Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

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

Кваліфікаційна робота магістра

рівень вищої освіти__другий (магістерський) рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему *Оцінка впливу двостадійного охолодження на технологічність процесу прокатки та волочіння*

Виконав: студент _2_курсу, гр. *8.1363-омт-дн*
___ Мишаков О.П._____
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

Керівник _Карпенко Г.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент _Воденнікова О.С._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2025 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

"___" _____2025 року

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

Мишакову Олександр Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) *Оцінка впливу двостадійного охолодження на технологічність процесу прокатки та волочіння*
керівник роботи (проєкту)*Карпенко Ганна Володимирівна, канд. техн. наук*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "28" лютого 2024 року № 359-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта). *19.02.2025*
3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити: 1 Сучасний стан та загальна характеристика прокатного виробництва. 1.1 Сортамент прокату та його вихідний матеріал 1.2 Загальна схема сучасного прокатного виробництва. 1.3 Нагрів та охолодження металу. 1.3.1 Основи режиму нагрівання. 1.3.2 Охолодження прокату. 2 Дослідницька частина. 2.1 Вимоги, що висуваються до структури та властивостей катанки з низьковуглецевої сталі. 2.2 Методика проведення дослідження технології прискореного охолодження низьковуглецевої катанки на дротовому стані ПС-250-1 шляхом перерозподілу потоку води. 2.3 Вплив технології прискореного охолодження методом перерозподілу потоку води на технологічність процесів прокатки та волочіння. 3 Спеціальна частина. 3.1 Аналіз калібрування валків безперервних дротових станів 250. 4 Охорона праці та

техногенна безпека. 4.1 Аналіз умов проведення експерименту щодо небезпечних та шкідливих виробничих факторів. 4.2 Заходи по створенню безпечних умов праці дослідника.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Креслення, презентаційний матеріал 10 слайдах (на 10 сторінках)*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
1 Сучасний стан та загальна характеристика прокатного виробництва	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
2 Дослідницька частина	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
3 Спеціальна частина	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
4 Охорона праці та техногенна безпека	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., зав. кафедрою*	

7. Дата видачі завдання: *01.03.2024 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	1 Сучасний стан та загальна характеристика прокатного виробництва		
4	2 Дослідницька частина		
4	3 Спеціальна частина		
5	4 Охорона праці та техногенна безпека		

Студент _____ *О.П. Мишаков*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Г.В. Карпенко*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної робота магістра: 102 с., 18 табл., 21 рис., 32 джерела посилання.

НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВА СТАЛЬ, ПРОКАТКА, ДВОСТАДІЙНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ, СТРУТУРА, ОКАЛІНА, НАГРІВАННЯ, ОХОЛОДЖЕННЯ

Об’єкт дослідження – двостадійнє охолодження процесу прокатки та волочіння сталі

Предмет дослідження – низьковуглецева сталь БСт3кп.

Мета роботи – вплив параметрів контрольованої прокатки на структуру та властивості низьковуглецевої сталі .

Методики дослідження – розроблені та стандартні методики

В роботі розглянуті сучасний стан та загальна характеристика прокатного виробництва проведений всебічний аналіз сортаменту прокату та його вихідних матеріалів. Наведені загальні схеми сучасного прокатного виробництва та основи процесів нагріву та охолодження металу, технологічні основи режимів нагрівання та охолодження прокату.

Проведено ряд досліджень які описують структуру та властивості катанки з низьковуглецевої сталі. Представлено методику дослідження технології прискореного охолодження низьковуглецевої катанки на дротовому стані ПС-250-1 шляхом перерозподілу потоку води. Визначені основні етапи технології прискореного охолодження методом перерозподілу потоку води на технологічність процесів прокатки та волочіння, шорсткість поверхні катанки і готового дроту.

Проаналізовано роботу валкової арматури стану, склад та кількість окалини, кількість «забурювань» чистові кліті стану та визначена стуктура катанки отриманої за запропонованим технологічним рішення.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА 10
1.1 Сортамент прокату та його вихідний матеріал 10
1.2 Загальна схема сучасного прокатного виробництва 13
1.3 Нагрів та охолодження металу 21
1.3.1 Основи режиму нагрівання 21
1.3.2 Охолодження прокату 28
Висновки 34
2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА 35
2.1 Вимоги, що висуваються до структури та властивостей катанки з низьковуглецевої сталі 35
2.2 Методика проведення дослідження технології прискореного охолодження низьковуглецевої катанки на дротовому стані ПС-250-1 шляхом перерозподілу потоку води 41
2.3 Вплив технології прискореного охолодження методом перерозподілу потоку води на технологічність процесів прокатки та волочіння 49
2.3.1. Шорсткість поверхні катанки і готового дроту 49
2.3.2 Робота валкової арматури стану 49
2.3.3 Склад та кількість окалини 50
2.3.4 Кількість «забурювань» чистові кліті стану 54
2.3.5 Механічні властивості катанки та готової прокатки 54
2.3.6 Структура катанки 60
Висновки 66
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА 68
3.1 Аналіз калібрування валків безперервних дротових станів 250 68
3.2 Розрахунок калібрування валків для прокатки катанки діаметром 6,5 та 8,0 мм з сталі БСт.3кп для вимог дротових станів 250-1,2 69

3.2.1 Розподіл коефіцієнтів витяжки та розрахунок орієнтовного швидкісного режиму прокатки 69
3.2.2 Вибір систем калібрування і складання схем калібрування 73
3.2.3 Розрахунок формозмінення металу і розмірів калібрів 79
Висновки 94
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 95
4.1 Аналіз умов проведення експерименту щодо небезпечних та шкідливих виробничих факторів 95
4.2 Заходи по створенню безпечних умов праці дослідника 95
4.3 Техногенна безпека 98
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 99
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 100

ВСТУП

Контрольована прокатка є високотемпературною обробкою низьколегованої сталі і передбачає певне поєднання основних параметрів гарячої деформації: температури нагрівання і кінця прокатки; сумарного ступеня деформації та розподілу деформації за температурою; швидкості охолодження і т. д. У температурному інтервалі прокатки з контрольованим режимом деформацій в металі, що деформується, можна відзначити три стадії зміни структури. На першій стадії (> 950 °С) у процесі деформації відбувається рекристалізація; на другій стадії (<950 °С) метал зміцнюється внаслідок подрібнення структури та підвищення щільності дислокацій. На третій стадії (деформація при 800…700 °С) відбувається дисперсійне твердіння сталей, легованих карбідо- та нітридоутворюючими елементами (Mo, Nb, V, Ti) внаслідок виділення надлишкових фаз.

При контрольованій прокатці листів великі ступені обтискання призначають переважно в області відносно невисоких температур (<800°С). Закінчують прокатку при температурі <750-700 °С. На широкосмуговому стані контрольовану прокатку проводять в області високих температур, за яких відбувається швидка рекристалізація аустеніту. У цьому випадку найбільш важливі технологічні параметри - швидкість охолодження смуги до температури перетворення аустеніту і температура змотування смуги в рулон, оскільки ступінь впливу мікролегуючих елементів (Nb, V, Mo та ін) на дисперсійне твердіння сталі також залежить від умов охолодження листів та смуг.

Одна з головних цілей контрольованої прокатки - отримання в готовому прокаті з низьковуглецевої низьколегованої сталі дрібнозернистої структури фериту, що визначає міцність і високий опір в'язкому та тендітному руйнуванню. Розмір зерна фериту гарячекатаної сталі залежить від хімічного складу сталі та сукупності технологічних факторів: умов нагріву слябів під прокатку; температурного режиму прокатки (особливо при останніх

проходах); ступеня та кратності обтиснення; швидкість охолодження між проходами; температури смотування смуги.

Режим нагрівання слябів перед прокаткою вибирають з огляду на хімічний склад сталі та вимоги до її якості.

При контрольованій прокатці сталей з мікродобавками карбо- і нітридоутворюючих елементів (V, Nb, Ті та ін) температуру нагрівання слябів знижують, що веде до зниження міцності та підвищення холодостійкості. При зниженні температури нагріву марганцовистої сталі, мікролегованої ніобієм, з 1200 до 1000 °С, межа плинності гарячекатаного листа збільшується приблизно на 30 МПа, а перехідна температура знижується з 0 до -50 °С. Досвід показує, що для отримання прокату холодостійкого з мікролегованих сталей контрольованою прокаткою найбільш прийнятна температура початку прокатки 1150-1200 °С.

Низькотемпературне нагрівання слябів доцільно проводити в печах з крокуючими балками, тому що в них на відміну від штовхальних печей сляби нагріваються не з двох, а з чотирьох сторін, що підвищує рівномірність нагріву.

Сталі, що піддаються контрольованій прокатці, містять мікролегуючі елементи, що суттєво впливають на кінетику рекристалізації та сприяють отриманню дрібного зерна аустеніту і відповідно фериту.

Внаслідок затримки рекристалізації аустеніту при температурі 900 °С (і нижче) при наступних проходах додатково деформуються не рекристалізовані зерна аустеніту. Це сприяє утворенню в гарячекатаній сталі дрібнозернистої структури, що визначає хороше поєднання властивостей міцності та в'язкості.

Промислова контрольована прокатка низьковуглецевих сталей на другому етапі зазвичай проводиться в діапазоні температур Ar3-Ar1 при сумарній деформації > 66 %.

Зниження температури кінця прокатки збільшує межу плинності. При зниженні температури кінця прокатки з 950 до 800 °С температура переходу від в'язкої руйнації до тендітного знижується. Подальше зниження

температури кінця прокатки неоднаково впливає сталі різного хімічного складу.

Контрольована прокатка може застосовуватися при рулонному способі виробництва.

Сучасною тенденцією на ринку гарячекатаного прокату є розширення його номенклатури при одночасному посиленні вимог щодо якості продукції. У повному обсязі задовольнити ці вимоги можна шляхом комплексного підходу до визначення технологічних параметрів виробничого процесу.

Контрольована прокатка являє собою різновид процесу високотемпературної термомеханічної обробки сталей і сплавів, що характеризується регламентованими, в залежності від хімічного складу, умовами нагріву металу, температурними і деформаційними параметрами процесу і заданими режимами охолодження металу на різних стадіях пластичної обробки, результатом чого є отримання структури, при якій збільшується Ця технологія дозволяє отримувати оптимальні поєднання міцності та в'язких властивостей готового прокату без використання термічної обробки і при нижчій витраті дефіцитних легуючих добавок.

Характерними технологічними особливостями контрольованої прокатки листів проти звичайними режимами є: зниження температурних умов процесу, особливо у кінцевої стадії; збільшення ролі охолодження гуркотів у процесі деформації та після її закінчення.

Виробництво сталевого листа, що відповідає підвищеним вимогам, можливе лише за умови застосування принципово нової технології, одним із найважливіших елементів якої є контрольована прокатка. Впровадження контрольованої прокатки пов'язане з вирішенням багатьох проблем, з яких основним є регулювання температури металу в процесі деформації.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Сортамент прокату та його вихідний матеріал

Сортамент профілів прокату, що випускаються, різноманітний. Профілем прокату називають форму поперечного перерізу. Розрізняють профілі круглого, квадратного, смугового, а також рейкового, балкового та іншого поперечного перерізу. Сукупність профілів та їх розмірів, а також сталей, з яких їх виготовляють називають сортаментом. Наприклад, сортамент профілів круглого, квадратного, шестигранного та прямокутного (смуги, гарячекатані стрічки) перерізу з вуглецевої та легованої конструкційної сталі становить групу сортових профілів прокату загального призначення.

Металопрокат, що випускається металургійними заводами, за розмірами та якістю відповідає вимогам державних стандартів або технічних умов. Основні завдання стандартизації, категорії та види стандартів визначено ДСТУ 1.0:2003 "Державна система стандартизації. Основні положення". Відповідно до ДСТУ 1.0:2003 встановлено єдину Державну систему стандартизації, узаконено основні поняття "стандартизація" та "стандарт", визначено об'єкти стандартизації. Державна система стандартизації України передбачає три категорії стандартів: державні стандарти – ДСТУ, галузеві стандарти – ОСТ, стандарти підприємств – СТП або ТУ.

У чорній металургії діє понад 1000 державних стандартів, у тому числі близько 200 можна віднести до стандартів за методами контролю, а решта - до стандартів, що нормують технічні вимоги та умови постачання, тобто. показники якості товарної продукції [1,2].

Державні стандарти встановлюють вимоги насамперед до якості товарної продукції, є мірою якості - еталонами, визначальними кількісні показники основних властивостей продукції, наприклад, прокату. Сукупність властивостей прокату (хімічний склад, форма і розміри, якість поверхні і т.д.)

дозволяє визначити відповідність продукції, що розглядається, своєму основному призначенню. Чим вище показники якості, які встановлюються стандартами, тим вищий рівень якості продукції. Отже стандарти дозволяють керувати її якістю. Стандартизовано понад 95% товарного прокату.

Широке охоплення стандартизацією продукції прокатних цехів дозволяє забезпечувати вимоги споживачів, що підвищують, до якості прокату.

При розгляді сортаменту прокату розрізняють марочний та профільний сортамент. Замовлення на металургійний завод надходить взагалі на профіль, але в профіль з певної марки сталі (хімічного складу).

Марочний сортамент прокату дуже різноманітний. Основною класифікаційною ознакою марочного сортаменту є хімічний склад. Залежно від хімічного складу розрізняють сталі вуглецеві (табл. 1.1).

Вуглецева сталь підрозділяється за якістю на сталь звичайної якості та якісну, за призначенням - на конструкційну та інструментальну, за вмістом вуглецю на низько-, середньо- та високовуглецеву; класифікують також за способом виробництва та за іншими ознаками.

Леговану сталь залежно від легуючого компонента по хімічному складу поділяють на хромисту, марганцеву, кремнисту, хромонікелеву і т.д., за призначенням - на конструкційну, інструментальну, сталі і сплави з особливими властивостями, по структурі - на види у відпаленому і нормалізованому стані, мартенівську, конвертерну, електросталь тощо.

З наведеного марочного сортаменту зливки всіх вуглецевих, легованих конструкційних, корозійностійких, жаростійких, теплостійких і електротехнічних сталей обробляють прокаткою, а інструментальних легованих, сплавів на залізонікелевій і нікелевій основі, а також прецизійних сплавів та профіль.

Таблиця 1.1 - Класифікація вуглецевої сталі

№	Ознака класифікації	Види стали	Марки стали
	За якістю	Звичайної якості ДСТУ 2651:2005 S ≤ 0,05% P ≤ 0,04 % Якісна, ДСТУ 7809:2015 S ≤ 0,040% P ≤ 0,035%	Гр. А - поставляється за механічними властивостями Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6 Гр. Б - поставляється за хімічним складом БСт0, БСт0, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6 Гр. В - поставляється за механічними властивостями та хімічним складом ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5 05кп, 08кп, 08пс, 08,10кп, 10пс, 10 11кп, 15кп, 15пс, 15, 18кп, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 58 (55пп), 60
	За призначенням	Конструкційна	стали п. 1
		Інструментальна, ДСТУ 3833-98	Якісна (S ≤ 0,028 %; P ≤ 0,030 %) - У7, У8, У8Г, У9, У10, У11, У12, У13 Високоякісна (S < 0,018 %, P < 0,025 %) - У7А, У8А, У1А, У10, У9

Продовж. табл. 1.1

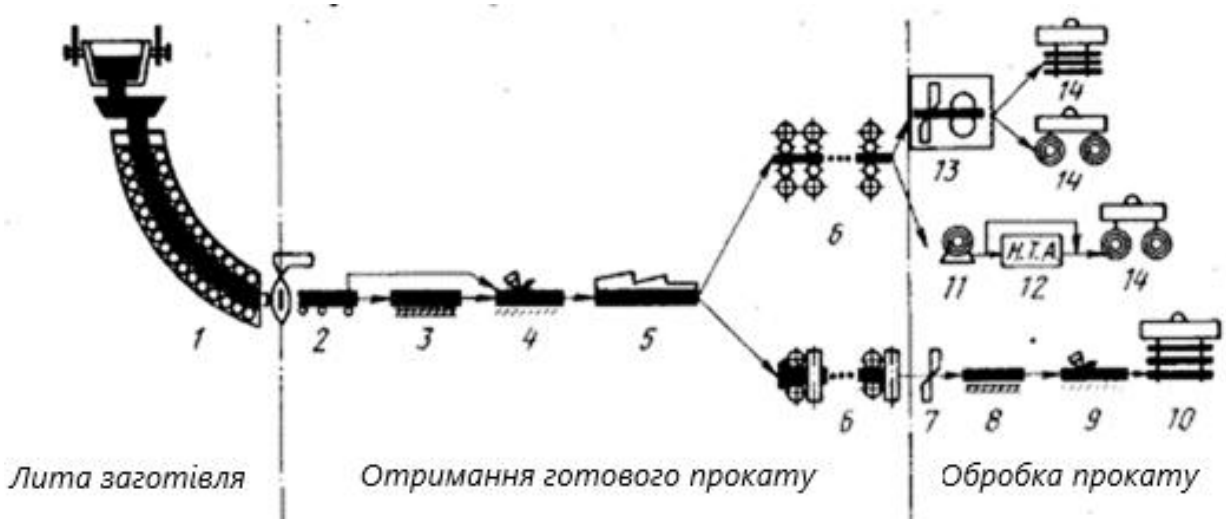
	За вмістом вуглецю	Низьковуглецева	Вміст до 0,30% С (Ст0-Ст4; 05-25)
		Середньовуглецева	Вміст 0,30-0,60% С (Ст5-Ст6, 30-60)
		Високовуглецева	Вміст понад 0,60% С (У7-У13)
	За способом виробництва	Мартенівська (М), конвертерна (К), електросталь (Е) та ін.	

Профільний або розмірний сортамент прокату охоплює заготівлі всіх видів, листи, сортові та фасонні профілі, періодичні профілі та спеціальні (інші) види прокату. До заготовок всіх видів відносять блюми, сляби, заготовки сталеві квадратні гарячекатані (передільні), осьові, трубні та ін.

1.2 Загальна схема сучасного прокатного виробництва

Схема прокатного виробництва відбиває рівень розвитку науки і техніки та потреби народного господарства у прокаті. Нині існують три важливі схеми отримання прокату:

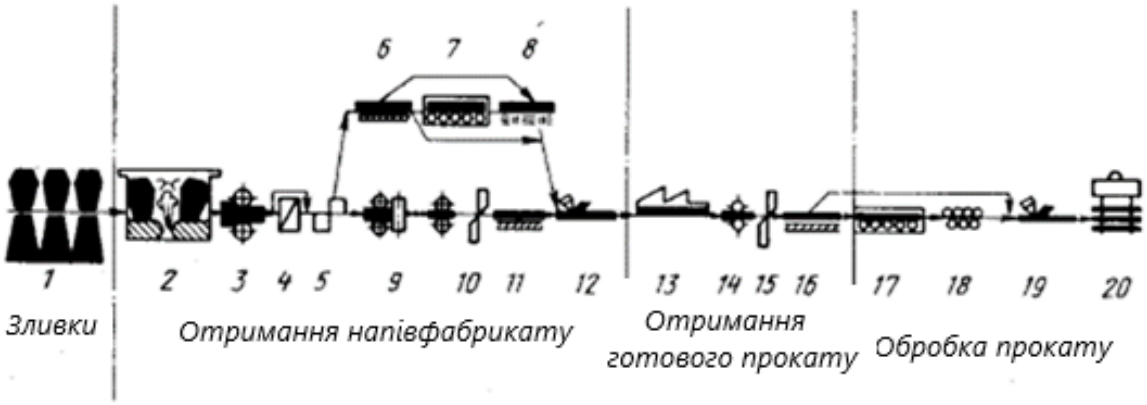
1) лита заготовка - готовий прокат, тобто. литі заготовки, отримані на МНЛЗ, минаючи обтискний стан, прокочують на сортових або листових станах для отримання готового прокату (рис. 1.1);



1 - МНЛЗ; 2 - розкрій литої заготовки на задані довжини; 3 – охолодження; 4 – зачистка дефектів; 5 - нагрівання в методичній печі; 6 - прокатка на сортовому або листовому таборі на готові профілі; 7 - розкрий гуркотів; 8 – охолодження; 9 - обробка сортового прокату на ад'юстажі; 10 - упаковка, маркування, відвантаження; 11 - змотування смугової сталі в рулони; 12 - травлення у рулонах на безперервних травильних агрегатах (НТА); 13 - обробка листової сталі на агрегатах поперечного (поздовжнього) розкрою; 14 - упаковка, маркування, відвантаження сортових чи листових станів на готовий прокат (рис. 1.4). У всіх схемах прокат піддається обробці.

