контроль місця їх проведення протягом встановленого часу.

Ефективність системи протипожежного захисту підтримується регулярними перевірками та випробуваннями всіх її елементів. Проводиться технічне обслуговування систем пожежної сигналізації та пожежогасіння, перевіряється працездатність пожежних кранів та гідрантів. Особлива увага приділяється утриманню в належному стані евакуаційних шляхів та систем димовидалення.

На випадок виникнення пожежі розроблено чіткий алгоритм дій персоналу[10], який включає негайне повідомлення пожежної охорони, зупинку технологічного обладнання та організацію евакуації людей. Оперативний план пожежогасіння, узгоджений з пожежною охороною, визначає порядок взаємодії всіх служб при ліквідації пожежі.

4.5 Охорона навколишнього середовища

Експлуатація прокатного стану 550 здійснює комплексний вплив на навколишнє середовище, що проявляється у викидах забруднюючих речовин в атмосферу, утворенні стічних вод та промислових відходів. Для мінімізації цього впливу на підприємстві впроваджено систему екологічного менеджменту, що охоплює всі аспекти виробничої діяльності.

Захист атмосферного повітря є одним з пріоритетних напрямків природоохоронної діяльності. Основними джерелами забруднення атмосфери на стані виступають нагрівальна піч, де утворюються продукти згоряння природного газу, та прокатні кліті, що є джерелом металевого пилу та окалини. Додаткове навантаження створюють системи гідрозбиву окалини та масляні системи, від яких надходять водяний туман та випари мастил.

Для зниження викидів забруднюючих речовин на стані впроваджено сучасні технічні рішення. Нагрівальна піч оснащена пальниками з низьким утворенням оксидів азоту, а відпрацьовані гази проходять двоступеневу систему очистки. Для уловлювання металевого пилу використовуються

високоефективні циклони, а масляний туман вловлюється спеціальними фільтрами.

Водні ресурси на стані використовуються максимально раціонально завдяки впровадженню оборотної системи водопостачання. Вода, що використовується для охолодження валків, підшипників та систем гідрозбиву окалини, після очищення повертається в технологічний цикл. Це дозволяє суттєво знизити споживання свіжої води та зменшити скид забруднених стоків.

Очищення стічних вод здійснюється комплексно, з використанням різних методів залежно від характеру забруднень. Окалина вловлюється у відстійниках, нафтопродукти видаляються в нафтоуловлювачах, а фінішне очищення проводиться на фільтрувальних установках. Господарсько-побутові стоки проходять повний цикл біологічної очистки перед скиданням у міську каналізацію.

Особлива увага приділяється поводженню з відходами виробництва. Найбільш масовим відходом є металева окалина, яка збирається в спеціальні бункери, проходить зневоднення та брикетування. Завдяки високому вмісту заліза, брикетована окалина успішно використовується в металургійному виробництві, що забезпечує її повну утилізацію.

Відпрацьовані мастила, що утворюються при експлуатації стану, збираються в спеціальні ємності та проходять очищення від механічних домішок. Частина мастил після регенерації повторно використовується у виробництві, а решта передається на спеціалізовані підприємства для утилізації або використання як компонента палива.

На стані реалізується програма енергозбереження, спрямована на зниження споживання енергоресурсів[35]. Впроваджена автоматизована система управління нагрівом заготовок дозволяє оптимізувати витрати газу. Тепло відхідних газів утилізується для підігріву води, а застосування частотного регулювання електроприводів знижує споживання електроенергії.

Ефективність природоохоронних заходів контролюється системою виробничого екологічного моніторингу[29]. Регулярно проводяться виміри викидів забруднюючих речовин, аналізується якість стічних вод, ведеться облік утворення відходів. Результати моніторингу використовуються для оперативного корегування природоохоронних заходів та планування екологічних інвестицій.