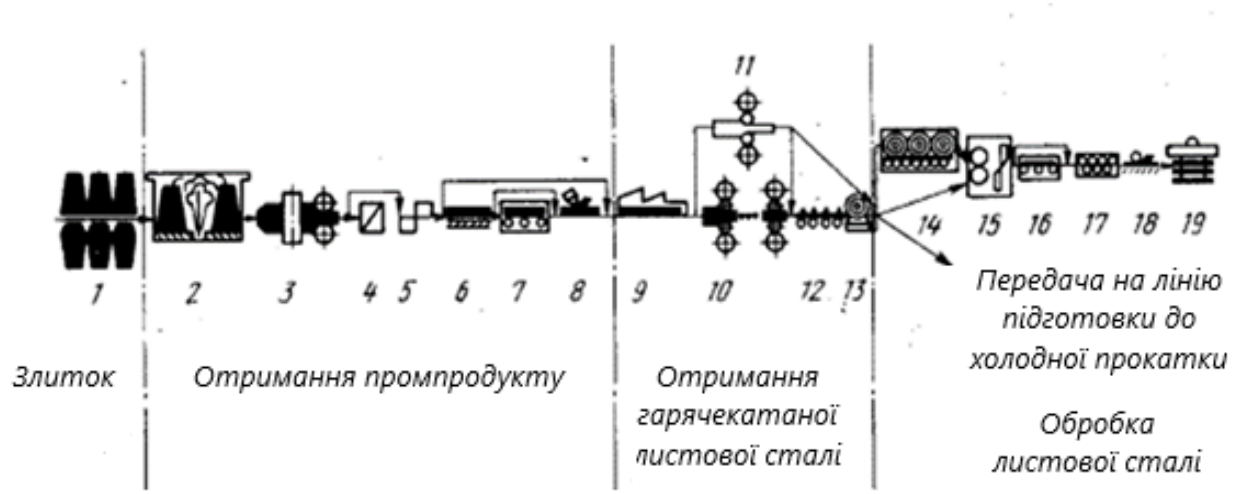
Рисунок 1.1 - Схема виробництва прокату з литої заготовки конструкційної сталі

2) злиток напівпродукт - готовий прокат, тобто. злиток піддають переділу на обтискних станах блюмінгах у поєднанні із заготовочними станами та слябінгах з метою отримання напівпродукту (блюмів, слябів, заготовок) з подальшою прокаткою їх на сортових або листових станах для виробництва готового прокату (рис. 1.2, 1.3);



1 - злиток; 2 - нагрівання злитків; 3 - прокатка на блюмінгу; 4 - зачистка дефектів на машині вогневої зачистки (термофрезерної машини); 5 - розкрій на ножицях; 6 - регульоване охолодження; 7 - термічна обробка; 8 – травлення; 9 - прокатка на заготовочному стані; 10 - розкрій розкочування на заготовки; 11 – охолодження на холодильнику; 12 - зачищення дефектів; 13 - нагрівання заготовок; 14 - прокатка на сортовому стані; 15 - розкрій прокату на задані довжини; 16 - охолодження (регульоване охолодження); 17 - термічна обробка; 18 - правка; 19 - обробка готового прокату; 20 - упаковка, маркування, зважування, відвантаження складу

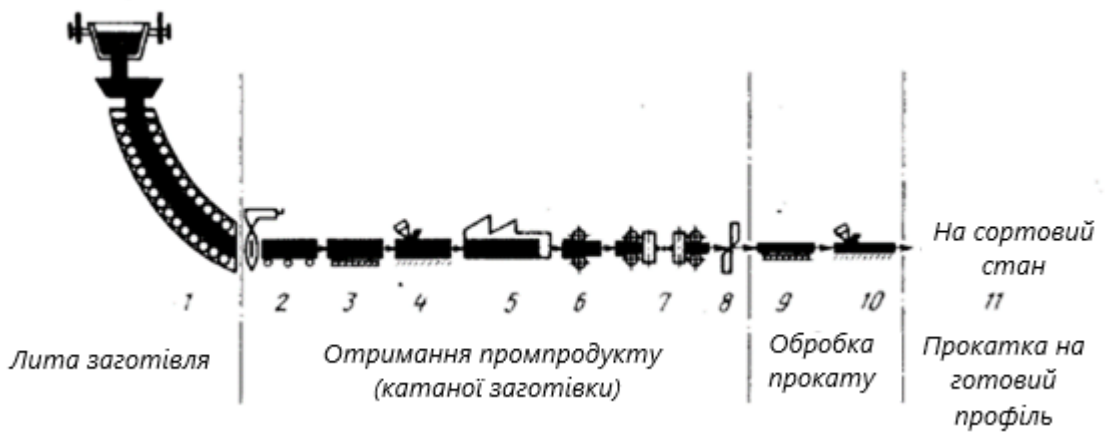
Рисунок 1.2 - Схема виробництва сортового прокату із злитків



1 - злиток; 2 - нагрівання злитків; 3 -. прокатка на слябінгу; 4 – зачистка дефектів на машині вогневої зачистки; 5 - розкрій гуркоту на сляби; б – охолодження слябів; 7 – термічна обробка; 8 – зачистка дефектів; 9 - нагрівання (підігрів) слябів; 10 - прокатка на широкосмуговому таборі; 11 - прокатка на те літо листовому стані; 12 - душування на відведеному рольгангу; 13 - смотка в рулони; 14 – термічна обробка рулонів; 15 - оздоблення на АПР або комбінованому агрегаті; 16 - термічна обробка листів; 17 - правка листів; 18 - зачищення дефектів; 19 - упаковка, маркування, зважування, відвантаження

Рисунок 1.3 - Схема виробництва листового прокату із злитків

3) лита заготовка легованої сталі - напівпродукт (катана заготовка) - готовий прокат, тобто. литі заготовки, отримані на МНЛЗ, спочатку піддають переділу на обтискно-заготівельних станах, що редукують, з подальшою прокаткою отриманої катаної заготовки на сортових чи листових станів на готовий прокат (рис. 1.4). У всіх схемах прокат піддається обробці.



1 - МНЛЗ; 2 - розкрій литої заготовки на задані довжини; 3 – охолодження литих заготовок; 4 – зачистка дефектів; 5 - нагрівання у методичній печі; в - прокатка на обтискному стані; 7 - прокатка на безперервному заготівельному стані; 8 - розкрій розкочування на заготовки; 9 - регульоване охолодження заготовок; 10 - обробка заготовок (термічна обробка, видалення окалини, зачистка дефектів та ін.); 11 - передача на сортові та листові стани для прокатки на готові профілі.

Рисунок 1.4 - Схема виробництва прокату з литої заготовки легованої сталі

Відмінністю цих схем є в основному початкова стадія технологічного процесу, пов'язана з отриманням заготовки для станів, що виробляють готовий прокат. Перша і третя схеми передбачають поєднання в різних варіантах МНЛЗ і станів готового прокату: на машинах безперервного лиття отримують литі заготовки відповідних розмірів, які є вихідним матеріалом або безпосередньо для сортових і листових прокатних станів (перша схема - рис. 11), або піддаються прокату. третя схема – рис. 1.4). Розливання на МНЛЗ легованих сталей виявило необхідність забезпечення великої загальної витяжки від литої заготовки до готового профілю, видалення поверхневих дефектів на заготівлі та отримання заданої структури гарячекатаної сталі, оскільки для цих сталей контрольованими параметрами якості прокату є

підвищені вимоги до стану поверхні та структурні характеристики (наприклад, сталь ШХ). У зв'язку з цим виникла потреба у третій схемі, пов'язаної із застосуванням обтискного та заготівельного станів між МНЛЗ та станом готової прокатки.

Друга схема (див. рис. 1.2, 1.3) - це традиційний процес виробництва сортового і листового прокату зі злитків, ще до недавнього часу була домінуючою при отриманні металу. у свою чергу має низку відмінних рис.

Схема виробництва прокату з литої заготовки конструкційної сталі (див. рис. 1.1) дозволяє об'єднати процес безперервного лиття заготовок та їх прокатку в єдиному ливарно-прокатному комплексі агрегатів, забезпечуючи поєднання потоковості сталеплавильного та прокатного виробництва, значно підвищуючи їхню ефективність. У практиці вітчизняних металургійних заводів і комбінатів (Донецькому, та ін.) литі слябові або сортові заготовки, одержувані на МНЛЗ, розрізають на задані довжини, охолоджують, зачищають дефекти, а потім направляють на нагрівання в методичних печах і прокатку на листових або сортових.

Стосовно третьої схеми (див. рис. 1.4) розроблений технологічний процес [9], згідно з яким, на МНЛЗ радіального типу передбачено отримання слябів максимального перерізу (до 300÷350×2000÷2200 мм), які будуть піддані розкрою газової різкою на задані довжини безпосередньо до методичних печей для нагрівання. Нагріті сляби підлягають прокатці в 5-11 проходів на спеціальному редукувальному (обтискному) стані, зачистці на МОЗ у потоці стану, а потім розрізанні на заготівлі та транспортуванні на широкосмуговий (або товстолистовий) стан або на склад заготовок.

На заводі "Криворіжсталь" знаходиться в експлуатації ливарно-прокатний комплекс, в якому отримана на МНЛЗ лита заготівля в єдиному безперервному технологічному потоці надходить на гарячу правку, зачистку дефектів, підігрів і подальшу прокатку спочатку в планетарної клітки. плавки.

Об'єднання процесів безперервного лиття заготовок з подальшою їх прокаткою в єдиному лінійно-прокатному комплексі агрегатів дозволяє на 10-

18 % скоротити витрату металу від заміни злитків литими заготовками, поліпшити загальні техніко-економічні показники виробництва прокату і є одним з найважливіших напрямків науково-технічного забезпечення.

Схема виробництва сортового прокату із злитків (див. рис. 1.2) охоплює прокатку напівпродукту (блюмів та заготовок) у комплексі з термічними та механічними операціями та подальшу прокатку готового сортового прокату з обробкою на ад'юстажі або потоковій лінії. Залежно від марки сталі та призначення прокату, складу наявного обладнання, обсягу та конкретних умов виробництва наведена загальна схема технологічного процесу прокатки напівпродукту та сортового прокату із злитків може мати ряд особливостей та різновидів. Так, зливки ряду легованих та високолегованих сталей після розливання та кристалізації направляють на регульоване охолодження, пом'якшуючий відпал та зачистку поверхневих дефектів у холодному стані. Після нагріву такі зливки далі направляють на прокатку на блюмінгу або на кування на ковальських молотах, пресах або радіально-кувальних машинах. Після розкрою, регульованого охолодження, а при необхідності пом'якшувального відпалу та видалення окалини блюми або ковані заготовки зачищають поверхневі дефекти. Отриманий напівпродукт далі надходить сортові сталі.

Нарешті, схема виробництва листового прокату із злитків (див. рис. 1.3) має низку додаткових операцій проти прокаткою сортового металу як у стадії отримання напівпродукту (слябів) і готових листових профілів, і особливо під час обробки прокату. На сучасних широкосмугових станах, як правило, застосовується регульоване охолодження смуг шляхом душування на відводить рольгангу, термічна обробка смуг у рулонах, призначених для глибокої витяжки після гарячої прокатки (так званий декапований метал), багатостадійне оздоблення на агрегатах поздовжньої і поперечної різки, зачищення дефектів і т.д.

У сучасній схемі виробництва прокату з литих заготовок та зливків використано низку новітніх досягнень науки і техніки, які значно підвищили

ефективність технологічного процесу та якості прокату. Так, застосовується регульоване охолодження прокату, термомеханічна обробка та термічне зміцнення з прокатного нагріву, особливо при виробництві дрібносортного прокату та катанки, що зменшує втрати металу в окалину та підвищує комплекс механічних властивостей; використовуються попередньо напружені кліті, блоки клітей, гаряче калібрування, що забезпечує підвищення точності прокату. Новим і дуже важливим елементом сучасної схеми технологічного процесу виробництва прокату є застосування потокових ліній обробки, що забезпечує комплексну механізацію обробки та потоковість виробництва на заключній стадії одержання готових профілів, підвищення якості прокату та покращення техніко-економічних показників виробництва [10-12].

У схемі виробництва листового прокату зі зливка збільшено питому вагу зачистки поверхневих дефектів злитків. Завдяки цьому після прокатки та зачистки розкочування на МОЗ в лінії обтискного стану з'явилася можливість передачі гарячих слябів або безпосередньо на прокатку (так звана прокатка транзитом) або на підігрів у методичних печах перед прокаткою на широкосмугових станах, минаючи їх охолодження і обробку на ад'юстажі. ет цикл прокатки. При виробництві товстих листів важливе значення має їх регульоване охолодження (у спеціальних роликових гартованих машинах), гартування і нормалізація, а також контрольована прокатка.

Сучасна схема обробки листів і смуг характеризується потоковістю виробництва завдяки застосуванню агрегатів поперечного, поздовжнього різання або комбінованих агрегатів, що поєднують обидві операції обробки, а також термічну обробку, видалення окалини, дресирування, таврування, маркування тощо. Це характерно і для подальшого переділу гарячекатаного підкату на холоднокатаний лист.

Таким чином, сучасний етап розвитку виробництва прокату характеризується тенденцією до посилення потоковості виробництва шляхом використання машин безперервного лиття заготовок, машин термофрезерної та вогневої зачистки в потоці обтискних станів, гарячого всаду слябів (без

оздоблення на ад'юстажі). прокату для зменшення втрат металу в окалину та підвищення рівня механічних властивостей, застосування потокових ліній обробки та контролю якості сортового та листового прокату тощо. Це забезпечує підвищення якості прокату, що випускається, зростання продуктивності та поліпшення умов праці.

Одним із найважливіших напрямів підвищення ефективності прокатного виробництва є комплексна механізація та автоматизація технологічного процесу на всіх його стадіях.

Оскільки найвищим ступенем ефективності виробництва є комплексна автоматизація, то перехід від неавтоматизованого до автоматизованого виробництва стосовно прокатних цехів пов'язаний з низкою послідовних етапів: 1) частковою механізацією окремих операцій, коли частина операцій виконується машинами, а інша частина - робітниками вручну; 2) комплексною механізацією всього технологічного процесу, у цьому випадку робітник тільки керує машинами; 3) частковою автоматизацією, яка характеризується автоматизацією роботи окремих електроприводів або операцією технологічного процесу, тут функції робітника з керування машинами виконують найпростіші пристрої, що управляють; 4) комплексної автоматизацією, коли всіма електроприводами і технологічним процесом загалом управляє комплекс управляючих пристроїв (ЕОМ), а функції робітника зводяться до налагодження машин і контролю над їх роботою [14-16].

1.3 Нагрів та охолодження металу

1.3.1 Основи режиму нагрівання

Нагрівання злитків і заготовок перед прокаткою має на меті поліпшення вихідної структури, зменшення опору деформації та підвищення технологічної пластичності металу. Прокатка добре нагрітого зливка або заготівлі забезпечує знижену витрату енергії, дозволяє застосовувати

підвищені обтискання за прохід, скорочує аварійні поломки обладнання стану, сприяє одержанню високої якості прокату.

Основні вимоги до якості нагріву металу зводяться до того, щоб нагрівання було здійснено до максимально допустимої температури без перегріву або перепалу, повинен бути забезпечений рівномірний прогрів з мінімально допустимим перепадом по перерізу та довжині зливка або заготовки. За даними Н.Ю. Тайця [17] перепад температури по перерізу злитка допустимо до 100 °С на 500 мм товщини від осі до поверхні. У роботі [6] для злитків масою 2-5 т перепад температури за перерізом рекомендується 1-3 °С на 1 см товщини злитка. Для легованих сталей залежно від хімічного складу перепад температури за перерізом зливка не повинен перевищувати 30-50 °С.

Режим нагрівання злитків чи заготовок перед прокаткою характеризується температурою нагрівання; швидкістю нагріву; числом щаблів (періодів, зон) нагріву; тривалість (часом) нагрівання.

Температура нагрівання та обробки металу залежить від ряду факторів, головним з яких є хімічний склад сталі. При гарячій прокатці підвищення температури нагрівання сталі до певних значень, як правило, сприятливо впливає на процес формозміни. Верхня межа, або допустима температура нагріву, лімітується перебігом збірної рекристалізації, явищами перегріву та перепалу та іншими факторами; для вуглецевих і низьколегованих сталей його зазвичай приймають на 100-150 °С нижче лінії солідуса за діаграмою стану залізо-вуглець. Для більшості легованих сталей верхню межу температури нагріву призначають досвідченим шляхом з урахуванням не тільки положення лінії солідуса, але й низки інших факторів, що впливають на якість нагріву та структуру металу, і насамперед враховують вплив легуючих елементів, наявність ліквацийних виділень, інтенсивне зростання зерна та зниження пластичності при високих температурах. Нижню межу температури нагрівання визначають, виходячи з допустимої температури кінця обробки тиском та її впливу на опір деформації та зусилля прокатки; враховується

також виділення та коагуляція фаз зміцнення (карбідів, інтерметалідів тощо), структура та механічні властивості металу.

Таким чином, для кожної групи марок сталі встановлюється свій оптимальний інтервал температур нагрівання та обробки. У цьому інтервалі дана сталь повинна мати найкраще поєднання технологічних параметрів, структури та властивості металу.

Швидкість-нагрівання. При її визначенні нагрівання розглядається як процес, що складається із зовнішнього та внутрішнього теплообмінів. При нагріванні зовнішній теплообмін характеризується кількістю тепла, що підводиться до металу нагрівальної печі в одиницю часу; він залежить від теплового режиму та теплового навантаження печі. Внутрішній теплообмін характеризується швидкістю розповсюдження тепла у металі зливка або заготовки; він визначається фізичними властивостями металу і насамперед його теплопровідністю.

Сучасні нагрівальні пристрої з автоматичним регулюванням кількості тепла, що підводиться в робочий простір печі в одиницю часу, дозволяють отримати широкий діапазон зміни теплового навантаження печі та забезпечують можливість мати найрізноманітніші технологічні режими нагріву.

При нагріванні легованих сталей лімітуючим фактором, від якого залежить швидкість нагрівання, є фізичні і механічні властивості металу, що нагрівається, і перш за все його теплопровідність і чутливість до термічних напруг, що виникають при нагріванні. Для того, щоб при нагріванні не виникали тріщини, необхідно, щоб внутрішні напруги не перевищували межу міцності металу при даній температурі.

Внутрішня напруга в металі, що нагрівається, знаходяться в прямій залежності від швидкості нагріву, тобто. швидкості зміни температури металу у часі. Зазвичай швидкість нагрівання визначають зміни температури поверхні металу. Швидкість нагрівання залежить від хімічного складу металу, розмірів та маси зливка, температури металу при посадці в піч, а також попередньої

обробки (видалення поверхневих) дефектів як місць концентраціїнапруг, термічної обробки для зняття залишкової напруги і т.д.).

За даними заводської практики при нагріванні холодних зливків до 600-800 ^{0}C допустимими швидкостями нагрівання низьковуглецевих та середньовуглецевих сталей 200-250 та 100-150 ^{0}C/год відповідно.

Швидкість нагріву легованої сталі до температури 500; 500-800 та понад 800 ^{0}C становить відповідно 40; 60 та 100 °C/год.

Є й інші рекомендації щодо швидкості нагрівання холодних злитків. Так, у роботі [18] швидкість нагріву вуглецевих і низьколегованих сталей до температури 700-900 °C рекомендується обмежувати 50-70 °C/год, високолегованих сталей і сплавів - до 30 °C/год, а в роботі [6] при нагріванні легованих сталей до температури 800 °C.

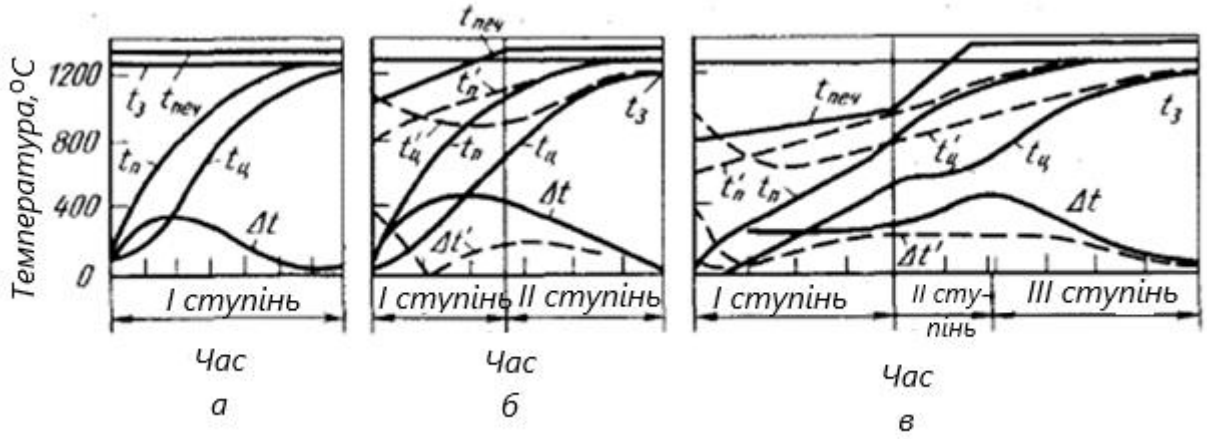
Однак через те, що на практиці важко контролювати зміну температури металу зливка в процесі нагрівання, рекомендують приймати наступну швидкість нагрівання холодних злитків сталі (береться відстань від поверхні до осі злитка): вуглецева (м'яка і тверда) 100-120, підшипникова 35-40, жароміцна 20-25, швидкорізальна 15-25 мм/год.

Досвідчені дані показують, що чим більша швидкість нагрівання, тим більший перепад температури між поверхневими і центральними шарами металу і тим значніші температурні напруги, що виникають. Отже, щоб не допустити виникнення великої температурної напруги в області низької теплопровідності сталі (до 600-800 ^{0}C), що збігається зі зниженою пластичністю металу при зазначених температурах, у початковий період нагрівання потрібно вести уповільнено.

Число ступенів нагрівання. При нагріванні злитків та заготовок перед обробкою тиском залежно від температури сталі при посадці застосовують різні графіки зміни температури металу в часі – одноступінчастий, двоступінчастий та триступінчастий. Ці графіки будуються в координатах температура - час.

Одноступінчастий режим нагріву (рис. 1.5 а) має тільки один період (ступінь) нагріву - прискорений або форсований, що здійснюється шляхом посадки холодного металу в камерну піч з високою температурою. Поверхня металу, нагріваючись, досягає заданої температури. Такий режим застосовують для нагрівання термічно-тонких тіл, для яких критерій Біо Bi < 0,25. Зважаючи на малу товщину заготовки перепад температури за перерізом $\Delta t = t_п - t_ц$ (де $t_п$, $t_ц$ - температура поверхні і центру заготівлі відповідно) і напруги, що виникають, незначні і безпечні. Нагрів у більшості випадків ведуть при постійній температурі печі, яка на 50-100 °С вище заданої температури нагріву. При цій температурі заготовку видають із печі.

Двоступінчастий режим нагріву (рис. 1.5 б) має період уповільненого нагріву (I ступінь), протягом якого центральні шари металу зазвичай досягають або близькі температурі 500 - 600 ° С, і період форсованого нагріву (II ступінь) для досягнення заданої температури металу. Цей режим застосовують для нагрівання термічно масивних тіл, для яких Bi <0,5 (нагрівання в методичні1 печі середні за розміром заготовок, а також при гарячому саді).



одноступінчастий (а), двоступінчастий (б) і триступінчастий (в) при холодному (суцільні лінії) та гарячому (штрихові лінії) всаді: tпеч, tз, tп, tц, Δt - температура печі, задана, поверхні та центру злитка (заготівлі), температурний перепад по перерізу відповідно

Рисунок 1.5 - Схема графіків нагріву злитків та заготовок

Триступінчастий режим має період повільного нагріву (рис. 1.6), (I ступінь або зона температурних напруг), поки температура центральної частини металу не досягає для вуглецевих сталей 500-550 °С і легованих 550 - 650 °С; період форсованого нагріву (II ступінь), поки температура поверхні металу не досягне або близька до заданої, та період витримки (III ступінь) для вирівнювання температури за перерізом та довжиною зливка. Такий режим застосовують для нагрівання термічно масивних тіл, для яких Bi>0,5 (нагрівання високовуглецевих сталей при холодному всаді, а також легованих сталей при холодному та гарячому всаді. Іноді холодні зливки високолегованих сталей перед нагріванням за триступеневим режимом піддають попередньому підігріву для зняття залишкової напруги і зменшення перепаду температури перерізу, а значить, і термічної напруги в період нагрівання на II ступені.

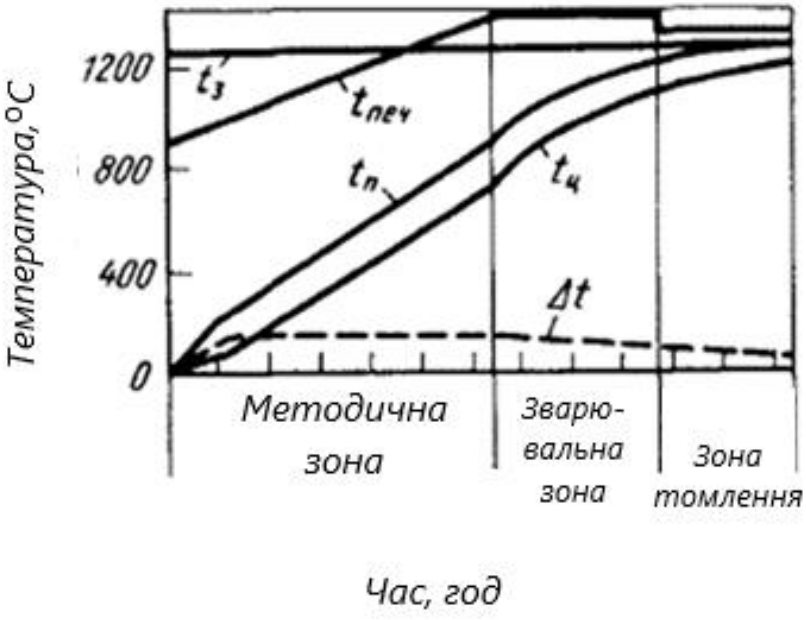


Рисунок 1.6 - Схема графіка нагріву злитків і заготовок у методичній тризонній печі (рух металу зліва направо, продуктів горіння - праворуч наліво, позначення див. рис. 1.5)

Триступінчастий режим нагріву застосовується також у методичних печах, в яких по довжині має місце зміна температури печі та металу, що

нагрівається в часі, але вона з часом близька до сталості в даній точці печі. У тризонних методичних печах при холодному саду нагрівають зливки високолегованих і високовуглецевих сталей, чутливих до термічних напруг. У цих печах нагрівають заготовки і сляби (для яких Bi > 0,5) перед прокаткою на сортових і листових станах.

Крім розглянутих режимів, застосовують двоступінчастий графік нагрівання заготовок перетином менше 100×100 мм у двозонних методичних печах, в яких є методична та зварювальна зони, а зона витримки відсутня; застосовують ще багатоступінчастий графік нагріву в багатозонних методичних печах, а також двостадійне нагрівання.

Тривалість нагрівання злитків, заготовок залежить від зовнішнього та внутрішнього теплообмінів, маси, розмірів зливка або заготовки, допустимим перепадом температури за перерізом і визначається за досвідченими даними, аналітичним методом або емпіричними формулами.

При дво- і триступінчастому режимі нагріву при досягненні поверхнею металу заданої температури перепад буває максимальним і його зниження з метою отримання достатньо однорідного температурного поля по перерізу і довжині злитка або заготівлі залежить від тривалості витримки при (3, що впливає на загальну тривалість нагріву металів. На основі дослідних даних Недоліком даного способу визначення тривалості нагріву є неможливість без відповідних коректив поширити ці номограми для визначення часу нагріву в печах та інших заводів.

Аналітичні методи визначення часу нагріву базуються на вирішенні диференціального рівняння теплопровідності, що зв'язує тимчасові та просторові зміни температури за різних крайових умов. У ряді випадків для попередніх або порівняльних розрахунків час нагрівання може бути визначено за емпіричними формулами, отриманими шляхом обробки практичних даних нагрівання металу. Зокрема, для визначення часу нагрівання злитків або заготовок при холодному всаді Ю.М. Чижиков рекомендує таку залежність:

$$\tau = k \cdot S$$

де k - коефіцієнт, що враховує вплив хімічного складу сталі та умов нагріву (визначається за табл. 1.2); S - сторона або діаметр злитка або заготовки, см; τ - час нагрівання, год.

Таблиця 1.2 - Значення коефіцієнта k

Сталь	*k*
Вуглецева	0,10-0,15
Легована конструкційна	0,15-0,20
Високолегована конструкційна	0,20 – 0,30
Високолегована інструментальна	0,30 – 0,40

Тривалість нагріву злитків у колодязях при гарячому всаді за Ю.М. Чижикову визначається за формулою

$$\tau = k \cdot S - 0{,}006\ (t\text{-}200)$$

де - температура металу при посадці, °С.

1.3.2 Охолодження прокату

При гарячій деформації та подальшому охолодженні прокату в металі виникають залишкові напруги деформації, термічні та структурні напруги. Всі три види залишкових напруг у процесі охолодження підсумовуються, при цьому якщо напруги різного знаку, то при підсумовуванні вони частково взаємно знищуються, а напруги однойменного знаку - складаються і за певних умов досягають значень межі міцності металу при даній температурі. При високій пластичності металу, що охолоджується, що характерно для низьковуглецевих і ряду низьколегованих сталей, що виникають сумарні напруги частково знімаються пластичною деформацією шляхом мікрозсувів.

Однак при температурах, нижче порога рекристалізації, має місце знижена пластичність металу, що характерно для більшості легованих і високовуглецевих сталей: у цьому випадку виникають розтягувальні напруги приводять до утворення тріщин напруги, особливо в місцях підвищеної інтенсивності охолодження (по кутах профілю, на ділянках розташування поверхневих дефектів). внутрішніх шарів металу та відповідно неодночасності структурних перетворень із перерізу прокату.

Величина залишкових напруг та ураженість прокату тріщинами зростає зі збільшенням швидкості охолодження, ступеня легування сталі, температури початку охолодження, перерізу охолодженого металу та наявності поверхневих та внутрішніх дефектів, що служать концентраторами напруг. У процесі охолодження найчастіше виникають поздовжні тріщини у місцях найшвидшого охолодження. При підвищеній швидкості охолодження ряду легованих марок стали перлітного, перліто-мартенситного та мартенситного класів, а також вуглецевих сталей із вмістом понад 0,30 % С у металі виникають внутрішні тріщини, які називаються флокенами.

З метою зниження внутрішньої напруги блюми, сляби, заготівлі та сортовий прокат з легованих і вуглецевих сталей із вмістом понад 0,30 % С піддають регульованому, перш за все уповільненому охолодженню, а якщо охолодження виробляють на повітрі, то після нього в ряді випадків застосовують відпал. Уповільненому охолодженню піддають також леговані сталі мартенситного, аустенітно-мартенситного та інших класів для попередження піджарювання поверхневого шару та зниження твердості перед зачищенням дефектів на металорізальних верстатах.

Для запобігання утворенню термічних тріщин, флокінів, зниження залишкових напруг і твердості напівпродукт і сортовий прокат тріщино- та флокеночутливих сталей піддають охолодженню такими способами: 1) на повітрі, у штабелях, захищених від протягів; 2) уповільнене охолодження в неопалюваних колодязях, печах та термостатах; 3) уповільнене охолодження в опалюваних печах та колодязях з ізотермічною витримкою; 4) поєднання

охолодження на повітрі з подальшою термічною обробкою; 5) прискорене охолодження шляхом обдування гарячого металу зволоженим повітрям або оббризкування водою.

Вибір способу та режиму охолодження залежить від марочного та профільного сортаменту, складу обладнання та регламентується заводськими технологічними інструкціями. В інструкціях з охолодження весь марочний та профільний сортамент прокату розбивають на групи та для кожної групи встановлюють спосіб охолодження, допустиму температуру при завантаженні та вивантаженні, тривалість охолодження та інші параметри цієї операції. У практиці металургійних заводів найбільш широко застосовують уповільнене охолодження на повітрі в штабелях і в колодязях, що не опалюються, або термостатах (рис. 1.7 та 1.8).

Для уповільненого охолодження застосовують неопалювані колодязі з кришкою. Стінки таких колодязів викладені шамотною цеглою та облицьовані металевими плитами. Кришки чавунні, суцільні, з внутрішньої сторони мають азбестову прокладку та обшиті листовим матеріалом. Ємність колодязів до 200 т. Колодязь перед завантаженням металу повинен бути теплим. Завантаження металу в колодязі для уповільненого охолодження виробляють поетапно при температурі не нижче 700 ^{0}C. Після завантаження криниця залежить від режиму охолодження залишається відкритим або закривається кришкою, що має піщаний затвор. При хорошому стані неопалюваних колодязів швидкість охолодження металу в початковий момент становить 10-20 С/год, а до кінця 3-4 °С/год, загальна тривалість охолодження садки масою 100-120 т досягає 4-х діб. При такому режимі охолодження флокени і тріщини в напівпродукті не зустрічаються.

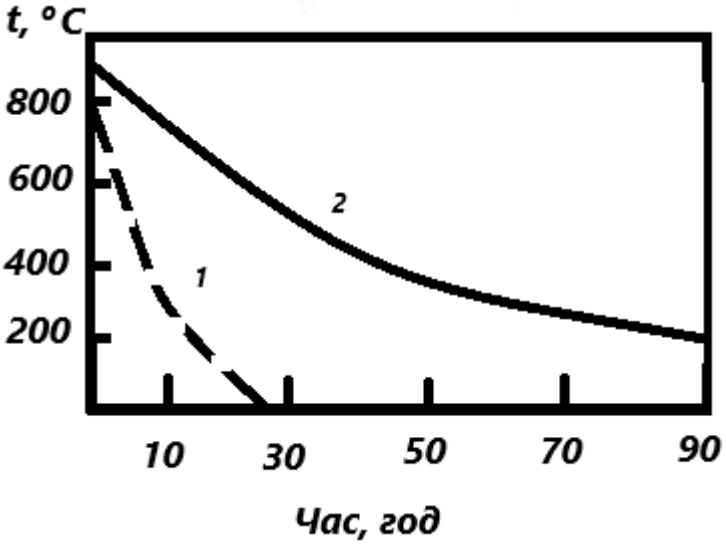


Рисунок 1.7 - Схема охолодження прокату на повітрі в штабелях (крива 1) та в неопалюваних колодязях, термостатах (крива 2)

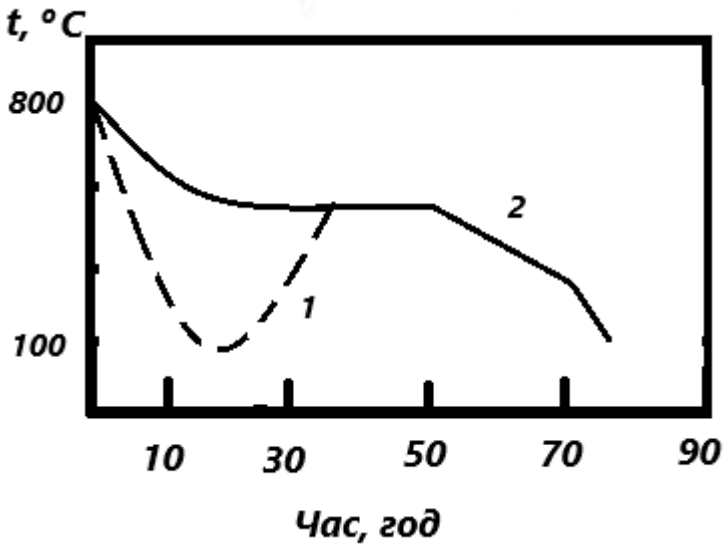


Рисунок 1.8 - Схема охолодження прокату на повітрі у поєднанні з ізотермічною витримкою в опалюваних печах, колодязях (крива і); охолодження в печах, що опалюються, колодязях з ізотермічною витримкою (крива 2).

Через 20 хв після закінчення завантаження контролер ВТК вимірює температуру металу (через вікно в кришці) термопарою або термощупом, а надалі такі вимірювання виробляють через кожні 4 години аж до вивантаження металу з колодязів. Термопари або термощупи зазвичай встановлюють у другому чи третьому ряду штанг.

Після закінчення щонайменше 50 % тривалості охолодження швидкість охолодження можна регулювати частковим підйомом кришки певну висоту. До кінця охолодження контролер ВТК вимірює температуру металу та дає дозвіл на його розвантаження. У тому випадку, коли температура металу вище передбаченої інструкцією, тривалість охолодження збільшують (найчастіше з відкритою кришкою, але не для флокеночувствительных сталей).

Для уповільненого охолодження слябів з тріщиночутливих сталей застосовують зазвичай термічні печі з висувним подом, у цьому випадку уповільнене охолодження найчастіше поєднують з пом'якшуючим відпалом.

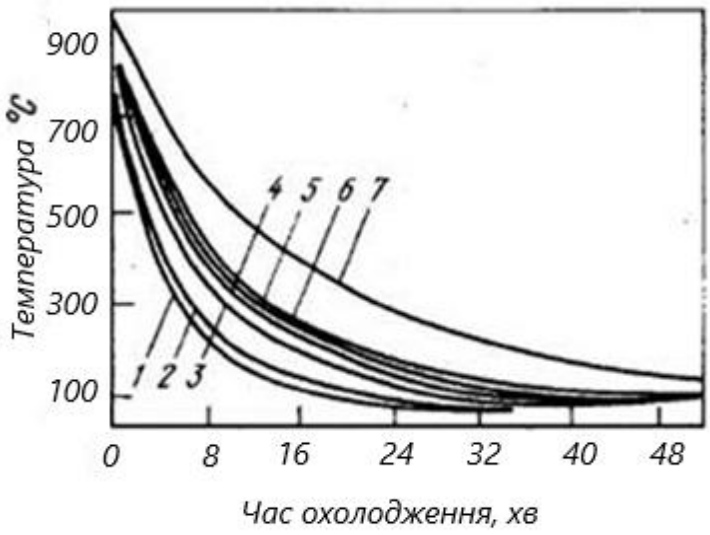
Уповільнене охолодження великих перерізів прокату (200×200 мм і більше) з сталей мартенситного класу (15Х5М, 12Х8ВФ, 40Х9С2, 40Х10С2М, 30Х13, 40Х13, 95Х18, 20х17Н2 та ін.) не позбавляє від виникнення флокенів із-за високої стійкості аустеніту. Для більш повного протікання $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення охолодження зазначеного класу сталей проводять у опалюваних колодязях (печах) із застосуванням ізотермічних витримок (рис. 1.8, крива 2).

Для складнолегованих флокеночутливих сталей з відносно високою стійкістю переохолодженого аустеніту застосовують поєднання швидкого охолодження на повітрі (до 100-300 ^{0}С для глибокого переохолодження аустеніту) з подальшою ізотермічною витримкою (рис. 1.8, крива 1). Іноді при охолодженні великих профілів із сталей з великою стійкістю переохолодженого аустеніту (типу 28ХЗСНМВФА, 25Х12Н2В2МФ та ін.) дають два переохолодження до температури 100-300 ^{0}С.

Охолодження в штабелях (рис. 1.7, крива 1) і на відкритому повітрі на холодильниках піддають прокат зі сталей, що не мають фазових перетворень, а також не схильних до утворення флокінів та тріщин. Як випливає з табл. 1.1 (група I), до цих сталей відносяться вуглецеві, деякі низьколеговані, а також стали аустенітного та феритного класів. Практично всі леговані інструментальні та багато легованих конструкційних сталі після уповільненого охолодження піддають відпалу.

При уповільненому охолодженні інструментальних вуглецевих і легованих марок сталі типу У9-У13, 12Х1, 9ХВГ, ХГС, ХВСГ та ін., а також сталі ШХ15, ШХ15СГ в їх макроструктурі виділяється у вигляді сітки структурно-вільний цементит, що знижує службу. Щоб не допустити виділення структурно-вільного цементиту у вигляді карбідної сітки, зазначені сталі після прокатки швидко охолоджують в інтервалі температур 950-700 °С шляхом обдування зволоженим повітрям, оббризкування водою. Цей режим охолодження застосовують для низки корозійно-стійких сталей. Після цього їх піддають уповільненому охолодженню. Охолодження листів і стрічок проводять у камерах з тонким футеруванням; у футерованих камерах з трубами, що охолоджуються повітрям; у камерах з водоохолоджуваними стінками; на повітрі (на рольгангах чи стелажах); струминним обдуванням повітрям або газом контрольованого складу; розпиленою водою та в баках з водою.

Найбільш простий спосіб охолодження листів та стрічок – це охолодження на повітрі. Тривалість охолодження листового металу повітря залежно від товщини можна визначати за графіком рис. 1.9 [20].



1 - 4; 2 - 5; 3 - 6; 4 - 7; 5 - 8; 6 - 10; 7 - 16

Рисунок 1.9 - Залежність тривалості охолодження повітря листового металу від товщини (з температури кінця прокатки 950 ^{0}С), мм

Враховуючи, що закінчення прокатки напівпродукту здійснюється за температури близько 1000 °С, подальше його охолодження на повітрі супроводжується значною втратою металу в окалину і потребує великих виробничих площ. Тому для напівпродукту з низьковуглецевих сталей, зокрема для слябів, застосовують прискорене охолодження на холодильниках.

Висновки до розділу 1

В розділі розглянуті сучасний стан та загальна характеристика прокатного виробництва проведений всебічний аналіз сортаменту прокату та його вихідних матеріалів. Наведені загальні схеми сучасного прокатного виробництва.

Розглянуті основи процесів нагріву та охолодження металу, технологічні основи режимів нагрівання та охолодження прокату.

На основі розглянутих питань складено основну мету магістерської дипломної роботи: провести дослідження та визначити методику для визначення впливу процесу прокатки та двостадійного охолодження на основні технологічні властивості сталі.

2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

2.1 Вимоги, що висуваються до структури та властивостей катанки з низьковуглецевої сталі

В залежності від сортаменту і призначення низьковуглецеву катанку зі сталі звичайної якості марок БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, що виготовляється згідно ДСТУ 7809:2015 та ТУ-14-15-212-89 переробляють безпосередньо на дріт готового розміру або на проміжну заготовку для відпалу та подальшого волочіння.

Катанка зі сталі БСт0 і БСт1кп для виробництва дроту діаметром 0,28 – 0,7 мм для тонких стінок по ДСТУ 8429:2015 і дроту загального призначення по ДСТУ 3282-74 в основному використовується з цією метою.

При відсутності дефектів сталеплавильного та прокатного виробництва критерієм оптимальної структури прискорено охолодженої катанки може служити можливість її стабільного волочіння без проміжної обробки на заготовку діаметром 1,0 – 1,1 мм з загальним сумарним обтисканням 96,6 – 97,6% [5].

В роботі [5] досліджували структуру сталі, яку отримали шляхом варіювання швидкості охолодження з прокатного нагріву низьковуглецевої катанки в умовах комбінату «Криворіжсталь» і при застосуванні калібрування ($t_{нагр.}$ = 930 ^{0}C, ізотермічний розпад – 490 ^{0}C). Отриманні результати дозволили сформувати наступні вимоги до структури катання зі сталі БСт0 і БСт1кп з підвищеною деформованістю:

- розмір феритного зерна не більше 8 з виділенням цементиту у вигляді перлітних ділянок (не допускається утворення структурно вільного цементиту у вигляді шнуров і глобулей по межам і об’єму феритних зерен, а також наявність в структурі відпущеного мартенситу);
- межа тимчасового опору $\sigma_в \leq 375$ Н/мм^2;
- показник деформаційного зміцнення $\gamma_в = \frac{\sigma_в - \sigma_т}{\sigma_т} \geq 0{,}45$;

Для катанки зі сталі БСт3кп діаметром 6,5 мм для арматурного дроту діаметром 4 – 5 мм по ДСТУ 6227-80 забезпечення необхідних характеристик стало можливим тільки завдяки прискореному охолодженню. Однак жорсткі вимоги за величиною відносно подовження вимагають регламентації мікроструктури $\sigma_в \geq 380$ Н/мм^2; рівноосні зерна фериту з виділенням цементиту у вигляді феритних ділянок та без низьковуглецевого магнезиту в поверхневих шарах.

В роботі [7] обговорюється тезис про те, що структура відпущеного магнезиту на поверхні дроту не впливає на стійкість процесу волочіння і тому на дротовому стані можна отримувати катанку, яка рівноцінна патентованій. Це твердження протирічить досвіду фахівців волочильного виробництва.

У зв’язку з цим був проведений експеримент з катанкою, охолодженою до температури утворення магнезиту у поверхневому шарі. При вибраних технологічних параметрах цей метал вдалося протягнути без обривів. На основі цього і був зроблений висновок про придатність структури відпущеного магнезиту для волочіння. На жаль, в статті немає відомостей ні о кількості проміжного металу, ні о продуктивності стану, ні о зносі інструменту, ні о якості дроту.

Необхідно відмітити, що можливість отримання деформованого металу зі структурою відпущеного магнезиту, в принципі, давно відомі [8]. Однак, для вдалого волочіння таких структур необхідно дотримання низки вимог [9]. Головною з них є висока однорідність структури по перетину дроту та довжини мотка.