Для оцінки впливу стану на навколишнє середовище періодично проводиться комплексне обстеження, що включає інвентаризацію джерел викидів та розрахунок їх розсіювання в атмосфері. На основі цих даних визначаються розміри санітарно-захисної зони та оцінюються ризики для здоров'я населення прилеглих територій.

Вся природоохоронна діяльність на стані здійснюється у тісній співпраці з контролюючими органами та громадськістю [31]. Інформація про вплив на довкілля та вжиті природоохоронні заходи регулярно оприлюднюється, а пропозиції громадськості враховуються при плануванні екологічних заходів. Такий підхід забезпечує прозорість екологічної політики підприємства та сприяє підвищенню її ефективності.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень процесу термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т можна зробити наступні висновки:

На підставі виконаного аналізу наукової літератури встановлено, що для забезпечення високих експлуатаційних характеристик нержавіючих сталей спеціального призначення необхідно застосовувати комплексний підхід до їх термомеханічної обробки, що враховує особливості структуроутворення при деформації та подальшому охолодженні.

В результаті математичного планування експерименту розроблено регресійні моделі, що описують вплив основних технологічних параметрів на властивості досліджуваних сталей. Встановлено, що визначальний вплив на формування структури та механічних властивостей має температура кінця прокатки, тоді як загальний час нагріву виявився статистично незначущим фактором.

Дослідження мікроструктури показало, що термомеханічне зміцнення забезпечує формування однорідної дрібнозернистої структури з середнім розміром зерна 6-7 балів для обох досліджуваних марок сталей. При цьому сталь 07Х18Н10 характеризується більш рівномірним розподілом розміру зерна порівняно зі сталлю 08Х17Н13М2Т.

Встановлено оптимальні режими термомеханічної обробки, які забезпечують необхідний комплекс механічних властивостей:

- для сталі 07Х18Н10: температура початку деформації 1150-1180°С, температура кінця прокатки 1040-1060°С, сумарний ступінь деформації 65-70%;

- для сталі 08Х17Н13М2Т: температура початку деформації 1180-1200°С, температура кінця прокатки 1060-1080°С, сумарний ступінь деформації 60-65%.

На основі результатів досліджень розроблено та впроваджено у виробництво технологію термомеханічного зміцнення нержавіючих сталей у потоці стану 550. Промислові випробування підтвердили високу стабільність процесу - коефіцієнти варіації механічних властивостей не перевищують 5-7%.

Визначено закономірності впливу хімічного складу сталей на їх поведінку при термомеханічному зміцненні. Показано, що підвищений вміст легуючих елементів у сталі 08Х17Н13М2Т потребує корегування режимів обробки для забезпечення стабільних властивостей.

Розроблені технологічні рекомендації та математичні моделі створюють основу для подальшого вдосконалення процесів термомеханічної обробки нержавіючих сталей спеціального призначення в умовах промислового виробництва.

Отримані результати вирішують важливе науково-технічне завдання підвищення якості прокату нержавіючих сталей шляхом оптимізації режимів їх термомеханічного зміцнення в потоці прокатного стану.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Uranga P., María Rodríguez-Ibabe J. Thermomechanical Processing of Steels. Metals. 2020. Vol. 10, № 5. P. 641. DOI: 10.3390/met10050641
2. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.
3. Wei Y., Li Y., Zhu L., Liu Y., Lei X., Wang G., Wu Y., Mi Z., Liu J., Wang H., Gao H. Evading the strength–ductility trade-off dilemma in steel through gradient hierarchical nanotwins. Nature Communications. 2014. Vol. 5. Article 3580. DOI: 10.1038/ncomms4580
4. Astafurova E., Moskvina V., Panchenko M., Maier G., Melnikov E., Reunova K., Galchenko N., Astafurov S. On the superplastic deformation of vanadium alloyed high-nitrogen steel. Metals. 2020. Vol. 10, № 1. P. 27. DOI: 10.3390/met10010027
5. Dowding I., Schuh C. A. Metals strengthen with increasing temperature at extreme strain rates. Nature. 2024. Vol. 630. P. 91-95. DOI: 10.1038/s41586-024-07420-1
6. Tang Y., Wang H., Ouyang X. et al. Overcoming strength-ductility tradeoff with high pressure thermal treatment. Nature Communications. 2024. Vol. 15. P. 3932. DOI: 10.1038/s41467-024-48435-6
7. Judge V. K., Speer J. G., Clarke K. D. et al. Rapid Thermal Processing to Enhance Steel Toughness. Scientific Reports. 2018. Vol. 8. P. 445. DOI: 10.1038/s41598-017-18917-3
8. Dolzhenko A., Kaibyshev R., Belyakov A. Tempforming as an Advanced Processing Method for Carbon Steels. Metals. 2020. Vol. 10, № 12. P. 1566. DOI: 10.3390/met10121566
9. Данченко В. М., Гринкевич В. О., Головко О. М. Теорія процесів обробки металів тиском: підручник. Дніпропетровськ : Пороги, 2008. 370 с.

10. Кухар В.В., Аніщенко О. С., Присяжний А. Г.Основи експериментальних методів дослідження процесів обробки металів тиском : навчальний посібник. Маріуполь : ПДТУ, 2019. 234 с.
11. Середа Б.П. Прокатне виробництво. Навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 312 с.
12. Середа Б.П. Прокатне виробництво. Навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 344 с.
13. Баздирев В. С., Іванов В. І., Нестеренко Т. М., Середа Б. П. Про зниження зневуглецювання каліброваної сталі в термічних печах. *Металознавство та обробка металів*. 2002. №4. С.31-34.
14. Тарасенко В. М., Калюжний В. Л. Використання метода граничних елементів в математичному моделюванні процесів обробки металів тиском. *Технологические системы*. 2005. № 5- 6 (31-32). С.77-79.
15. Гожій С. П. Засади і проблеми використання ресурсозберігаючих технологій обробки металів тиском. *Технологические системы*. 2006. № 2 (34). С. 64-68.
16. Хімін В. М., Федьков Г. О. Конструкції агрегатів цехів обробки металів тиском. Обладнання цехів обробки металів тиском : метод. посіб. для студентівЗДІА спец. 7.090404, 8.090404 "Металургія" / ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2006. 78 с. : іл., табл.
17. Проценко В. М. Калібровка, обтискне та сортове виробництво : метод. вказівки до практ. занять, курс. проекту (роботи) і самост. роботи для студентів ЗДІА, що навчаються за спец. 136 "Металургія" (спеціалізація "ОМТ"), на першому (бакалавр.) рівні вищ. освіти ден. та заоч. форм навчання / ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 57 с. : іл., табл.
18. Явтушенко О. В., Проценко В. М., Корнілов О. О. Розрахунки валків прокатних станів на міцність і деформацію у програмному комплексі "AutoCAD Mechanical". *Металургія*. 2018. № Вип. 2. С. 85-90.
19. Середа Б. П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для внз. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 343 с. : іл., табл.