Однозначно встановлено, що задовільну технологічність має тільки катанка з однорідною по перетину дроту і довжині бунту структурою дрібнодисперсного сорбітобразного перліту. Як що структура неоднорідна, то переробка значно ускладняється [9]. В літературі відмічається, що структура, яка має у краю шар відпущеного магнезиту не покращує технологічність. Переробка такої катанки приводить до обривів на волочильних станах.

Катанка приблизно 20% плавок не може бути перероблена за прийнятою технологією(на Одеському сталепрокатному заводі [9].

Таким чином, автор [9] стверджує, що недоліком прискореного охолодження є не тільки отримання структури відпущеного магнезиту, а і те, що така структура не рівномірна по перетину і довжині, що порушує стійкість процесу волочіння через знижену пластичність цієї структури у порівнянні з основним металом. Окрім того, метал з такою структурою гірше захоплює змазку, що приводить до підвищеного зносу інструменту. Ствердження проте, що «підложка» поверхні не погіршує її технологічності є не переконливим.

В роботі [10] вивчали різні засоби прискореного охолодження катанки з прокатного нагріву з метою зменшення окалиноутворення та забезпечення формування дрібнодисперсної структури перліту, що володіє гарною деформованістю при волочінні. Прагнення уникнути «підложки» привело до збільшення охолоджуючих сходинок і довжини хвостової частини дротових станів.

Лабораторними експериментами було встановлено, що циклічне охолодження катанки водоохолоджуючою сумішшю (0,5% води) сприяє прискоренню розпаду аустеніту, в результаті утворюється феритна сітка з дрібнодисперсного перліту, а при перерваному охолодженні катанки, можливо утворення широкої гамми структур: від ферит-перлітових до чітко виражених бейніт-мартенситових. З’ясовано, що двостадійне охолодження знижує глибину шару, що не містить вуглець до 0,8 – 1,5% глибини з 12 – 18 до 5 – 6 кг/т.

В роботі [11] вивчали вплив температури прискореного охолодження на структуру, властивості та деформованість низьковуглецевої катанки. В залежності від температури умовного охолодження (t_{yo}) сталь Ст3кп з 0,14% С мала наступні властивості (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Властивості сталі Ст3кп після прискореного охолодження

$t_{уо}$, °С	$\sigma_в$. мПа	$\delta_р$, %	δ, %	Ψ, %
720÷770	410	13,9	22,0	65,7
650÷670	505	9,7	14,5	68,4
550÷570	645	5,4	9,6	67,7
11	480	13,8	19,3	74,2

З таблиці 2.1 видно, що при прискореному охолодженні можливо отримати катанку за властивостями близьку до патентованої (П) – $t_{уо}$ = 650 – 670 ^{0}С. В цій катанці можна виділити декілька структурних зон: відпущений мартенсит і проміжні структури по перетину катанки.

Дослідження деформованості показали, що міцнісні властивості залишалися вищими у металу з $t_{уо}$ = 550 – 600 ^{0}С. Катанка підвищеної міцності володіє технологічною пластичністю в інтервалі обтискань до 80 % достатньою і необхідною для волочіння дроту на грубі розміри. Отримання дротів більш тонких розмірів вимагає зменшення приватних обтискань та швидкості волочіння.

За даними роботи [13] катанка з низьковуглецевої сталі (С ≤ 0,15) в гарячекатаному стані має переважно феритно-перлітну структуру (95/5 – 80/20%) з доволі крупним зерном (№ 6 – 7), що зумовлює низьку міцність та високу пластичність металу. Однак, через велику кількість окалини переробка катанки пов’язана зі значними витратами на метизних заводах. Обривність при волочінні катанки, що змотана в мотки при 720 – 770 ^{0}С, є практично такою ж, як і при переділі гарячої катанки. При більш низькій температурі змотки, через підвищення рівня властивостей міцності дріт при деформуванні сильніше нагрівається, на ньому зменшується кількість змазки по переходам, що приводить до більш швидкому зносу інструменту; великі витрати енергії на волочіння; збільшується кількість обривів [14, 15]

Катанку діаметром 6,5 мм прокочували зі швидкістю 37 м/с, прискорено охолоджували одноступеневому проти поточному пристрої з довжиною

камери охолодження 7 – 8 м і змотуванні в бунт при різних температурах і отримали такі результати (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 - Результати випробувань катанки прискорено охолодженої в умовах стану 250-1 СКМ при різних температурах змотки($t_{зм}$).*

Варіант	$t_{зм}$, °С	$\sigma_в$. МПа	δ_5, %	Ψ, %	q**, кт/т	Бал зерна	Співвід-ношення П і Ф	R_a***, мкм
А	870÷900	$\frac{310-395}{335}$	$\frac{40-50}{45,5}$	$\frac{71-78}{75,5}$	$\frac{5,8-37,2}{21}$	$\frac{7-8}{8}$	$\frac{15/85}{5/95}$	-
Б	740÷770	$\frac{330-460}{383}$	$\frac{37-47}{43,2}$	$\frac{70-80}{75}$	$\frac{3,7-19}{9,7}$	$\frac{8-9}{9}$	$\frac{15/85}{10/90}$	$\frac{1,4-1,75}{1,38}$
В	680÷710	$\frac{375-530}{430}$	$\frac{33-47}{39}$	$\frac{72-80}{76,3}$	$\frac{2,8-7,6}{4,7}$	$\frac{8-10}{10-12}$	$\frac{5/95}{2/98}$	$\frac{1,1-1,6}{1,36}$
Г	800	$\frac{375-455}{403}$	$\frac{30-50}{43,5}$	$\frac{73-81}{77,3}$	$\frac{3,8-4,6}{4,1}$	$\frac{8-10}{10-11}$	$\frac{10/90}{5/95}$	$\frac{1,05-1,35}{1,17}$

* – в чисельнику мінімальне і максимальне значення, знаменнику – середнє;

q** - кількість окалини;

R_a*** - шорсткість поверхні.

Зниження температури змотки привело до підвищення рівня властивостей міцності та відносного звуження (Ψ) та подовження (δ). Помітно скоротилася кількість окалини. Склад окалини для варіантів А, Б, В практично однаковий: *2 – 5% Fe_2O_3; 5-10% Fe_3O_4* і інше – 85 – 93% *FeO.*

Катанка усіх діаметрів протягується на діаметр 3мм на стані 2500/5 та 4/600 зі швидкістю 500 і 400 м/хв за маршрутом: 6,5 → 5,7 → 4,6 → 3,8 → 3,3 → 3,0 та 6,5 → 5,25 → 4,2 → 3,45 →3,0, а потім без відпалу зі швидкістю 600 м/хв за 6 – 7 переходів на діаметр 1,4 – 1,2 мм. Катанка усіх діаметрів прокочувалась до діаметру 3,0 мм для всіх варіантів без обривів. Далі з'явилися обриви: А – 2,1; Б – 2; В – 1,6. При двох стадійному охолоджені – Г – 4,4 обривів. Виявилося, що незважаючи на саму високу однорідність структури при варіанті Г була найбільша обривність. Був зроблений висновок про те, що обривність і мікроструктура низьковуглецевої катанки

визначаються не схемою охолодження, а температурно-часовим режимом проходження крапки A_1. Менша обривність катанки у варіанті В у порівнянні з Г пояснюється утворенням більш пластичного поверхневого шару.

В роботі [16] досліджували вплив різних варіантів термодеформаційної обробки низьковуглецевої сталі на усіх етапах технологічного процесу на формування структури та механічні властивості. Вивчали особливості тонкої структури, які забезпечать оптимальне поєднання властивостей міцності та пластичності.

Дослідження показали, що варіюючи $t_0 = 1100 – 500\ ^0C$ можна змінювати $\sigma_в$ = 400 – 660 Н/мм^2; термічне зміцнення при $t_{з0} = 500 – 560\ ^0C$ формує структуру відпущеного мартенситу на поверхні і є сумішшю бейніту і «виродженого» перліту зі сумішшю диспергованої фази в центральних шарах; подрібнення розміру зерна ведуть до збільшення $\sigma_в$ і $\sigma_Т$, при деякому зменшенні δ, в поверхневих шарах, в результаті час збільшення щільності дистанції у «виродженому» перліті, який займає 70% об’єму , визначаємо більшу величину пластичної деформації. Встановлено, що холодна пластична деформація при початковій різниці в щільності дистанцій тягне за собою різне формування дистанційної структури; на відміну від перліту гарячекатаного металу формування комірчастої дистанційної структури відстає і не завершується навіть при $\varepsilon = 60\%$. Встановлено, що найбільш різке змінення властивостей при волочінні йде на початковій стадії. Далі такі змінення властивостей зменшуються. Однією з причин зменшення показника деформаційного зміцнення є подрібнення елементів структури, більш рівномірне розподілення дистанцій при деформуванні. Зменшення показника деформаційного зміцнення визначає її меншу деформованість.

2.2 Методика проведення дослідження технології прискореного охолодження низьковуглецевої катанки на дротовому стані ПС-250-1 шляхом перерозподілу потоку води

В експерименті досліджувалися три марки сталі: БСт0, БСт1кп, БСт3кп.

На 3-й та 4-й нитках стану встановили додаткові форсунки перед XIX кліттю стану.

При цьому тиск води в основній та додатковій форсунках склав 40 атм. Розподіл води по форсункам склав 3:1. Вміст солі у воді – 1080 мг/л. Температура води, що подається ~ 27 - 32 ^{0}C. При прокатуванні гарячекатаного металу обидві форсунки перекривалися ($t_{зм}$ = 1050 – 1070 ^{0}C). При $t_{зм}$ = 850 – 900 ^{0}C була відкрита додаткова форсунка, а основна закрита повністю. При $t_{зм}$ = 750 – 800 ^{0}C – додаткова форсунка була відкрита повністю, а основна 1/2. При $t_{зм}$ = 700 – 750 ^{0}C обидві форсунки були відкриті повністю.

Маркірування, хімічний склад, температура змотки і положення відкриття форсунок наведене в табл. 2.3.

Проби відбиралися на крюковому транспортері. Бунти знімалися, маркірувалися бирками і від них відбиралися мотки по 10 – 12 витків з переднього, заднього кінців бунту і з середини. З цих же частин бунту відбиралися проби для досліджень на механічні властивості і окалину.

Кількість окалини визначалася за наступною методикою.

Методика основана на видалені окалини шляхом її розчинення в травильному розчині з захистом основного металу інгібіторами (соляна кислота з масовою долею 15%, інгібітор ТДА (толуплендіамін)). Соляна кислота наливалася у склянку (500 см^3) та підігрівалася до t ≤ 50 ^{0}C і додавався інгібітор ТДА 0,5 мл/дм^3. В підігрітий розчин поміщали 3 – 5 зразків (одночасно); *l = 90 – 100 мм*, попередньо зважених. При зважуванні до травлення враховувалася і окалина, що відокремилася при різанні.

Таблиця 2.3 – Параметри технології прискореного охолодження катанки діаметром 6,5 мм шляхом перерозподілу потоку води на дротовому стані ПС-250-1

Марка сталі	Номер плавки	Номер партії	Кількість, шт. в партії	Хімічний склад сталі %	Умовне позначення	Температура змотки, °С	Варіант охолодження	Положення відкриття (закриття) основної і додаткової форсунок
БСт0	243257	1367	156	*C - 0,10; Mn - 0.42 Si - 0,01; S - 0,039 P - 0,035*	IIСт0	1070	А	закрита повністю/ закрита повністю
					IIIСт0	865	Б	відкрита повністю/ закрита повністю
	252657	1367	135		IСт0	760	В	відкрита повністю/ ½ відкрита
					IVСт0	720	Г	відкрита повністю/ відкрита повністю
БСт1кп	243249	1369	244	*C - 0,10 Mn - 0,37 Si - 0,01 S - 0,043 P - 0,018*	IIСт1кп	1060	А	закрита повністю/ закрита повністю
					IIIСт1кп	775	В	відкрита повністю/ ½ відкрита
					IСт1кп	725	Г	відкрита повністю/ відкрита повністю
БСт3кп	252684	1383	281	*C - 0,14 Mn - 0,046 Si - 0,01 S - 0,004 P - 0,009 Cr - 0,004 Cu - 0,06 Ni - 0,07*	IIIСт3кп	1100	А	закрита повністю/ закрита повністю
					IVСт3кп	960	Д	¼ відкрита/ закрита повністю
					VСт3кп.	890	Б	відкрита повністю/ закрита повністю
					IСт3кп	760	В	відкрита повністю/ ½ відкрита
					IIСт.3кп	720	Г	відкрита повністю/ відкрита повністю

* в чисельнику – додаткова форсунка; в знаменнику – основна.

В процесі видалення окалини ведуть спостереження за травленням кожного зразка, якість поверхні зразка після зняття окалини визначають візуально.

Протравлений зразок вилучають з розчину, промивають, видаляють надлишки вологи фільтрувальним папером, висушують в потоці теплого повітря і зважують.

Результати обробляють наступним чином:

$$А = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_2} \cdot 100 \text{ кг/т};$$

$$А_р = к \cdot А;$$

$$\overline{А} = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_2} \cdot 1960 \cdot Д,$$

де А - середня маса окалини на контрольних зразках;

$А_р$ - розрахункова маса окалини;

$\overline{А}$ - середня кількість окалини;

m_1 - первісна маса зразків;

m_2 - маса зразків після травлення;

к - коефіцієнт нерівномірності розподілу окалини;

1960 – коефіцієнт, що визначає щільність сталі, кг/м^3;

Д - номінальний діаметр.

Після визначення кількості окалини мотки об'єдналися в групи «сумісності». Результати визначення кількості окалини наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Кількість окалини на катанці діаметром 6,5мм прискорено охолодженої методом перерозподілу потоку води на дротовому стані ПС-250-1

Марка сталі, ∅	Варіант охолодження	Температура змотки, ^{0}C	Кількість окалини, кг/т	Група спорідненості	Примітка
БСт0	А	1070	17.5	I	гарячекатана
	Б	865	15,2	II	
	В	760	5,5	III	
	Г	720	8,4	II	
БСт1кп	А	1060	19,1	I	гарячекатана
	В	775	9,8	II	
	Г	725	4,6	III	
БСт3кп	А	1100	23,6	I	гарячекатана
	Д	960	23,6	I	
	Б	890	23,8	I	
	В	760	8,1	II	
	Г	720	9,3	II	

Метал, що був відсортований за кількістю окалини на три групи (дивись табл. 2.4) піддавався обробці перед волочінням. Час травлення металу I групи склав 60 хв, другої та третьої - 50 хв. Травлення відбувалося у ванні з травильним розчином в умовах дротового цеху №1 ХСКПЗ з хімскладом: *H_2SO_4 – 158 г/л, $FeSO_4$ – 142 г/л,* температура ванни – 70 ^{0}C. Потім вапнування – 16 хв. і сушка – 8 хв. Далі кожен моток підвергаємо волочінню за маршрутом 6,5 → 5,72 → 5,04 → 4,43 → 3,90 → 3,41 → 2,99 на стані 2500/5 в умовах ХСПКЗ. Після кожного переходу відбираємо проби для механічних випробувань, визначення шорсткості поверхні, виготовлення мікрошліфів для вивчення структури дроту.

Результати механічних випробувань представлені у таблиці 2.5. Шорсткість поверхні визначаємо в центральній лабораторії. Для її визначення використовували прилад профілограф - профілометр модель 250. Швидкість руху щупа 6 мм/хв.; радіус кривизни вершини щупа 10 мкм; довжина траси роботи щупа – 1,5 мкм; кількість довжин (вимірювань) – 5; кількість замірів – 3; відсічка шагу (базова довжина) – 0,25 мм.

Результати механічних випробувань дроту наведені в таблиці 2.6, результатів випробувань на шорсткість поверхні - в таблиці 2.7.

Таблиця 2.5 - Механічні властивості катанки діаметром 6,5 мм, прискорено охолодженої методом перерозподілу потоку води на дротяному стані ПС-250-1, усереднена по бунту*

Марка сталі	Варіант охолод-ження	Темпера-тура змотки, ^{0}C	$б_в$, Н/мм^2	$б_{от}$, Н/мм^2	δ, %	Ψ, %
1	2	3	4	5	6	7
БСт0	А	1070	318-363/342	251-310/285	20-32/27	64-69/66,5
	Б	865	354-386/372,5	267-305/290	25-32/28,5	62-67/63,5
	В	760	372-391/381,5	283-314/294	28-32/29,5	62-68/65,5
	Г	720	343-434/380	273-362/309	20-28,5/26	58-66/63
БСт1кп	А	1060	342-368/366	237-272/251	24-32/29	65-69/67
	В	775	366-391/378.5	282-306/296	26-32/29	62-71/67
	Г	725	361-419/402,5	280-363/326	20-29/24,5	60-68/64
БСт3кп	А	1100	367-409/392,5	235-291/271	22-30/26	62-67/64,5
	Д	960	374-430/406	233-307/272	22,5-29,5/27	62-66/64
	Б	890	371-409/387	246-298/275	18-27,5/24,5	52-66/59
	В	760	362-402/379.5	253-302/276	20-25/22,5	62-62/62
	Г	720	380-436/405,5	274-362/322	18-26,5/22	62-69/65,5

Таблиця 2.6 - Механічні властивості дроту, що проволочений з катанки діаметром 6,5 мм прискорено охолоджений методом перерозподілу потоку води на дротяному стані ПС-250-1, усереднення по бунту*

Марка сталі	Варіант охолод-ження	Температу-ра змотки, ^{0}C	Діаметр дроту, мм	$б_в$, Н/мм^2	Кількість перегинів дроту, $n_{пер.}$	δ, %	Ψ, %
1	2	3	4	5	6	7	8
БСт0	А	1070	5,12	459-514/492	12-14/13	5,5-7,0/6	55-58/56,5
			5,04	532-576/554	14-16/15	3,5-4/3,75	51-54/52,5
			4,43	568-623/599	16-17/16,5	3-3.5/3,25	44-47/45,5
			3,90	607-627/615	9-11/10	2,5-2,5/2,5	40-40/40
			3,41	670-701/682	12-13/12,5	2-2.5/2,25	27-32/29
			2,99	704-732/722,5	7-9/8	1,5-1,5/1,5	34-36/35
	Б	865	5,12	498-555/527	15-16/15,5	4,5-6,5/5.5	52-56/54
			5,04	572-611/596	15-16/15,5	3,5-4/3,75	45-45/45
			4,43	621-667/646	16-18/17	3-3,5/3,25	38-40/39
			3,90	657-746/693	10-11/10,5	2-2.5/2,25	37-40/38,5
			3,41	703-749/723	11-12/11,5	1,5-2/1,75	27-35/32
			2,99	763-806/1-784	8-9/8,5	1,5-1,5/1,5	30-35/32,5
	В	760	5,12	538-579/564	13-14/13,5	4,5-5,5/5	55-52/54
			5,04	609-642/632	15-16/15,5	3-4/3,5	45-51/48
			4,43	673-702/683	16-17/16,5	2,5-3/2,75	40-41/40,5
			3,90	683-720/693	9-12/10,5	2-2,5/2,25	40-45/42,5
			3,41	723-789/758	11-13/12	1,5-1,5/1,5	45-45/45
			2,99	786-823/809	7-9/8	1,5-1,5/1,5	29-35/32
	Г	720	5,12	542-654/587	9-17/13	3,5-5/4,25	32-56/44
			5,04	571-684/635	14-19/16,5	3,5-4/3,75	42-47/44,5
			4,43	665-719/696	16-20/18	2-2,5/2,25	34-47/40,5
			3,90	729-756/741	10-12/11	2-2,5/2,25	37-44/40,5
			3,41	778-817/791	12-13/12,5	2-2,5/2,25	30-46/38
			2,99	809-866/843	7-9/8	1,5-1,5/1,5	35-40/37,5
БСт1кп	А	1060	5,12	478-549/509	14-16/15	5-6/5,5	48-58/53
			5,04	554-609/586	14-17/15,5	42-52/44,5	3-4/3,5
			4,43	590-649/4-622	16-18/17	3,6-4/3,8	35-41/38
			3,90	634-685/660	10-11/10,5	2-3/2,5	26-40/33
			3,41	683-742/712	11-12/11,5	2-2,5/2,25	22-32/27
			2,99	698-780/750	7-9/8	1,5-2/1,75	19-35/27
	В	775	5,12	526-560/552	13-15/14	4-5,5/4,75	56-62/58,5
			5,04	575-639/611	13-17/15	3-4/3,5	40-54/47
			4,43	649-696/658	16-18/17	2,5-3,5/3	34-47/40,5
			3,90	685-780/710	10-12/11	2-2,5/2,25	36-40/38
			3,41	723-772/751	8-12/10	2-2,5/2,25	28-45/36,5
			2,99	783-820/789	8-9/8,5	1,5-2/1,75	30-40/35
	Г	725	5,12	553-605/570	13-15/14	4,5-5,5/4,5	50-56/53
			5,04	613-648/635	16-19/17,5	3-3,5/3,25	39-52/45,5
			4,43	655-704/689	17-20/18,5	2,5-3,5/3	37-41/39
			3,90	710-737/723	11-12/11,5	2,5-3,5/3	37-41/39
			3,41	791-832/809	11-13/12	2,5-2,5/2,5	20-40/30
			2,99	832-878/857	7-9/8	1,5-1,5/1,5	30-30/30
БСт3кп	А	1100	5,12	577-599/572	11-12/11,5	3,5-4,5/4	50-52/51
			5,04	567-688/634	12-14/13	3,5-4/3,75	38-47/42,5
			4,43	636-714/687	12-15/13,5	2,5-4/3,25	30-44/37

							Продовж. табл. 2.6
			3,90	668-783/728	8-16/12	2,5-3/2,75	34-40/37
			3,41	683-842/776	8-11/9,5	1,5-2/1,75	22-36/29
			2,99	772-894/841	5-8/6,5	1,5-2/1,75	25-30/27,5
	Д	960	5,12	561-599/582	12-14/13	3-5/4	37-52/44,5
			5,04	615-671/650	12-14/13	3-4,5/3,75	36-45/40,5
			4,43	667-740/702	14-15/14,5	2,5-3/2,75	29-37/33
			3,90	701-763/736	8-9/8,5	2-3/2,5	35-40/37,5
			3,41	760-853/803	7-10/8,5	1,5-2/1,75	22-29/25,5
			2,99	800-889/847	6-7/6,5	1,5-2/1,75	24-30/27
	Б	890	5,12	552-615/582	10-12,5/11	4-4,5/4,25	36-50/43
			5,04	623-677/649	11-13/24	3,5-4/3,75	36-45/40,5
			4,43	675-727/704	13-14/13,5	2,5-3,5/3	33-37/35
			3,90	712-777/739	7-9/8	2-3,5/2,75	32-40/36
			3,41	767-829/791	7-11/9	1,5-1,5/1,5	22-28/25
			2,99	817-863/846	6-7/6,5	1,5-1,5/1,5	30-30/30
	В	760	5,12	620-663/638	12-12/12	4-5/4,5	49-52/50,5
			5,04	629-720/650	13-14/13,5	3-4/3,5	42-50/46
			4,43	699-740/720	14-15/14,5	3-3/3	33-37/35
			3,90	720-773/755	9-10/9,5	2,5-3/2,75	31-37/34
			3,41	810-828/819	11-12/11,5	1,5-1,5/1,5	22-32/27
			2,99	820-863/853	6-8/7	1,5-1,5/1,5	24-29/27
	Г	720	5,12	561-623/597	11-12/11,5	4-4,5/4,25	50-52/51
			5,04	661-686/668	11-14/12,5	3-3,5/3,3	43-52/47,5
			4,43	647-751/714	14-15/14,5	3-3,6/3,3	33-45/39
			3,90	713-800/749	9-9/9	2-2,5/2,25	24-29/26,5
			3,41	773-849/815	10-11/10,5	1,5-2,5/2	23-32/28
			2,99	692-889/848	6-8/7	1,5-1,5/1,5	24-29/27

* мінімальне та максимальне значення в чисельнику, середнє – в знаменнику

Таблиця 2.7 – Значення шорсткість поверхні (R_a , *мкм)* та відповідний їй клас обробки поверхні катанки прискорено охолодженої методом перерозподілу потоку води і дроту, отриманого з неї, усереднення по бунту*

Марка сталі	Варіант охолодження	Температура зливку, ^{0}C	Діаметр катанки та дроту, мм													
			6,5		*5,72*		*5,04*		*4,43*		*3,90*		*3,41*		*2,99*	
			R_a , *мкм*	∇	R_a , *мкм*	∇	R_a , *мкм*	∇	R_a , *мкм*	∇	R_a , *мкм*	∇	R_a , *мкм*	∇	R_a , *мкм*	∇
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
БСт.0М	А	1070	0,78/1,53	7/6	0,41/0,66	8/7	0,14/0,83	10/7	0,28/0,81	9/7	0,34/0,78	8/7	0,24/0,38	9/8	0,22/0,42	9/8
	Б	865	0,41/1,91	8/6	0,22/0,86	9/7	0,15/0,4	10/8	0,14/0,35	10/8	0,06/0,44	11/8	0,28/0,35	9/7	0,1/0,84	10/7
	В	760	0,12/1,88	10/6	0,33/1,32	10/7	0,12/0,89	10/7	0,21/0,89	9/7	0,09/0,4	10/8	0,39/0,86	8/7	0,21/0,45	9/8
	Г	720	1,08/1,54	7/6	0,48/0,93	8/7	0,19/0,53	9/8	0,15/0,52	10/8	0,17/0,36	9/8	0,09/0,42	10/8	0,21/0,65	9/7
БСт.1кп	А	1060	0,51/1,24	8/7	0,4/1,02	8/7	0,19/099	9/7	0,2/0,63	9/8	0,2/1,08	9/7	0,17/0,68	9/7	0,15/0,36	10/8
	В	775	0,4/1,66	8/6	0,24/0,65	9/7	0,23/0,43	9/8	0,13/0,84	10/7	0,29/1,03	9/7	0,16/0,56	10/8	0.08/0,38	11/8
	Г	725	0,67/1,54	7/6	0,15/0,72	10/7	0,23/0,5	9/8	0,14/0,8	10/7	0,03/0,64	12/7	0,03/1,32	12/6	0,15/0,5	10/8
БСт.3кп	А	1100	0,71/1,54	7/6	0,12/0,68	10/7	0,15/0,53	10/8	0,23/0,74	9/7	0,12/0,9	10/7	0,15/0,76	10/7	0,11/1,23	10/7
	Д	960	0,31/1,45	9/6	0,22/0,91	9/7	0,25/0,44	9/8	0,34/1,25	8/7	0,18/0,63	9/8	0,21/0,89	9/7	0,04/1,01	12/7
	Б	890	0,67/1,63	7/6	0,22/1,24	9/7	0,16/0,92	10/7	0,15/0,68	10/7	0,1/0,55	10/8	0,17/0,68	9/7	0,19/0,56	9/8
	В	760	0,02/0,1	13/10	0,15/0,99	10/7	0,13/0,37	10/8	0,01/0,37	14/8	0,01/0,24	14/9	0,01/0,58	14/8	0,01/0,67	14/7
	Г	720	0,15/1,23	10/7	0,29/0,77	9/7	0,19/0,23	9/8	0,1/0,82	10/7	0,32/0,81	9/7	0,03/0,36	12/8	0,04/0,59	12/8

* в чисельнику мінімальне значення R_a та відповідний йому клас обробки поверхні [18], в знаменнику – максимальне значення R_a.

2.3 Вплив технології прискореного охолодження методом перерозподілу потоку води на технологічність процесів прокатки та волочіння

2.3.1. Шорсткість поверхні катанки і готового дроту

Шорсткість поверхні катанки при інших рівних умовах свідчить про рівномірність розподілу окалини, визначає режим травлення і в першу чергу – час травлення і витрати травильного розчину.

Режим травлення в свою чергу також визначає шорсткість поверхні катанки, яка безпосередньо надходить на переробку на волочильний стан. Шорсткість поверхні цієї катанки визначає: захват змазки, швидкість зношування волок, витрати енергії на деформування при волочінні.

Встановлено, що зі зниженням температури змотки якість поверхні катанки покращується за рахунок зменшення окалиноутворення і його нерівномірності; наступне холодне волочіння може збільшувати розкид значень шорсткості (табл. 2.7).

Розкид значень шорсткості може збільшуватися за рахунок факторів процесу волочіння, які постійно змінюються: склад і температура травильного розчину, тривалості травлення, швидкості зношування валків і т. д.

2.3.2 Робота валкової арматури стану

Динамічна та ритмічна робота дротового стану можлива тільки при збереженні розкатом положення, яке задане калібровою.

Розкати, що прокачуються в чистових клітях дротяних станів мають невеликий поперечний перетин. При температурах прокатки такі розкати відрізняються дуже малою жорсткістю в подовжньому напрямку (подовжньою жорсткістю) [26].

Особливо малу подовжню жорсткість мають розкати овального перетину в предчистових клітях.

Незначний опір руху приводить до застрягання розкату, особливо при високих швидкостях прокатки [26].

Зниження температури предчистового овалу позитивним чином вплине на роботу валкової арматури та її стійкість, тому що при застосуванні додаткової форсунки зменшується температура розкату, відповідно і знос арматури через перегрівання арматури.

2.3.3 Склад та кількість окалини

Склад та кількість окалини на катанці залежить в першу чергу від температури кінця прокатки та швидкості охолодження.

Окалина, яка утворилася на повітрі складається з трьох шарів: внутрішнього – вюститу *(FeO)*, середнього – магнетиту *(Fe_3O_4)*, зовнішнього – гематиту *(Fe_2O_3)*.

Досліди показують, що товщина усіх шарів окалини зростає в постійній пропорції:

$$FeO : Fe_3O_4 : Fe_2O_3 = 100 : 5 : 1$$

Прискорене охолодження взагалі сприятливо впливає на структуру окалини. При прискореному охолодженні збільшується частка вюститу, що полегшує видалення окалини з поверхні катанки при подальшій обробці [25].

Кількість окалини можна визначити за виразом:

$$W_н^2 + \frac{R_0}{m} \cdot \left[\Phi \cdot \left(T'/T_c; B/T_c\right) - \Phi \cdot (T''/T_c; B/T_c)\right]^{-2} \qquad (2.1)$$

де R_0 – константа швидкості окислення, кг^2/м^4·с;

m – швидкість охолодження, с$^{-1}$;

T′ і T″ - температура тіла в момент часу τ' і τ'', К^0;

T_c – температура навколишнього середовища, К^0;

$B=Q/R$ – постійна, яку називають енергією активації (енергією розпушування оксиду), кДж/моль;\

R – 8,303 кДж/(моль· К) – універсальна газова постійна.

Величина Q залежить переважно від складу сталі. Для маловуглецевої сталі можна прийняти $B=Q/R=18 \cdot 10^3\ K$.

Величина R_0 не залежить від температури і визначається окислювальними властивостями газів і складом металу.

Значення m можна визначити з виразу:

$$m = \frac{\ln(T' - T_c) - \ln(T'' - T_c)}{\tau'' - \tau'} \qquad (2.2)$$

Значення $\Phi\left(T'/T_c; B/T_c\right)$ та $\Phi\left(T''/T_c; B/T_c\right)$ з урахуванням, що $B=Q/R=18 \cdot 10^3\ K = const$ можна визначити за рис. 2.1.

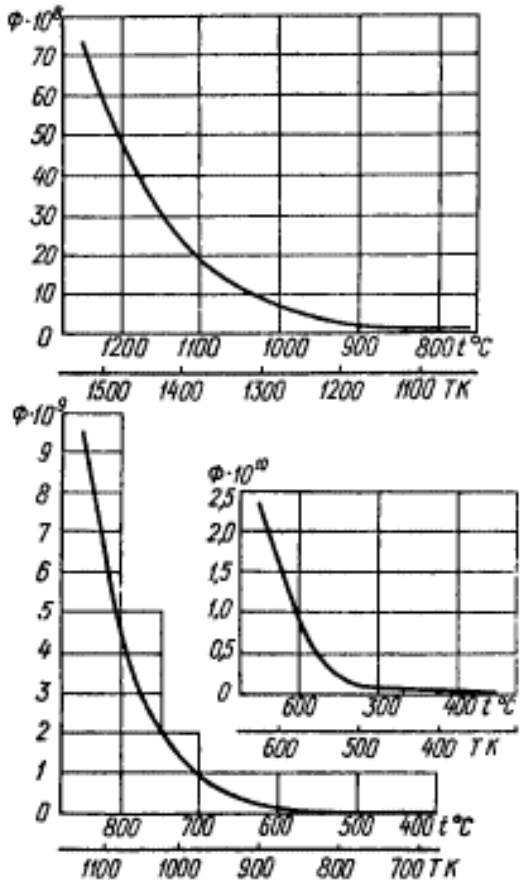


Рисунок 2.1 - Графік функції Ф для розрахунку окаліноутворення при охолоджені прокату

Таким чином, аналізуючи формули (2.1) і (2.2) можна зробити висновок, що для умов, де прокатка ведеться з однаковою швидкістю та охолодження відбувається в одній і тій же установці прискореного охолодження при однаковому тиску води в першу чергу кількість окалини буде визначатися температурами змотки і кінця прокатки *($t_{к\ пр.}$)*.

Позначимо:= $\frac{R_0 \cdot [\Phi(T') - \Phi(T'')]}{\ln(T' - T_c) - \ln(T'' - T_c)} = f_0$ – коефіцієнт окалиноутворення.

Приймемо: $W_н = 0$; тоді $W_k^2 = f_0 \cdot (\tau'' - \tau') = f_0 \cdot \Delta\tau$

Враховуючи, що $\cdot \Delta\tau$, залежить від характеристики пристрою прискореного охолодження та швидкості прокатки, є для нашого випадку постійною величиною, тоді отримуємо співвідношення:

$$\frac{(W_k')^2}{(W_k'')^2} = f_0'/f_0''$$

де: W_k', W_k'', f_0', f_0'' - відповідно значення W_k *і* f_0 згідно з діючою і методом перерозподілу потоку води технологіям прискореного охолодження.

Остаточно:

$$W_k'' = \sqrt{(W_k')^2 \cdot \frac{f_0''}{f_0'}} \qquad (2.3)$$

Визначаємо по формулі (2.3) кількість окалини на катанці, прискорено охолоджений методом перерозподілу потоку води для варіантів *В і Г* – сталі БСт3кп.

Значення W_k' приймаю орієнтовно по рис. 2.2.

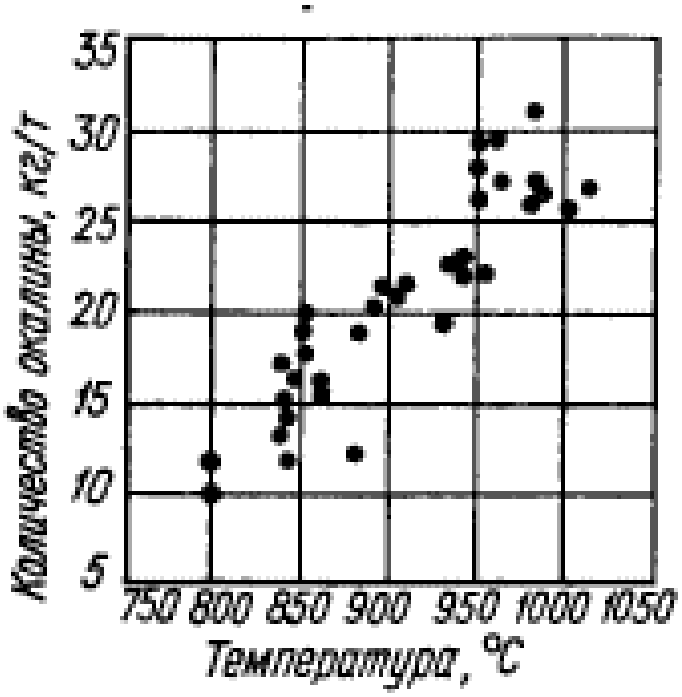


Рисунок 2.2 – Результати визначення кількості окалини на катанке в умовах підприємства

Результати розрахунку кількості окалини заношую в таблицю 2.8.

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку кількості окалини, що утворюється на катанці, прискорено охолодженій методом перерозподілу потоку води на дротяному стані ПС-250-1

Марка сталі	Варіант охолодження	Температура змотки, ^{0}C	Температура навколишнього середовища	R_0, кг^2/м^4·с	Технологія прискореного охолодження									
					існуюча					з перерозподілом потоку води				
					$t_{к\ пр.}$	$\Phi(T') \cdot 10^{-2}$	$\Phi(T'') \cdot 10^{-2}$	$f_0 \cdot 10^2$	$W_к$, кг/т	$t_{к\ пр.}$	$\Phi(T') \cdot 10^{-2}$	$\Phi(T'') \cdot 10^{-2}$	$f_0 \cdot 10^2$	$W_к$, кг/т
БСт3кп	В	760	30	467	1060	13,0	0,2	17376	13	980	7,0	0,2	12074	10,25
	Г	720			1060	13,0	0,12	15037	11	980	7,0	0,12	10072	9,00

2.3.4 Кількість «забурювань» чистові кліті стану

Досвід роботи стану з додатковою форсункою показав, що при недостатньо точному налаштуванні стану кількість «забурювань» в чистовій кліті дещо збільшується.

Це пов’язано з тим, що охолодженню піддається нерівноосний перетин – овал, елементи якого нерівномірно віддалені від його геометричного центру і найбільше віддалені елементи охолоджуються більшою мірою.

Через малі міждеформаційні паузи захват розкату, що нерівномірно охолоджується утруднений, тому при калібровці валків слід застосовувати певне співвідношення $B_{ср}/l_{д} = 0,65:0,85$, яке дозволяє стабілізувати розширення.

Внаслідок температурної напруги, що виникає в підстуженій овальній колії відбувається деяке зменшення її стійкості при прокатці в круглому калібрі.

В зв’язку з цим необхідно змінити форму предтестового калібру з метою придання полосі більшої стійкості.

2.3.5 Механічні властивості катанки та готової прокатки

Механічні властивості неможна характеризувати одним показником. Для характеристики механічних властивостей необхідно знати декілька показників, які характеризують міцнісні та пластичні властивості.

Необхідно знати і характер зміни механічних властивостей в залежності від різних параметрів.

Механічні властивості катанки зумовлюють маршрут волочіння, можливість отримання дроту з необхідною межею міцності $\sigma_{в}$, ведення процесу без проміжного відпаду, отримання мінімально можливого перетину дроту, енергосилові параметри і т. д.

Визначаємо сумарний відпал:

$$E_{\Sigma} = \frac{d_0^2 - d_i^2}{d_0^2} \cdot 100\%$$

де: d_0 *і* d_i – діаметри катанки і дроту після і-го переходу.

За даними таблиць 2.5 та 2.6 складаємо таблицю значень $\sigma_в$, усереднених по бунту та зведемо їх в 2.9. За наведеними даними будуємо графіки залежності $\sigma_в = f(E_{\Sigma})$ (рис. 2.3-2.5).

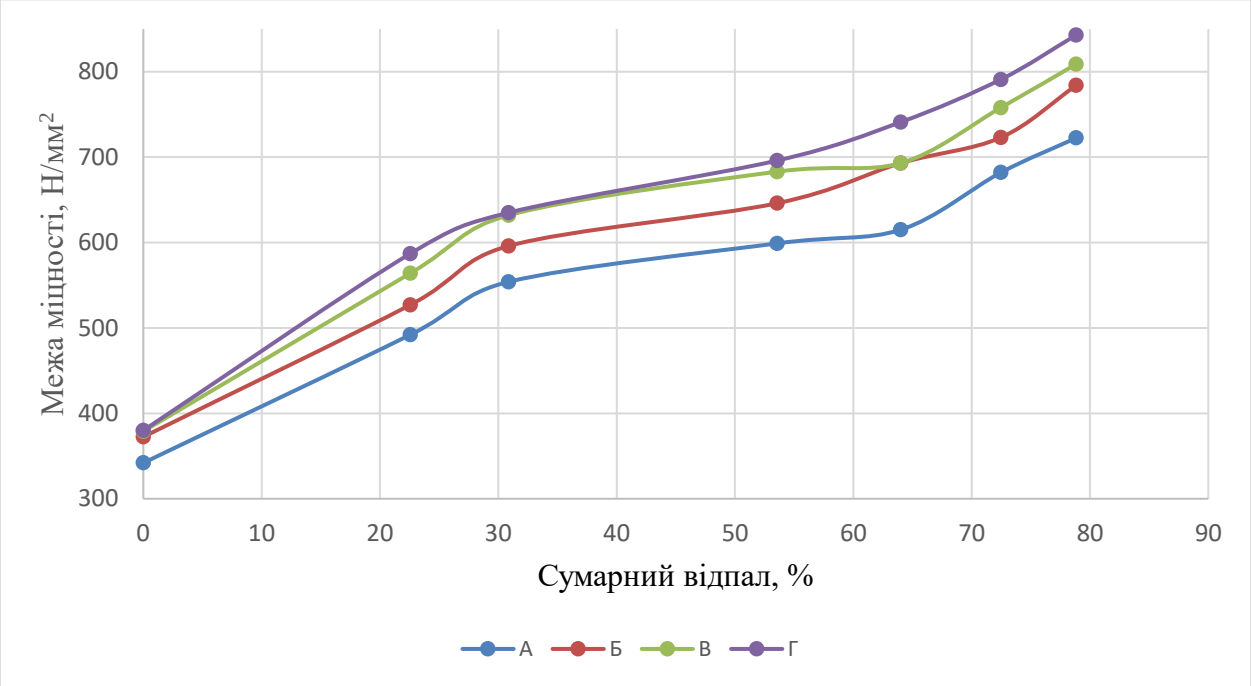


Рисунок 2.3 – Графік залежності межі міцності від сумарного відпалу для сталі БСт0

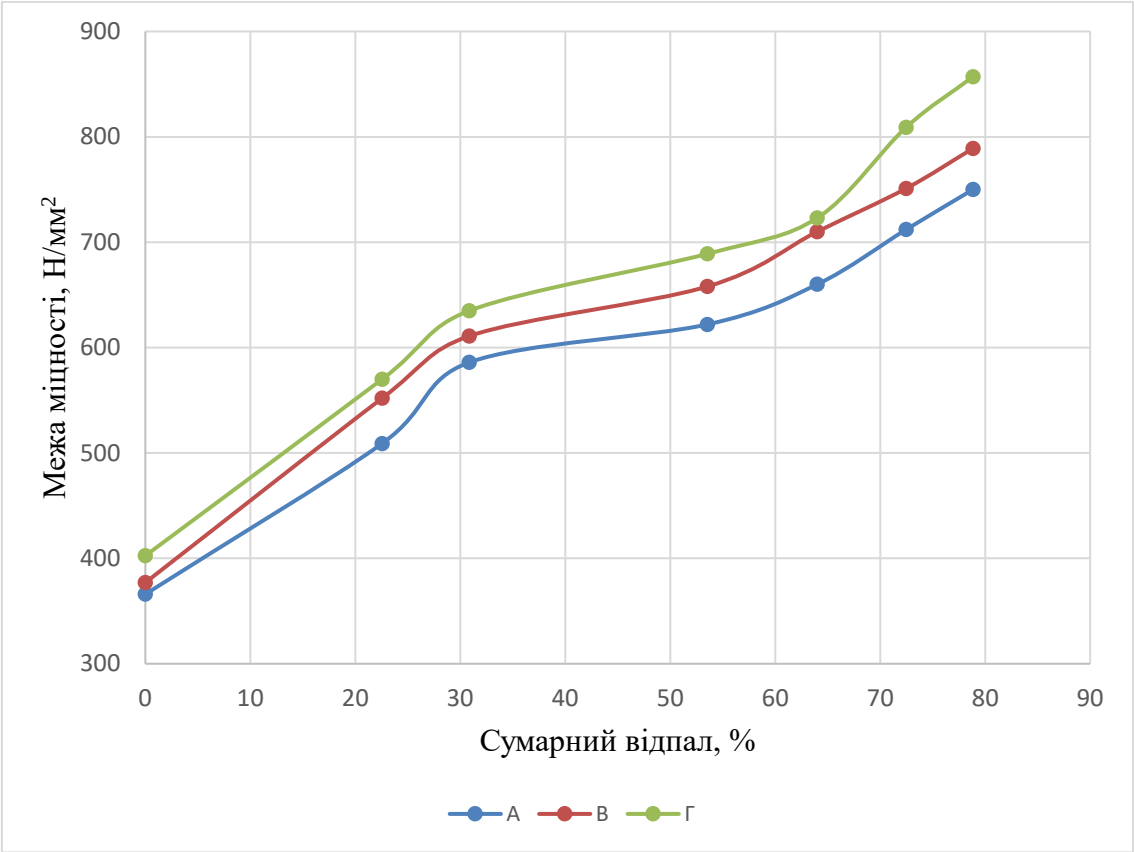


Рисунок 2.4 - Графік залежності межі міцності від сумарного відпалу для сталі БСт1кп