20. Середа Б. П., Кругляк І. В., Жеребцов О. А., Бєлоконь Ю. О. Обробка металів тиском при нестаціонарних температурних умовах : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 250 с. : іл., табл.
21. Сивак І. О. Розвиток прикладної теорії деформуємості металів та її застосування для аналізу та удосконалення процесів обробки тиском : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05: захищ. 25.04.01. Краматорськ, 2001. 36 с.102
22. Середа Б. П., Прищип М. Г., Кругляк І. В., Кругляк Д. О. Технологія процесів обробки металів тиском : навч.-метод. посіб. для студ. ЗДІА спец. 6.05040104 "Обробка металів тиском" / МОНМС України, ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 161 с.
23. Середа Б. П., Критська Т. В., Жеребцов О. А. Дослідження та вдосконалення процесів обробки металів тиском : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 6.05040104 "Обробка металів тиском" / ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 122 с.
24. Теорія обробки металів тиском: навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 6.05040104 «Обробка металів тиском» /Середа Б. П., Бєлоконь Ю. О., Оніщенко А. М.; Запоріз. держ. інж. акад. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 132 с.
25. Бєлоконь Ю. О., Бондаренко Ю. В., Проценко В. М., Явтушенко А. В., Кругляг Д. О. , Проценко В. М., Явтушенко А. В., Кругляг Д. О. Вдосконалення технології сортової прокатки дуплексної неіржавкої сталі з метою поліпшення якості металу. *Металургия.* 2021. Вип. 2. С. 75-79.
26. Прокатка і калібрування: Довідкове видання у 6 т. / Б.М. Ілюкович, Н.Є. Нехаєв, В.П. Капелюшний /. Під ред. Б.М. Ілюковича. Д.: РІА "Дніпро-ВАЛ", 2003, т. 3. 429 с.103
27. Manohar, P. A. Through-Process Modeling for Hot Processing of Advanced High Strength Steel Strips. In: Holm, E. A., et al. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Recrystallization and Grain Growth (ReX&GG 2016). Springer, Cham, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48770-0_24

28. Becerril-Sánchez A. L., Quintero-Salazar B., Dublán-García O., Escalona-Buendía H. B. Phenolic Compounds in Honey and Their Relationship with Antioxidant Activity, Botanical Origin, and Color. Antioxidants. 2021. Vol. 10, № 11. P. 1700. DOI: 10.3390/antiox10111700
29. Bleck W., Brühl F., Ma Y., Sasse C. Materials and Processes for the Third-generation Advanced High-strength Steels. Berg Huettenmaenn Monatsh. 2019. Vol. 164, № 11. P. 466-474. https://doi.org/10.1007/s00501-019-00904-y
30. Demeri, M. Y. *Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Applications*. Second Edition. ASM International, 2024, 525 p. DOI: 10.31399/asm.tb.ahss2ed
31. Dossett J. L. Practical Heat Treating: Basic Principles. Materials Park: ASM International, 2020. 283 p. DOI: 10.13399/asm.tb.phtbp.9781627083263
32. Bhadeshia H. K. D. H., Honeycombe R. Steels: Microstructure and Properties. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-0-7506-8084-4. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8084-4.X5000-6
33. Manohar, P.A. (2016). Through-Process Modeling for Hot Processing of Advanced High Strength Steel Strips. In: Holm, E.A., et al. Proceedings of the 6th International Conference on Recrystallization and Grain Growth (ReX&GG 2016). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48770-0_24
34. De Moor E. Advanced High-Strength Sheet Steels for Automotive Applications. High-Performance Ferrous Alloys / ed. R. Rana. Cham: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-53825-5_4
35. Bleck W., Brühl F., Ma Y. et al. Materials and Processes for the Third-generation Advanced High-strength Steels. Berg Huettenmaenn Monatsh. 2019. Vol. 164. P. 466-474. DOI: 10.1007/s00501-019-00904-y

Додаток А

«ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Науково-дослідна частина
Наукове товариство
студентів, аспірантів і докторантів
Рада молодих вчених

ЗБІРНИК
наукових праць студентів,
здобувачів PhD, докторантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2024»

Том V

«Секції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету»

Запоріжжя
2024

скоротити витрати споживачів гарячекатаного прокату. При обробці штаби в клітях стану гарячої прокатки формується її товщина, ширина та профіль поперечного перерізу. Однак виміряна на виході останньої кліті чистової групи площинність штаби не є остаточною: вона може значно відрізнятися від площинності, яка вимірюється у споживача. Це свідчить про те, що при змотуванні та охолодженні рулону площинність гарячекатаних штаб може змінюватися під впливом внутрішніх напруг та високої температури [1].

Мета роботи – аналіз формозмінення гарячекатаної штаби завтовшки в рулоні, прогнозування площинності остиглої штаби та розробка рекомендацій щодо зниження втрат металу у цеху холодної прокатки від неплощинності гарячекатаної штаби.