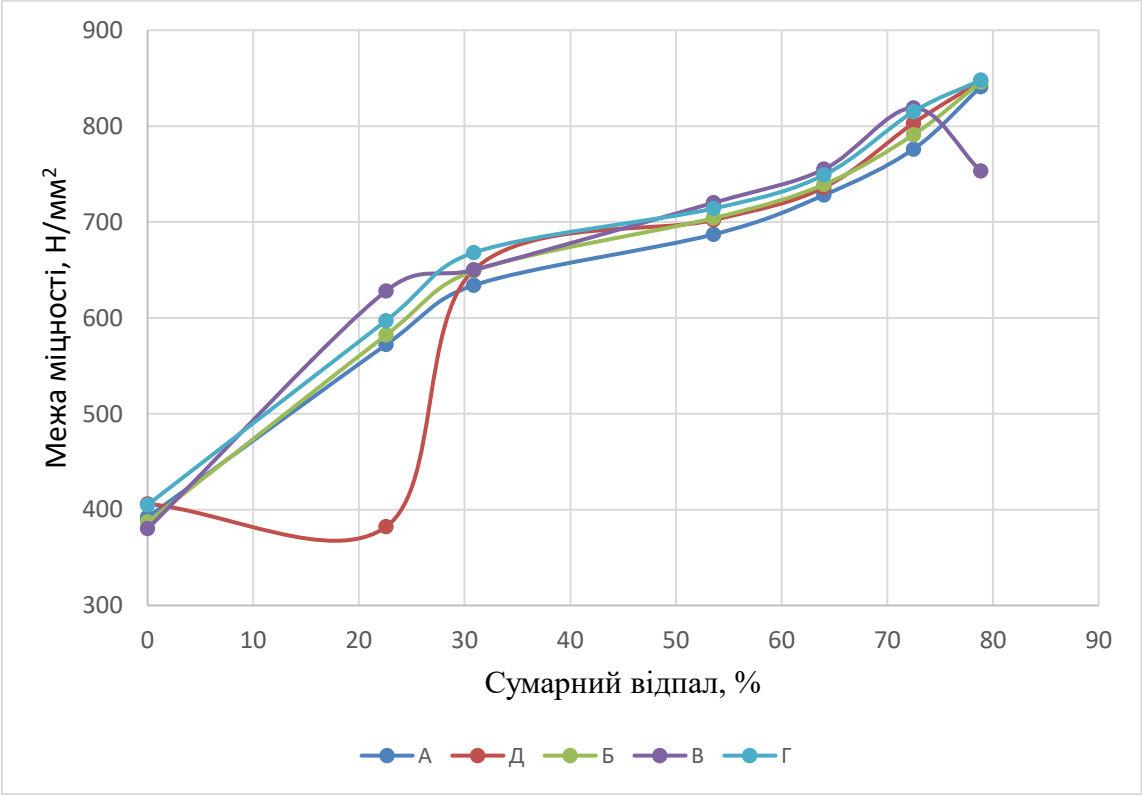


Рисунок 2.5 -Графік залежності межі міцності від сумарного відпалу для сталі БСт3кп

Аналізуючи наведені залежності можна відмітити наступне:

- кінцеве значення $\sigma_{в.к}$ визначається початковим значенням $\sigma_{в.п}$;
- незалежно від температури змотки швидкість збільшення значення $\sigma_в$, що характеризується кутом нахилу кривої $tg\alpha$ – однакова для низьковуглецевих марок сталей, що приймають участь в експерименті при малих значеннях E_Σ;
- більше різне значення $\sigma_в$ наступає при E_Σ= 65 – 70%;
- при більше низькому вмісту вуглецю сталі БСт.0М та БСт.1кп, температура змотки сильніше на впливає $\sigma_{в.к}$, ніж при більше високому вмісту вуглецю – сталь БСт.3кп;
- можливо існує такий вміст вуглецю в сталі, при якому температура змотки практично не впливає на $\sigma_{в.к}$, при певних значеннях E_Σ при волочінні на станах магазинного типу, так як значення $\sigma_{в.к}$ для сталі БСт3кп практично однакові.

Таблиця 2.9 – Значення $\sigma_{в.п}$, усереднених по бунту в залежності від сумарного відпалу E_{Σ}, %

Марка сталі	Варіант охолодження	Температура, ^{0}C	d_i , *мм, (*E_{Σ}, %)						
			6,5 (0)	5,72 (22,56)	5,04 (30,87)	4,43 (53,55)	3,90 (64,0)	3,41 (72,47)	2,99 (78,84)
Ст0М	А	1070	342	492	554	599	615	682	722,5
	Б	865	372,5	527	596	646	693	723	784
	В	760	379	564	632	683	693	758	809
	Г	720	380	587	635	696	741	791	843
Ст1кп	А	1060	366	509	586	622	660	712	750
	В	775	377	552	611	658	710	751	789
	Г	725	402,5	570	635	689	723	809	857
Ст3кп	А	1100	392	572	634	687	728	776	841
	Д	960	406	382	650	702	736	803	847
	Б	890	387	582	649	704	739	791	846
	В	760	380	628	650	720	755	819	853
	Г	720	405	597	668	714	749	815	848

З таблиці видно, що:

- змінення значень відносно подовження (δ, %) у катанці зі сталі з вмістом *C*, % = *0,10* практично не спостерігається;
- деяке зниження значень δ, % спостерігається лише у варіанті Г до 26 – 26,5 % (всього на 1 – 2 %);
- в сталях з вмістом *C*, % = *0,14* спостерігається більш різке зниження значень δ, % у варіантах В і Г до 22 – 22,5 % (на 4 – 5 %);
- зміненню значень δ, % в готовому дроті дати оцінку важко, тому що δ=1,5 – 1,75 % для усіх сталей;
- значення відносного звуження Ψ, % практично не змінюється і знаходиться у межах 62 – 67 % для катанки і 27 – 35 % для готового дроту усіх марок сталі;
- кількість перегинів ($n_{пер.}$), яка дозволяє визначити стійкість до знакозмінних навантажень практично однакова для усіх сталей і складає 13 – 15 для катанки та 7 – 9 – для готового дроту діаметром *2,99 мм*.

Визначаємо діапазон значень $\sigma_в$ для катанки і дроту, як різницю між максимальним і мінімальним значенням $\sigma_{в.}$і складаємо таблицю 2.10.

Таблиця 2.10 – Значення $\sigma_{в\ max} - \sigma_{в\ min}$, *Н/мм*^{2} в залежності від температури змотки та діаметру катанки і дроту

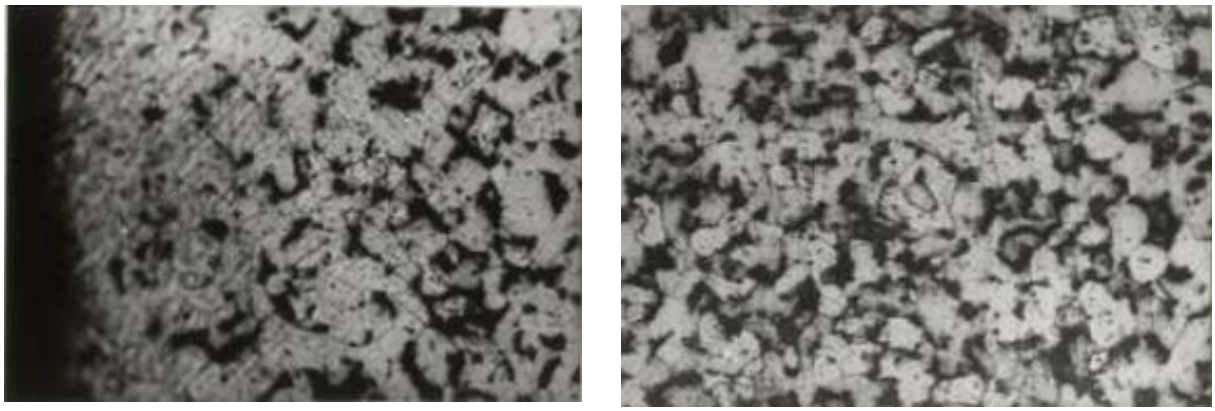
Марка сталі, ∅	Варіант охолодження	Температура, ^{0}C	Діаметр катанки (дроту), мм						
			6,5	5,7	5,04	4,43	3,90	3,41	2,99
БСт0	А	1070	45	53	44	55	16	17	28
	Б	865	32	47	39	46	89	46	46
	В	760	19	41	31	29	37	66	39
	Г	720	91	122	113	54	26	39	57
БСт1кп	А	1060	26	71	57	59	41	69	88
	В	775	25	34	64	47	88	49	37
	Г	725	58	52	33	49	27	41	46
БСт3кп	А	1100	51	32	111	78	115	163	120
	Д	960	56	38	56	73	52	83	55
	Б	890	37	63	54	52	65	62	46
	В	760	25	53	-	41	43	18	48
	Г	720	56	62	25	130	87	76	-

З таблиці видно, що найменший розкид значень $\sigma_в$ в катанці варіант охолодження В, найбільший – в варіанті охолодження Г.

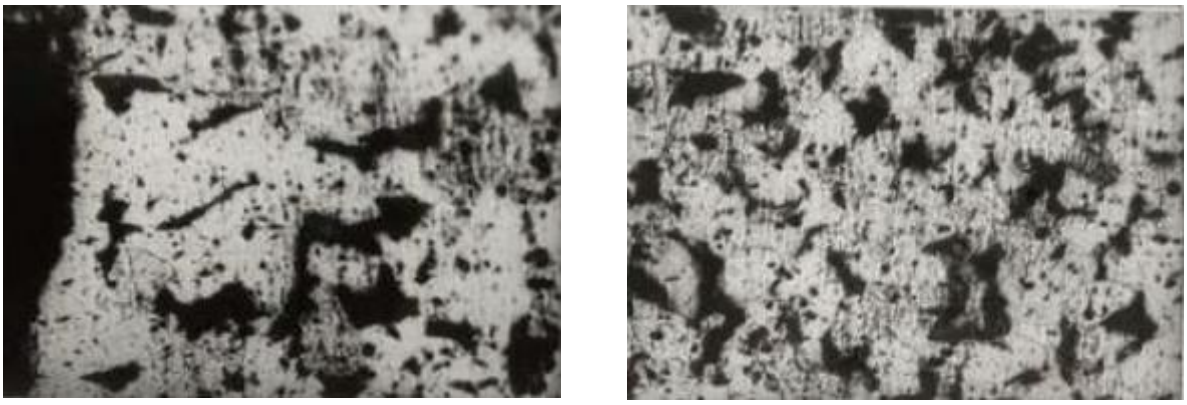
Найменший розкид значень $\sigma_в$ зберігається у процесі волочіння впродовж 2 – 3 переходів. Подальше волочіння може змінити розкид значень $\sigma_в$ в той чи інший дріт.

2.3.6 Структура катанки

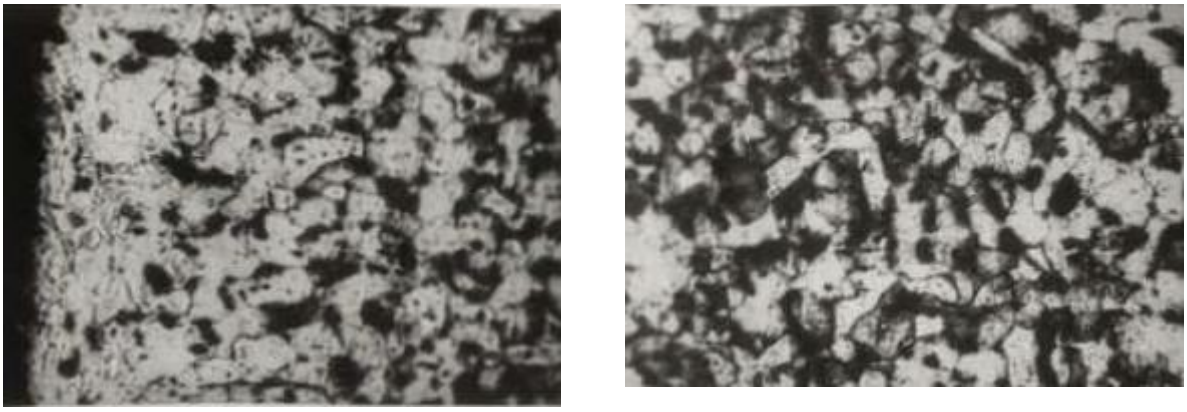
Структура катанки наведена на рисунках 2.6 – 2.10. З них видно, що найбільш рівномірна за величиною зерна є структура катанки варіанту В. Найбільш не рівномірною - варіантів А і Д. Окрім того величина зерна катанки варіанту В має величину 6 – 8 балла, що відповідає необхідним вимогам [5]. Катанка варіанту Г має величину зерна 8 – 10 балла, що не відповідає вимогам [5].



1



2

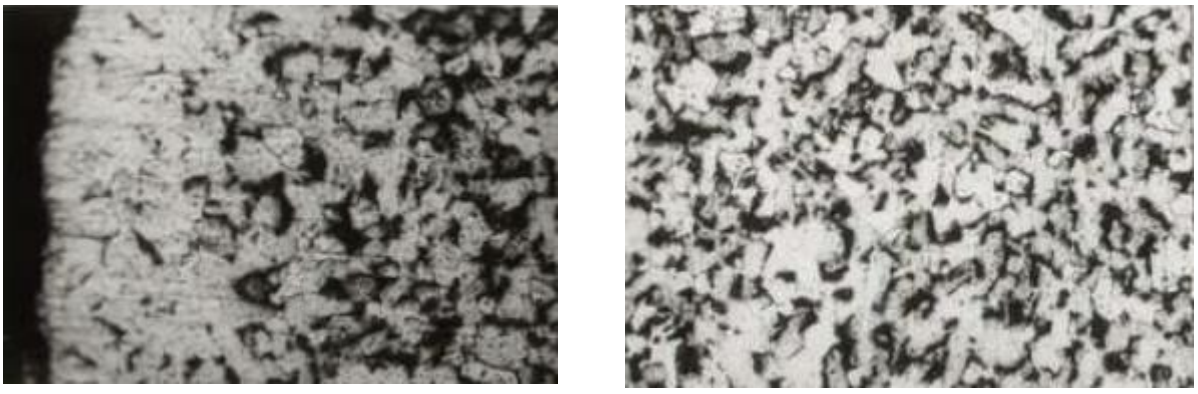


3

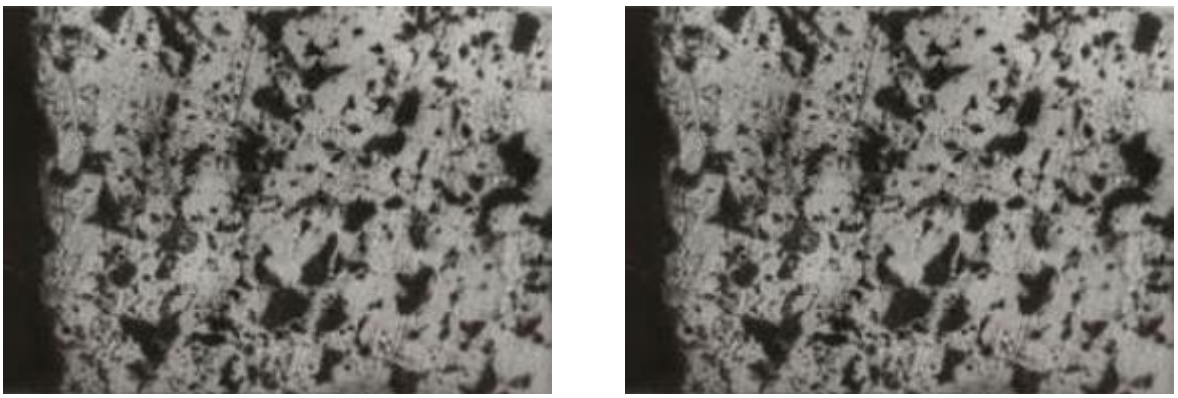
а б

Варіант охолодження – А (1100 ^{0}С): а) край зразка; б) центр зразка; 1 – початок бунта; 2 – середина бунта; 3 – кінець бунта

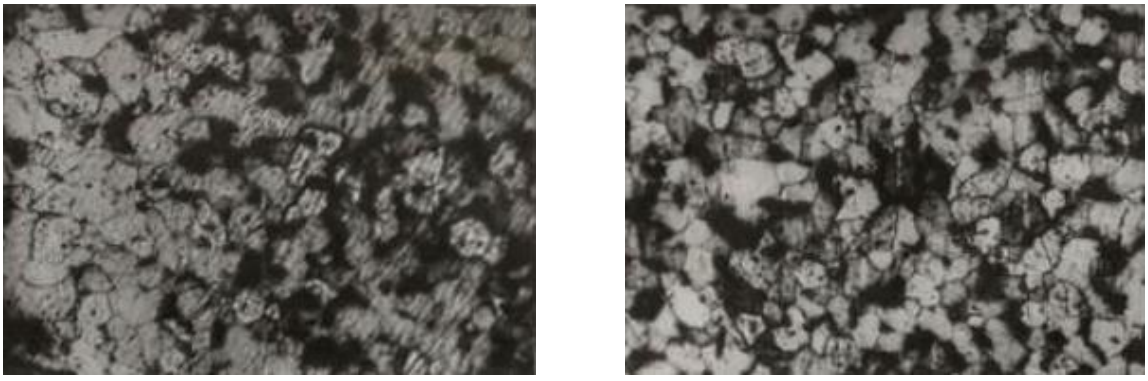
Рисунок 2.6 - Мікроструктура зразків катанки зі сталі БСт3кп, діаметром 6,5мм, прискорено охолодженої в потоці стану з прокатного нагріву в умовах комбінату «Криворіжсталь», збільшення х 200



1



2

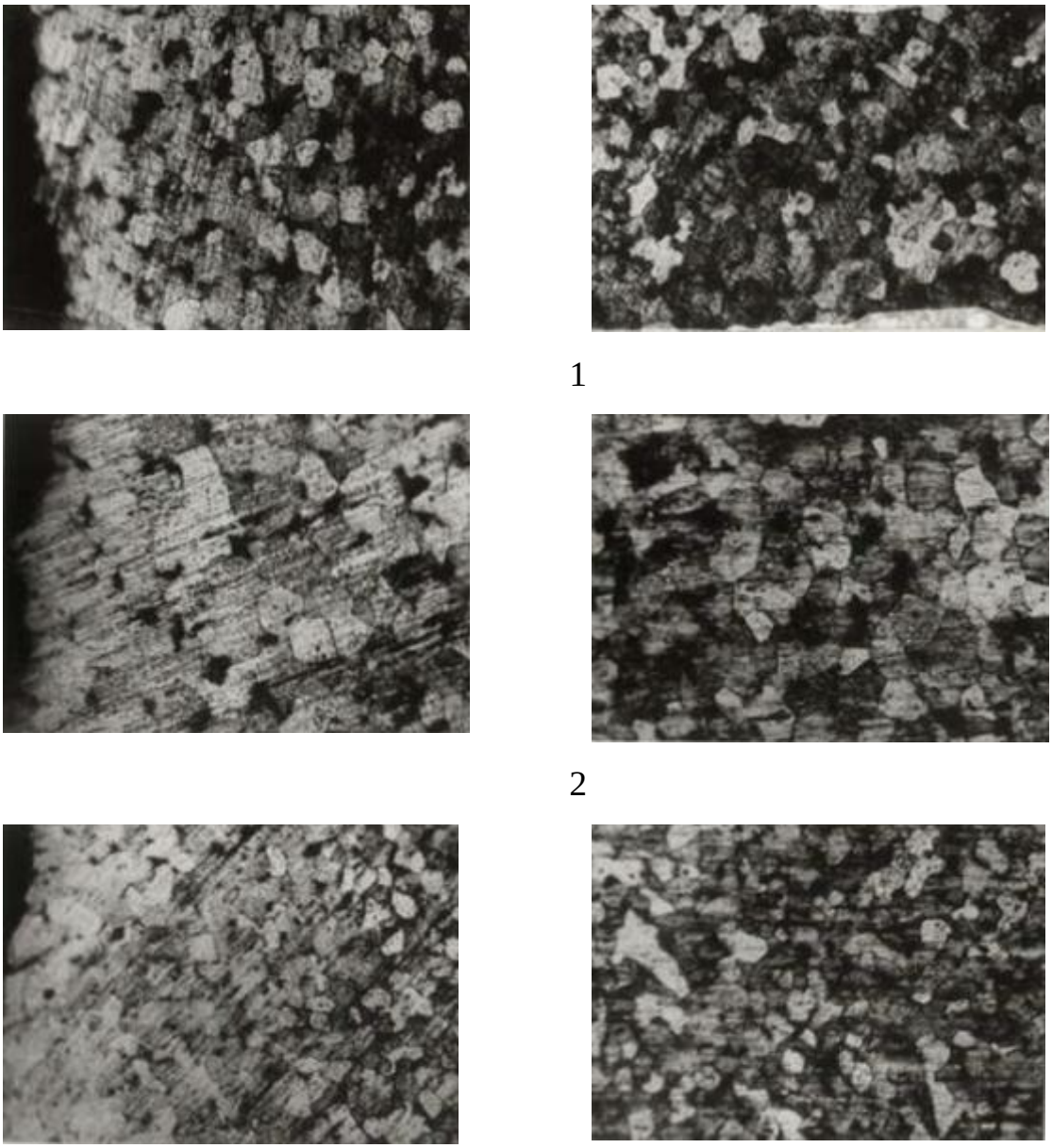


3

а б

Варіант охолодження – Д (960 ^{0}С): 1 – початок бунта; 2 – середина бунта; 3 – кінець бунта; а) край зразка; б) центр зразка

Рисунок 2.7 - Мікроструктура зразків катанки зі сталі БСт3кп, діаметром 6,5мм, прискорено охолодженої в потоці стану ПС-250-1 з прокатного нагріву в умовах комбінату «Криворіжсталь», збільшення х 200



1

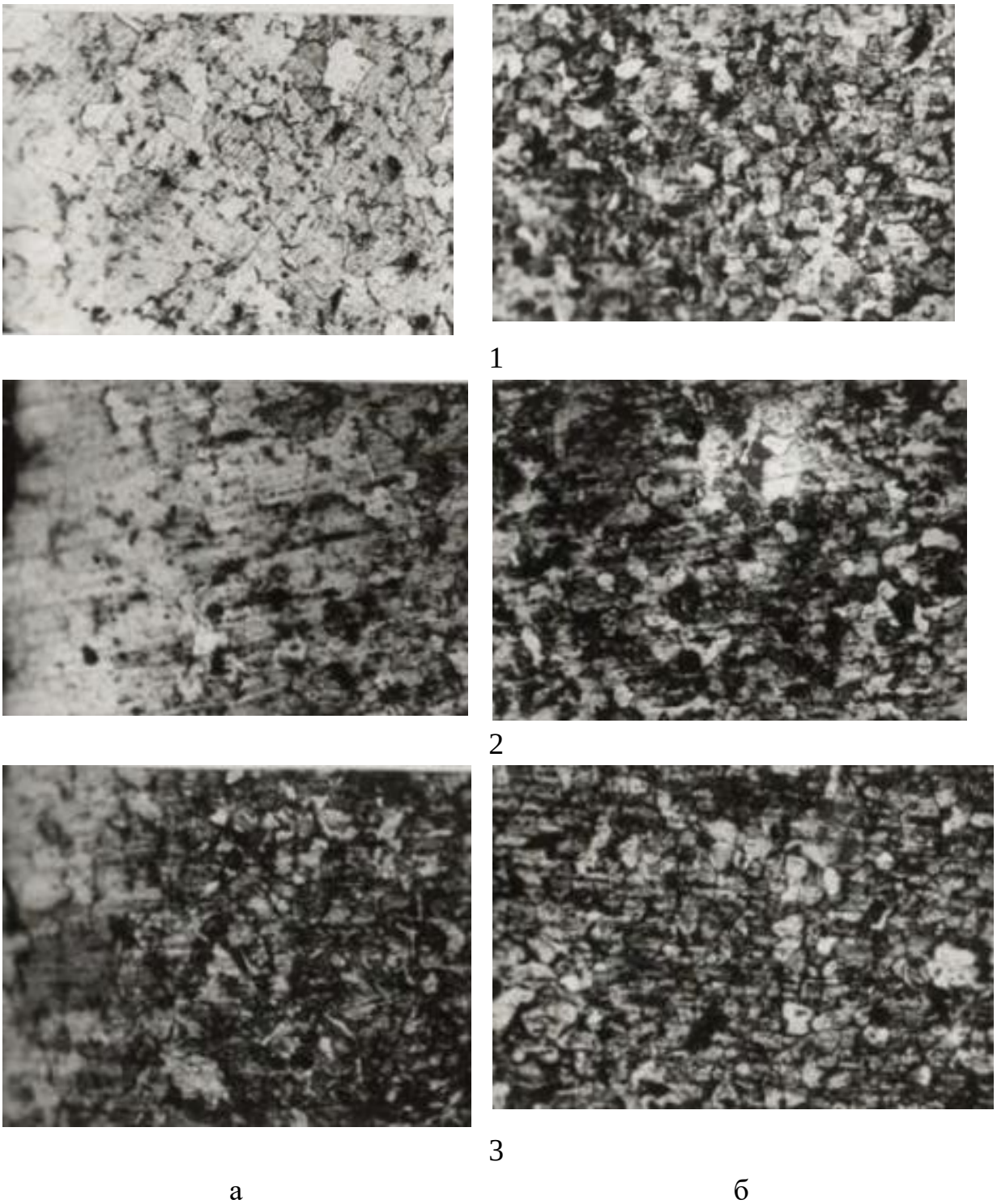
2

3

а б

Варіант охолодження – Б (890 ^{0}С): 1 – початок бунта; 2 – середина бунта; 3 – кінець бунта; а) край зразка; б) центр зразка

Рисунок 2.8 Мікроструктура зразків катанки зі сталі БСт3кп, діаметром 6,5мм, прискорено охолодженої в потоці стану ПС-250-1 з прокатного нагріву в умовах комбінату «Криворіжсталь», збільшення х 200



1

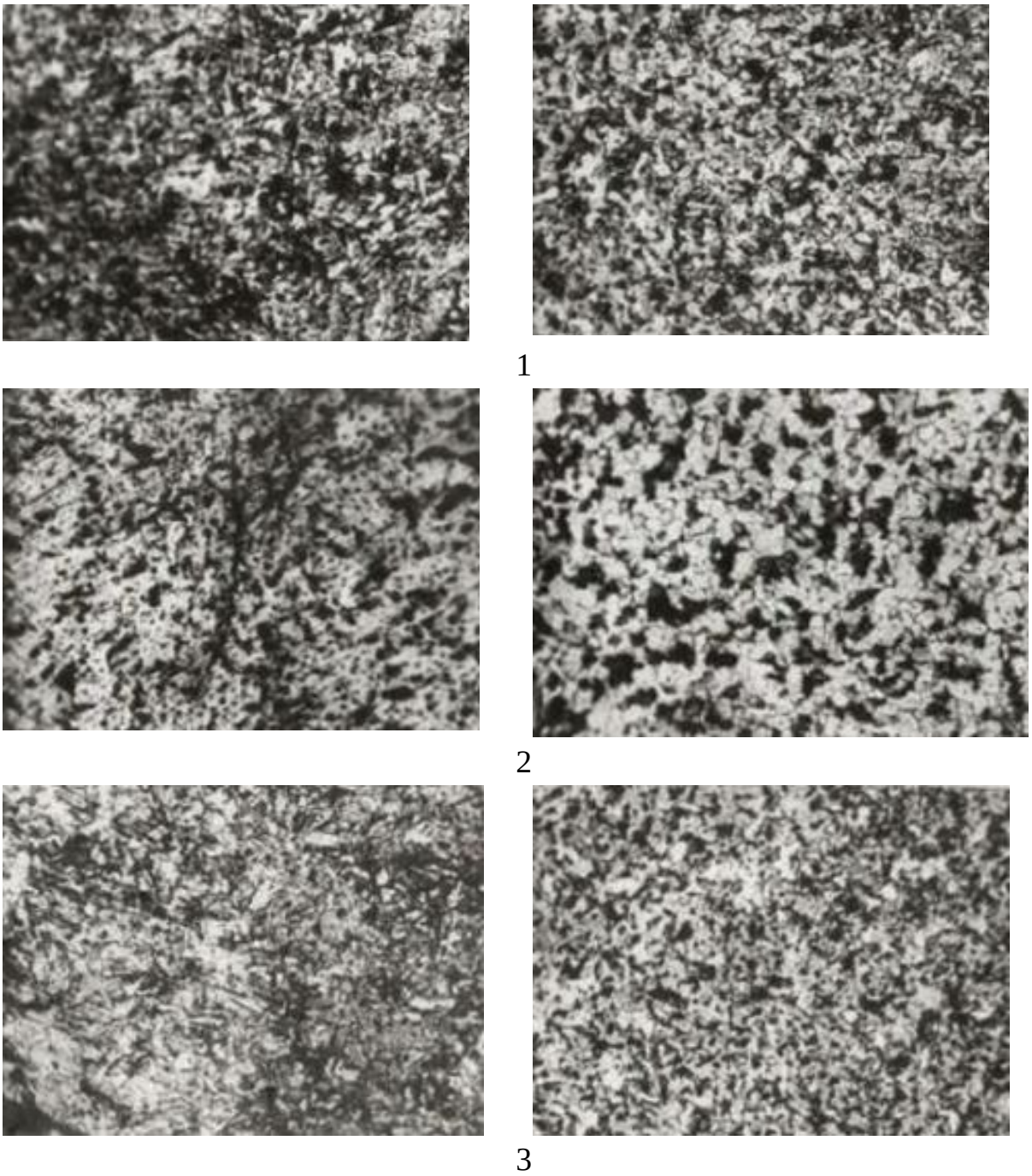
2

3

а б

Варіант охолодження – В (760 ^{0}С): 1 – початок бунта; 2 – середина бунта; 3 – кінець бунта; а) край зразка; б) центр зразка

Рисунок 2.9 - Мікроструктура зразків катанки зі сталі БСт3кп, діаметром 6,5мм, прискорено охолодженої в потоці стану ПС-250-1 з прокатного нагріву в умовах комбінату «Криворіжсталь», збільшення х 200



1

2

3

а б

Варіант охолодження – Г (720 ^{0}С): 1 – початок бунта; 2 – середина бунта; 3 – кінець бунта; а) край зразка; б) центр зразка

Рисунок 2.10 - Мікроструктура зразків катанки зі сталі БСт3кп, діаметром 6,5мм, прискорено охолодженої в потоці стану ПС-250-1 з прокатного нагріву в умовах комбінату «Криворіжсталь», збільшення х 200

Висновки до розділу 2

В другому розділі дипломної роботи проведено ряд досліджень які описують структуру та властивості катанки з низьковуглецевої сталі. Представлено методику дослідження технології прискореного охолодження низьковуглецевої катанки на дротовому стані ПС-250-1 шляхом перерозподілу потоку води. Визначені основні етапи технології прискореного охолодження методом перерозподілу потоку води на технологічність процесів прокатки та волочіння, шорсткість поверхні катанки і готового дроту.

Проаналізовано роботу валкової арматури стану, склад та кількість окалини, кількість «забурювань» чистові кліті стану та визначена стуктура катанки отриманої за запропонованим технологічним рішення.

Аналізуючи проведені дослідження можна зробити наступні висновки:

- кінцеве значення $\sigma_{в.к}$ визначається початковим значенням $\sigma_{в.п}$;
- незалежно від температури змотки швидкість збільшення значення $\sigma_{в}$, що характеризується кутом нахилу кривої $tg\alpha$ – однакова для низьковуглецевих марок сталей;
- великий розкид значень значення $\sigma_{в}$ наступає при $E_{\sum}$= 65 – 70%;
- при більше низькому вмісту вуглецю сталі БСт0 та БСт1кп, температура змотки сильніше впливає на $\sigma_{в.к}$, ніж при більше високому вмісту вуглецю – сталь БСт3кп;
- змінення значень відносно подовження (δ, %) у катанці зі сталі з вмістом *C*, % = *0,10* практично не спостерігається;
- деяке зниження значень δ, % спостерігається лише у варіанті Г до 26 – 26,5 % (всього на 1 – 2 %);
- в сталях з вмістом *C*, % = *0,14* спостерігається більш різке зниження значень δ, % у варіантах В і Г до 22 – 22,5 % (на 4 – 5 %);
- зміненню значень δ, % в готовому дроті дати оцінку важко, тому що δ=1,5 – 1,75 % для усіх сталей;

- значення відносного звуження Ψ, % практично не змінюється і знаходиться у межах 62 – 67 % для катанки і 27 – 35 % для готового дроту усіх марок сталі;

- кількість перегинів ($n_{пер.}$), яка дозволяє визначити стійкість до знакозмінних навантажень практично однакова для усіх сталей і складає 13 – 15 для катанки та 7 – 9 – для готового дроту діаметром *2,99 мм*.

Найменший розкид значень $\sigma_в$ в катанці притаманний варіанту охолодження В, найбільший – в варіанті охолодження Г.

Найменший розкид значень $\sigma_в$ зберігається у процесі волочіння впродовж 2 – 3 переходів. Подальше волочіння може змінити розкид значень $\sigma_в$ в той чи інший дріт.

Структура катанки, що наведена у розділі показує, що найбільш рівномірна за величиною зерна є структура катанки варіанту В. Найбільш не рівномірною - варіантів А і Д. Окрім того величина зерна катанки варіанту В має величину 6 – 8 балів, що відповідає необхідним вимогам. Катанка варіанту Г має величину зерна 8 – 10 бали, що не відповідає вимогам.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз калібрування валків безперервних дротових станів 250

Чернова група клітей стану складається з сими клітей, перша з яких є окалиноломателєм; електропривід для усіх клітей – загальний.

У перших двох клітей – ящикове калібрування зі значним випуском бокових стінок. На другій кліті форма калібру наближується до шестикутного. Дно калібру сильно випукле, що є суттєвим недоліком, тому що випуклість по дну калібру сприяє возгону металу в сторони. На третій кліті застосований квадратний калібр. На четвертій – шестикутний. На п’ятій – квадратний. На шостій – ромбічний.

В клітях першої проміжної групи застосована калібрування системи шестикутник – квадрат.

В клітях другої проміжної групи застосована калібрування системи овал- квадрат.

Калібрування валків чорнової групи клітей властиві суттєві недоліки. Застосування різних систем калібрів вже само по собі є недоліком, тому що різноманітність калібрів в одній групі ускладнює налаштування стану, виготовлення арматури, розточку валків і т. д. При цьому в процесі прокатки трудніше виявити причину появи того чи іншого дефекту, пов’язаного з калібруванням і роботою чорнової групи клітей.

Застосування в шостій кліті ромбічного калібру можна виправдати лише у зв’язку зі зменшенням числа кантування. Однак, відносно температурного режиму і умов оновлення кутів застосування ромбічного калібру небажано. Виходить, що в п’ятому, шостому та сьомому калібрах кути профіля не оновлюється, а у зв’язку з взаємодією їх з валками в процесі деформації вони віддають багато тепла, знижується пластичність металу, звідси в перетини розкату міцність та пластичність отримуються нерівномірними.

Крім того, більш охолоджені кути розкату квадратного перетину (5-а кліть), а потім ромбічного, який задається в квадратний калібр 7-ї кліті буде сприяти прискорений знос та місцеву виробітку вершин 7-го калібру.

Стійкість калібрів шостої і особливо сьомої кліті значно зменшується. Однак, тимчасово збільшується місцевий виробіток у п’ятикутковому калібрі восьмої кліті – в місцях, що відповідають за положення кутів розкату квадратного перетину, що прокатується. Більш жорсткий метал, розташований в кутах квадратного розкату буде сприяти збільшенню виробітку калібру чотирьох місцях симетрично розташованих на кожному потоці відносно вертикальної осі.

В роботі [20] вивчали вплив калібрування на розподіл шару, що не містить вуглецю. Було зроблено висновок про те, щоб більш рівномірно розподіляти шар, що не містить вуглецю необхідно відмовитися від прокатки без кантування, в чорновій групі необхідно швидше отримати шестикутний профіль, зменшити зазор з метою зменшення вільної бокової поверхні.

Таким чином, калібрування валків безперервних дротових станів і з точки зору отримання рівномірно розподіленого шару, що не містить вуглецю також потребує змін.

3.2 Розрахунок калібрування валків для прокатки катанки діаметром 6,5 та 8,0 мм з сталі БСт.3кп для вимог дротових станів 250-1,2

3.2.1 Розподіл коефіцієнтів витяжки та розрахунок орієнтовного швидкісного режиму прокатки

З практичних даний [19] з чорнової групи клітей повинен вийти розкат квадратного перетину зі стороною $C_{кв} = 18мм,$ з першої проміжної $C_{кв} \approx 11мм.$ Між розміром $C_{кв}$ сторони предовального квадрата і діаметром чистового круга існує залежність $C_{кв} = (1,0 – 1,05)d_{кр.}$.

Для нашого випадку маємо:

$$C_{кв} \approx (1,0 – 1,05); 8,0 = 8,0 – 8,4 \text{ мм}$$

Таким чином приймаємо що з другої проміжної групи клітей виходить розкат квадратного перетину зі стороною $C_{кв.} = 8,4мм.$

За посиланням [19] для забезпечення стійкого процесу прокатки без перекосу поперечного перерізу розкату необхідно послідовне збільшення константи прокатки C_i по клітям на 0,3 – 0,5%.

Приймаю збільшення константи прокатки C_i на 0,4%.

Частоту обертання валків в чистовій кліті стану приймаю з запасом 15% від максимальної швидкості обертання валків.

$$n_{в17} = 2400/1,15 = 2090 \text{ об/хв}$$

Розрахунок проводжу для комплекту валків, який має максимальний номінальний діаметр валків $Д_Н$, тому для збереження продуктивності приймаю більше значення $n_{в17} = 2110$ об/хв

Діаметр валків чистової кліті, що катає:

$$Д_{к17} = Д_{н17} - h_{17} \cdot \sqrt{C_{f17}} = 280 - 6,5 \cdot \sqrt{0,785} = 274,24мм:$$

де: h_{17} – висота полоси; C_{f17} – коефіцієнт форми калібру [29, табл.8].

Константа калібрування по чистовій кліті стану:

$$C_{17} = \frac{\pi \cdot Д_{к17} \cdot n_{в17}}{60} \cdot F_{17} = \frac{3,14 \cdot (274,24) \cdot 10^{-3} \cdot 2110}{60} \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 6,5^2}{4}\right)$$

$$= 1004,75 \text{ м} \cdot \text{мм}^2/\text{с}$$

де: F_{17} – площа поперечного перерізу розкату чистової кліті.

Константа калібрування 18-ї кліті стану:

$$C_{18} = C_{17} / 1,004 = 1004,75 / 1,004 = 1000,75 \text{ м·мм}^2/\text{с}$$

Значення C_1 - C_{15} визначаю аналогічно, результати заношу в табл. 3.1

Чернова група клітей.

Розподіл коефіцієнтів витяжки μ_i в клітях з груповим приводом визначається передатними відношенням редуктора і прийнятого коефіцієнту збільшення значення C_i.

Регулювання значення C_i можливо тільки площею поперечного перерізу F_i та діаметром $Д_{кі}$, що катає, який не визначений.

Приймаю значення F_1 – F_7 з таблиці калібрування дротових станів комбінату «Криворіжсталь» та визначаю швидкості прокатки по формулі: $\upsilon_i = C_i / F_i$, коефіцієнт витяжки по формулі: $\mu_i = \frac{F_{i+1}}{F_i}$, результати розрахунків заношу в таблицю.

Приймаю $C_{кв7} = 17мм$, тоді: $Д_{к7} = 345 - 17 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{0,59} = 326,6\ мм$

Окружна швидкість валків для 7-ї кліті:

$$n_{в7} = \frac{60 \cdot 3,33}{3,14 \cdot 0,3266} = 194,67\ об/хв$$

Оберти двигуна в чорновій групі клітей:

$$n_{дв(1\text{-}7)} = n_{в7} \cdot i_7 = 194,67 \cdot 2,71 = 527,6\ об/хв$$

де: i_7 – передаточне відношення редуктора для 7-ї кліті.

Окружна швидкість валків для 1-ї – 6-ї клітей визначаю по формулі:

$$n_{вi} = n_{двi} / i_i$$

Значення $Д_{кі}$ визначаю по формулі: $Д_{кі} = Д_{ні} - \sqrt{F_i}$

Значення υ_i , $n_{вi}$, $n_{двi}$, F_i , μ_i визначаю аналогічно, результати заношу в таблицю 14.

Перевіряючи в таблиці 14 обмеження за швидкісним режимом прокатки, впевнююсь, що вони виконуються для всіх клітей стану.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку орієнтовного швидкісного режиму прокатки катанки діаметром 6,5 мм із заготовки перетином 62 х 62мм

Група клітей	№ кліті	№ проходу	C, $м \cdot мм^2/с$	υ, $м/с$	$Д_н$, $мм$	$Д_к$, $мм$	F, $мм^2$	μ	$n_{в}$, $об/хв$	$n_{дв}$, $об/хв$	$n_{дв\ max}$, $об/хв$
	-	0	-	-	-	-	3750	-	-	-	-
чорнова	I	1	942,57	0,329	446	392,5	2860	1,31	15,94	527,6	600
	II	2	946,34	0,478	446	401.5	1980	1,44	22,32		
	III	3	950,13	0,686	405	367.8	49,85	1,43	3548		
	IV	4	953,93	1.103	405	375,6	865	1,60	55,01		
	V	5	957,75	1,623	360	335,7	590	1,47	92,72		
	VI	6	961,58	2,434	350	330,1	395	1,49	139,2		
	VII	7	965,43	3,329	345	328,0	890	1,36	194,67		
I проміжок	VIII	8	966,29	4,392	310	295,2	220	1,32	270,6	439,4	600
	IX	9	973,17	6,044	310	297,3	161	1,37	372,4		
	X	10	977,06	7,402	310	298,5	132	1,22	455,9	455,9	
	XI	11	980,97	8,107	307	296,0	121	1,23	504,3		
II проміжок	XII	12	984,89	11,066	325	297,5	89	1,2	650,3	650,3	900
	XIII	13	988,83	13,686	325	316,5	72,25	1,24	804,5	804,5	
чистова	XVI	14	992,79	16,116	270	262,15	61,6	1,17	1139,9	1037,4	1500
	XVII	15	996,76	19,832	270	262,9	50,26	1,225	1402,7	1130,6	
	XVII	16	1000,75	22,74	270	263,4	440	1,14	1608,5	1101,8	
	XIX	17	1004,75	30,281	280	274,2	33,18	1,33	2363,2	1414,5	

3.2.2 Вибір систем калібрування і складання схем калібрування

Калібрування валків є складною ієрархічною, системою, до якої пред'являються різнобічні вимого. Тому для оцінки її раціональності або оптимальності необхідно застосовувати декілька критеріїв, в якості котрих можна використовувати, з урахуванням діючої системи обмежень, наступні характеристики технологічного процесу:

$$П = 3600/T_T \cdot G \cdot к_в \rightarrow max;$$

$$F_0 = F_n \cdot \mu_{\sum ст} \rightarrow max;$$

$$n_{пр} = lg\mu_{\sum ст}/\ lg\mu_{\sum ср} \rightarrow min;$$

$$Q \rightarrow min;$$

$$B = \sum_{в}^{n_{пр}} в_i \rightarrow min;$$

$$C_в \rightarrow max$$

де T_T – такт прокатки; $П$ – продуктивність прокатного стану; G – вага полоси, що прокатується; $к_в$ – коефіцієнт використання стану; F_0 – перетин вихідної заготовки; F_n – площа готового профіля; $\mu_{\sum ст}$ і $\mu_{\sum ср}$ – сумарний і середній коефіцієнт витяжки на стані; Q – витрати електроенергії; B – знос валків; $в_i$ – питома витрата валків в i-тій клітці стану; $C_в$ – витяжна здатність калібрів.