Розглянуто модель напружено-деформованого стану та теплового стану гарячекатаної штаби у процесі охолодження. У моделі враховується утворення та зміна міжвіткових зазорів при змотуванні та охолодженні неплоскої, шорсткої та опуклої штаби. Розроблено модель зміни площинності штаби в процесі змотування та охолодження рулону гарячекатаної сталі. Досліджено вплив опуклості, шорсткості та натягу при змотуванні штаби в рулон на процес формозміни при змотуванні та охолодженні рулону.

Література

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

Кушніренко Олег
магістрант 1 року ІННІ ім. Ю.М. Потебні
Наук. кер.: д-р техн. наук, проф. Бєлоконь Ю.О.

ТЕРМОМЕХАМІЧНЕ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Мета роботи – розробка та удосконалення технології термохімічного зміцнення прокату нержавіючих сталей у потоці стана 550, що забезпечує показники якості в готовому прокаті на рівні загартованих зразків.

Проведено грунтовний огляд літературних джерел за останні десять років. Це дозволило визначити актуальність проблематики, виявити аналогічні наукові роботи та відстежити сучасний стан обраної теми у виробничій сфері металургійної галузі.

Проаналізовано процес прокатування інструментальних сталей на безперервному чотирьохклітьовому середньосортовому стані гарячої прокатки 550. Надано характеристики енергосилових та температурно-швидкісних параметрів процесу. Визначено, що оптимізація зазначених параметрів є актуальним завданням для підвищення ефективності роботи розглянутого прокатного стану. Розроблено та впроваджено технологію гартування прокату нержавіючих сталей 07Х18Н10 та 08Х17Н13М2Т

безпосередньо у потоці стану 550. Це забезпечує показники якості готового прокату на рівні загартованих зразків.

Використання гартування нержавіючих сталей у потоці стану 550 дозволяє виключити з технологічної схеми окрему операцію гартування прокату сортаменту цього стану, яка проводилася в ковальсько-пресовому цеху. Це забезпечує економію понад 100 грн/т та підвищує технологічність прокату при подальшій обробці.

Для підвищення коефіцієнта відтворюваності процесу щодо розміру аустенітного зерна необхідно вжити заходів зі стабілізації температури кінця прокатки нержавіючих сталей на стані 550. Також для підвищення стабільності результатів процесу гартування доцільно встановити додаткові вентилятори на шляху проходження розкату та застосовувати метод водно-повітряного охолодження.

Література

1. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V, Bondarenko Y, Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *Conference Proceedings – METAL 2020*. 29th International Conference on Metallurgy and Materials. May 20 - 22, 2020, Brno, Czech Republic, EU. P. 440 – 445.
2. Romano-Acosta, L. F., García-Rincon, O., Pedraza, J. P., & Palmiere, E. J. (2021). Influence of thermomechanical processing parameters on critical temperatures to develop an Advanced High-Strength Steel microstructure. Journal of Materials Science, 56(33), 18710–18721. doi:10.1007/s10853-021-06444-6

Мирна Анна
студентка 3 курсу ІННІ ім. Ю.М. Потебні
Наук. кер.: канд. техн. наук, доц. Манідіна Є. А.
д-р філос., ст. викл. Грідяєв В.В.

РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ТА ЗАСОБІВ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Вода відіграє важливу роль в житті людини. Щомісяця кожна людина витрачає в середньому близько 3937 л. Отже, впровадження систем раціонального водокористування є актуальною задачею сьогодення.

Дощова вода має низьку мінералізацію, відповідно, практично не містить розчинених речовин. Атмосферне повітря залежно від регіону може містити величезну кількість різноманітних забруднювачів, що можуть значно впливати на склад дощових вод. Проведений аналіз проб дощової води в різних регіонах Україні підтвердив вплив індустріальної забарвленості міст на склад дощових вод (табл.1).