Ряд критеріїв поки не піддається математичному описанню, наприклад, якість прокату, зручність монтажу калібрів на валках і т. д.

При проектуванні калібрування валків не вдається в рівному ступені задовольнити кожному критерію. Тому при оптимізації виділяють один або декілька критеріїв, а інші за можливістю, враховують, як додаткові [23].

Для заданих вимог по [23, табл. 3.17] вибирають схему калібрування за напрямом прокатки для чистової групи сталей 14, 15, 16 та 17-й проходи.

Умови вибору схеми: отримання проміжного круга, стан-дротовий має чергування вертикальних та горизонтальних клітей, марка сталі вуглецева. Цим вимогам відповідає схема №2: *овал – круг – овал – круг*.

Форма перетину підкату може бути: квадрат, круг, реберний овал.

При цій схемі знос валків – середній, точність профілю – підвищена.

Визначимо форму підкату для чистової групи клітей.

По [23 табл. 3.16] середньостатистичне значення відношення крутних моментів $m(Q_m)$ для можливих до використання систем калібрів складе:

квадрат – овал – круг – $m(Q_m) = 1{,}000$

реберний овал – овал – круг - $m(Q_m) = 0.993$

круг – овал - $m(Q_m) = 1{,}222$

квадрат = овал - $m(Q_m) = 1{,}000$

реберний овал – овал – 1,000

Схему *круг – овал – круг* до розгляду не приймаємо, тому що вона потребує більших затрат енергії у порівнянні з іншими схемами.

Дамо оцінку ступеню використання витяжної здатності пари суміжних калібрів $C_в$ для 14 та15-го проходів по схемам, що залишилися.

Сумарний коефіцієнт витяжки:

$$\mu_{(14-15)} = \mu_{14} \cdot \mu_{15} = 1{,}43$$

Наведений діаметр валків для15-гопроходу:

$$A_{15} = Д_{к15} / H_{15} = 262{,}9 / 8{,}0 = 32{,}86;$$

де H – висота полоси в проході.

Для інших проходів значення H орієнтовно приймаю по таблиці калібрування валків дротових станів комбінату «Криворіжсталь».

Визначаю максимально допустимий сумарний коефіцієнт витяжки при υ_{15} = *19,9м/с,* A_{15} = *32,86* по [23, рис 3.11, 3.12].

$\mu_{\sum \max(14-15)}$ = 2,2 – для схеми *квадрат – овал – круг* та

$\mu_{\sum \max(14-15)}$ = 1,8 – для схеми *реберний овал – овал – круг.*

$C_{в\ (14\text{-}15)} = \mu_{\sum(14-15)} / \mu_{\sum \max(14-15)} = 1{,}43/1{,}8 = 0{,}79.$

$C_{в\ (14\text{-}15)} = 1{,}43/2{,}2 = 0{,}65$

Запас витяжної здатності:

$З_{в\ (14\text{-}15)} = 1 - C_{в\ (14\text{-}15)} = 1 – 0{,}65 = 0{,}35$

$З_{в\ (14\text{-}15)} = 1 - 0{,}79 = 0{,}21.$

З точки зору витяжної здатності калібрів раціональною є система *реберний овал – овал*, тому що вона забезпечує максимальний ступінь використання витяжної здатності з урахуванням допустимого запасу, тобто [38] 0,10 – 20 [23]. Перевага також полягає втому, що в калібрі вертикальний овал не потребується, точніше, виконання форми поперечного перетину розкату; при деформації в цьому калібрі закругляються гострі виступи, що розташовані на більшій осі симетрії овальної полоси, що особливо важливо для чистового калібру. Закругленість кромок овалу сприяє збільшенню стійкості чистового калібру, отже, покращенню якості поверхні готової катанки.

Однак, при деформації розкату у вертикальному овалі його бокові поверхні не обробляються по периметру у зв’язку з контуром бокових сторін калібру по певному радіусу.

Періодична прокатка розкату то в горизонтальному, то вертикальному овалах супроводжується знакозмінними величинами напружень, що діють по основним осям, що може привести до розвинення рихлості розкату в центральній частині [19].

Щоб цього уникнути використання цієї системи можна враховувати раціональною при не більше ніж два овальних калібри перед чистовим калібром.

Відомо, що системи калібрів з низькою витяжною здатністю забезпечують більш високу точність прокатки, менший знос валків у порівнянні з системами з більшою витяжною здатністю. Наприклад, застосування системи калібрів *овал – квадрат* при $C_в = 0,5 – 0,6$ нераціонально, тому що з'являється небезпека утворення складок в кутах квадрату і нерівномірність зносу калібру по ширині [23].

При прокатці проміжного круга великих розмірів величина $З_в$ для вибраних схем збільшиться.

Таким чином на даному етапі вибір схем ускладнений.

Якщо з'ясується, що калібр 11-ї кліті буде змінювати форму, що відрізняється від форми реберного овалу, то раціональніше буде враховувати схему *реберний овал – овал – круг.*

Для того, щоб отримати в 13-му проході розкат форми реберного овалу або квадрату по [23] можна використовувати наступні схеми.

Схема № 7 – *круг – овал – реберний овал*

Схема № 8 – *квадрат – овал – реберний овал*

Схема № 10 – *реберний овал – овал – реберний овал*

Схема № 11 – *квадрат – овал – квадрат*

Схема № 13 – *квадрат – шестикутник – квадрат*

Схема № 14 – *реберний овал – овал – квадрат*

Схеми з застосуванням шестикутних, ромбічних та круглих калібрів до уваги не приймаю.

$A_{13} = 325/11 = 29,55;$

$\mu_{(12-13)} = 1{,}2 \cdot 1{,}24 = 1{,}488.$

$(C_{в\ (12\text{-}13)})_8 = 1{,}488 / 2{,}2 = 0{,}676;$ $(З_{в\ (12\text{-}13)})_8 = 1 - 0{,}676 = 0{,}324;$

$(C_{в\ (12\text{-}13)})_{10} = 1{,}488 / 1{,}8 = 0{,}826;$ $(З_{в\ (12\text{-}13)})_{10} = 1 - 0{,}826 = 0{,}174;$

$(C_{в\ (12\text{-}13)})_{11} = 1{,}488 / 2{,}8 = 0{,}531;$ $(З_{в\ (12\text{-}13)})_{11} = 1 - 0{,}531 = 0{,}469;$

$(C_{в\ (12\text{-}13)})_{13} = 1{,}488 / <1{,}4 = > 1;$ $(З_{в\ (12\text{-}13)})_{13} =< 1;$

$(C_{в\ (12\text{-}13)})_{14} = 1{,}488 / 2{,}0 = 0{,}744;$ $(З_{в\ (12\text{-}13)})_{14} = 1 - 0{,}744 = 0{,}256.$

Найбільш повно і достатньо використовується витяжна здатність схем № 8 і № 14. Ці схеми також мають практично однакові значення $m(Q_m) - 0{,}998$ і $0{,}976$ для схем 8 та 14 відповідно.

Вибір форми 11-го калібру також викликає труднощі.

Визначимо форму калібру 9-ї кліті.

$A_{11} = 307/16 = 19{,}18;$

$\mu_{(10-11)} = 1{,}22 \cdot 1{,}23 = 1{,}5.$

$(C_{в\ (10\text{-}11)})_8 = 1{,}5 / 2{,}25 = 0{,}67;$

$(C_{в\ (10\text{-}11)})_{10} = 1{,}5 / 1{,}7 = 0{,}882;$

$(C_{в\ (10\text{-}11)})_{11} = 1{,}5 / (2{,}4 - 2{,}8) = 0{,}625 - 0{,}535;$

$(C_{в\ (10\text{-}11)})_{13} = 1{,}5 / 2{,}6 = 0{,}58 - при\ \vartheta = 0{,}5 - 0{,}6\ м/с;$

$(C_{в\ (10\text{-}11)})_{14} = 1{,}5 / 2{,}2 = 0{,}68.$

Вибір форми 9-го калібру викликає труднощі.

Визначимо форму калібру 7-ї кліті

$A_7 = 328/22{,}8 = 14{,}38 < 16.$

За рекомендаціями [23] в чорновій групі клітей більшу витяжну здатність має система калібрів *шестикутник – квадрат*, окрім того вона є аналогом системи *овал – квадрат* і володіє усіма її перевагами: рівномірне обтискання по ширині полоси як у шестикутному, так і в квадратному калібрах; стійке положення полоси в квадратному калібрі, спрощує конструкцію дротової арматури.

Враховуючи вплив калібрування валків на розподіл шару, що не містить вуглець (см. Вибираю по ходу прокатки в чорновій групі клітей схему

калібрування – ящичний – шестикутний (ящичний з великим випуском) – квадратний – шестикутний – квадратний – шестикутний – квадратний.

В 13-й кліті приймаю калібр типу вертикальний овал.

У зв'язку з цим калібри 11-ї і 9-ї клітей – квадратні.

Хоча на [23,рис 311,312] відсутні дані для визначення $\mu_{\sum \max}$ системи шестикутник – квадрат, в 8-й і 10-й клітях приймаю шестикутні калібри.

Застосування системи калібрів шестикутник – квадрат виправдовує себе при прокатуванні катанки до розмірів сторін квадрату 8 – 15 мм [19] і на дротових станах комбінату «Криворіжсталь» - зокрема.

Система більш технологічна у порівнянні з системою овал – квадрат.

У шестигранних розкатів, особливо при малих радіусах заокруглень, втрати тепла, зазвичай, декілька більше, ніж системі овал – квадрат. Для дротових станів це не характерно, так як температура прокатування, зазвичай, знаходиться в межах 1000 ^{0}C.

Таким чином, застосування системи овал – квадрат можна пояснити лише всталою традицією. Значення параметрів $\mu_{\sum}$, $\mu_{\sum \max}$, $C_в$, $З_в$, A для інших клітей визначають аналогічно.

Результати розрахунків по вибору системи калібрів і схем калібрування знаведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку по вибору схеми калібрів та схеми калібрування

Група клітей	№ проходу	Форма калібру	A	μ_{Σ}	$\mu_{\Sigma\,max}$	$C_в$, %	$З_в$, %
чорнова	1	ящичний	8,92	1,31	1,44	90	10
	2	шестикутний	14,6	2,059	3,4	60,55	30,45
	3	квадратний	7,63				
	4	шестикутний	20,3	2,357	3,4	69,32	30,68
	5	квадратний	10,69				
	6	шестикутний	20,49	20,026	2,8	72,35	27,65
	7	квадратний	14,38				
1-а проміжна	8	шестикутний	30,75	1,808	2,6	69,54	30,46
	9	квадратний	18,58				
	10	шестикутний	37,31	1,5	2,4	62,5	37,5
	11	квадратний	19,18				
2-а проміжна	12	овальний	44,41	1,488	2,2	67,6	32,4
	13	реберний овал	29,55				
чистова	14	овальний	46,88	1,43	1,8	79,	21
	15	круглий	32,86				
	16	овальний	51,64	1,516	1,6	84	16
	17	круглий	42,18				

3.2.3 Розрахунок формозмінення металу і розмірів калібрів

Чернова група клітей

Регулювання C_i в чорновій групі клітей можливо тільки площею поперечного перетину полоси і діаметром валків, що катається, тому визначаю значення $F_i \cdot Д_{кі}$:

$$F_1Д_{к1} = \frac{60 \cdot C_1}{\pi \cdot n_{в1}} = \frac{60 \cdot 942{,}57}{3{,}14 \cdot 15{,}94} = 1129{,}345 \text{ мм}^2 \cdot \text{м}$$

Значення $F_2 \cdot Д_{к2} – F_7 Д_{к7}$ – визначаємо аналогічно.

1=й прохід (ящичний калібр)

Приймаю висоту полоси після проходу $H_1 = 44$ *мм.*

Абсолютне обтискання: $\Delta H_1 = H_0 – H_1 = 62\text{-}44 = 18$ *мм;*

Діаметр, що катає: $Д_{К1} = 446\text{-}44\sqrt{0{,}98} = 402{,}44$ *мм;*

Швидкість прокатки: $\upsilon_1 = (3{,}14 \cdot 0.402 \cdot 15{,}91) / 60 = 0{,}335$ *м/с*

Приймаю температуру початку прокатування $t_{н1} = 1200\ ^0C$.

Допустимий кут захвату по [23, табл. 3.12]:

$[\alpha_1] = 100/(5{,}99 + 0{,}226 \cdot \upsilon_1^2 - 1{,}16 f_T - 1{,}9 a_3 + 0{,}42M + 0{,}39 \cdot 10^{-3} \cdot t_{н1}) =$

$100/ (5{,}99 + 0{,}226 \cdot 0{,}335^2 - 1{,}16 \cdot 1 - 1{,}9 \cdot 1{,}05 + 0{,}42 \cdot 1 + 0{,}39 \cdot 1{,}2) = 26{,}28^0$

де: f_T – коефіцієнт, що враховує матеріал валків;

M - коефіцієнт, що враховує марку сталі, що прокатується;

a_3 – ступінь затискання калібром полоси.

Допустиме обтиснення:

$$[\Delta H_1]_\alpha = Д_{к1} \cdot (1 - \cos[\alpha_1]) = 402{,}44 \cdot (1 - \cos 26{,}28^0) = 41{,}55 \text{ мм}$$

Прийняте значення $\Delta H_1 = [\Delta H_1]_к$

Необхідне значення F_1:

$$F_1 = F_1 Д_{к1} / Д_{к1} = 1129{,}345 / 0{,}402 = 2806{,}24 \text{ мм}^2$$

Витяжка в проході: $\mu_1 = 3750 / 2806{,}24 = 1{,}336$, що є допустимим для ящичних калібрів [28].

Коефіцієнт обтискання: $(1/\eta)_1 = H_0/H_1 = 62/44 = 1{,}409$.

$A_1 = 402{,}44/44 = 9{,}15$

Відношення осей полоси до проходу: $a_0 = H_0/B_0 = 62/62 = 1{,}0$

Ширина калібру по дну: $B_{Д1} = H_0/ a_3 = 62/ 1{,}05 = 59{,}05$ *мм*

Приймаю ступінь заповнення калібру $\delta_1 = B_1/B_{К1} = 0{,}95$

Приймаю розширення $\Delta B_1 = 7{,}5$ *мм*

Ширина калібру: $B_{К1} = B_1/ \delta_1 = (6{,}2+7{,}5)/0{,}95 = 73$ *мм*

Кут нахилу бокових стінок калібру: $(tg\varphi)_1 = (B_{К1} - B_{Д1})/ H_1 = (73\text{-}59)/44 = 0{,}318$.

Відношення осей калібру: $a_{К1} = B_{К1}/H_1 = 73/44 = 1{,}659$

Коефіцієнт розширення:

$$\beta = 1 + \mathrm{C}_0\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^{\mathrm{C}_1} \cdot \mathrm{A}^{\mathrm{C}_2} \cdot a_0^{\mathrm{C}_3} \cdot a_к^{\mathrm{C}_4} \cdot \delta_0^{\mathrm{C}_5} \cdot \Psi^{\mathrm{C}_6} \cdot tg\varphi^{C_7}$$

$$= 1 + 0{,}0714 \cdot (1{,}109 - 1)^{0{,}862} \cdot 9{,}15^{0{,}746} \cdot 1^{0{,}763} \cdot 1{,}659^0 \cdot 1^0$$

$$\cdot 0{,}6^{0{,}16} \cdot 0{,}318^{0{,}362} = 1{,}113$$

де: $C_0 - C_7$ – постійні коефіцієнти, які приймають чисельні значення в залежності від схеми прокатування [23, табл. 3.6];

Ψ – показник тертя по [23, табл. 3.5];

Ширина полоси6 $B_1 = \beta_1 \cdot B_0 = 1{,}113 \cdot 62 = 69{,}0$ *мм*

Розширення: $\Delta B_1 = 69{,}0 - 62{,}0 = 7{,}0$ *мм*

Ступінь заповнення випуску калібру:

$$\delta_{в1} = \frac{\mathrm{B}_1 - \mathrm{B}_{Д1}}{\mathrm{B}_{К1} - \mathrm{B}_{Д1}} = \frac{69{,}0 - 59{,}0}{73 - 59{,}0} = 0{,}714$$

Площа поперечного перетину полоси без урахування радіуса округлень калібру *r:*

$$F_1^{'} = \left[a_{К1} \cdot \delta_1 - \frac{\delta_{в1}^2 \cdot tg\varphi_1}{2} - 0{,}55 \cdot \left(\frac{r_1}{H_1^2}\right)^2\right] \cdot H_1^2$$

$$= \left[1{,}659 \cdot 0{,}95 - \frac{0{,}714^2 \cdot 0{,}318}{2} - 0{,}55 \cdot \left(\frac{0}{44^2}\right)^2\right] \cdot 44^2$$

$$= 2894{,}3 \text{ мм}^2$$

Значення $(r)_1$ визначаю з вираження:

$$(r)_1 = [(F_1^{'} - F_1)/ 0{,}86]^{-2} = [(2894{,}3\text{-}2806{,}24) / 0{,}86]^{-2} = 10 \text{ мм}$$

Приймаю радіус округлень у бортів $(r_1)_1 = 8$ *мм*

Величина зазору: $t_1 = (0{,}1 - 0{,}3)A_1 = (0{,}1 - 0{,}3) \cdot 0{,}44 = 4{,}4 - 13{,}2$ *мм*

Приймаю $t_1 = 10$ *мм*

2-й прохід (шестикутний калібр)

Приймаю сторону наступного квадрату $C_{К3} = 38{,}5$ *мм*

По [рис. 12] $C_{К3} / H_2 = 1{,}4$.

Приймаю $H_2 = C_{К3} / 1{,}4 = 38{,}5/1{,}4 = 27{,}5$ *мм*

$\Delta H_2 = 44 - 27{,}5 =$ *16,5 мм*

$Д_{К2} = 446 - 27{,}5 \cdot \sqrt{0{,}88} =$ *420,2 мм*

$\vartheta_2 = (3,14 – 0,4202 \cdot 22,32)/ 60 = 0,49$ *м/с*

Приймаю $a_{з1} = 1,05$; $t_{п2} = 1150\ ^0C$

$[\alpha_2] = 100/ (5,99 + 0,266 \cdot 0,491^2 – 1,16 \cdot 1 – 1,9 \cdot 1,05 + 0,42 \cdot 1 + 0,39 \cdot 1,15) =$

$26,4^0$

$$[\Delta H_2]_\alpha = 420,2 \cdot (1 - \cos 26,4^0) = 43,8 \text{ мм};\ [\Delta H_2]_\alpha > \Delta H_2$$

$(1/\eta)_2 = H_1/H_2 = 44/27,5 = 1,6$; $A_2 = 420,2/27,5 = 15,27$; $(a_0)_2 = 44/69 = 0,637$

$\beta_2 = 1+0,0714\ (1,6 – 1)^{0,862} \cdot 15,27^{0,746} \cdot 0,637^{0,763} \cdot 0,6^{0,16} \cdot 1^{0,362} = 1,224$

$B_2 = 1,224 \cdot 69 = 84,5$ *мм*

$\Delta B_2 = 84,5 – 69 = 15,5$ *мм*

Приймаю $\delta_2 = 0,9$

$B_{K2} = 84,5 / 0,9 = 94$*мм*; $(a_{K2}) = 94 / 27,5 = 3,42$.

$F_2 = 809,756 / 0,4202 = 1927$ *мм*^{2}

$$F_2' = [\ (\ (a_{K2}) – 0,5) - 0,5\ (a_{K2})^2 \cdot (1 - \delta_2)^2 \cdot 0,088 \cdot ((r)_2 /H_2)^2] \cdot H_2^2 =$$

$$= [(3,42 – 0,5) – 0,5 \cdot 3,42^2 \cdot (1 – 0,9)^2 – 0,088 \cdot (0/27,5)^2] \cdot 27,5^2 = 2164 \text{ мм}^2$$

$(r)_2 =[(2164 – 1927) / 0,86]^{-2} = 16,6$ *мм*

Рекомендоване значення$(r)_2$:

$(r)_2 = (0,45 – 0,5) \cdot H_2 = (0,45 – 0,5)\ 27,5 = 12,37 – 13,75$

Значення $(r)_2 = 16,6$ *мм* завелике

Приймаю величину стріли прогину $f_{пр2} = 0,5$ *мм*

$(r)_2 = [(2164 – 1927 – (93 – 27,5) \cdot 0,5) / 0,86]^{-2} = 15,4$ *мм*

Приймаю $f_{пр2} = 0,9$ *мм*

$(r)_2 = [(2164 – 1927 – (93 – 27,5) \cdot 0,9) / 0,86]^{-2} = 14,3$ *мм*

Приймаю $(r_1)_2 = 0,8 \cdot 14,0 = 11$ *мм*

$\mu_2 = 2806 / 1927 = 1,45$

$t_2 = 0,3H_2 = 0,3 \cdot 27,5 = 8,2$ *мм*

3-й прохід (квадратний калібр)

Висота калібру по скелету: $H_3 = C_{K3} \cdot \sqrt{2} = 38,5 \cdot \sqrt{2} = 54,4$ *мм*

$(r)_3 = (0,1 – 0,15)H_3 = (0,1 – 0,15) \cdot 54,4 = 5,44 – 8,16$ *мм*

Приймаю $(r)_3 = 7$ *мм*

t_3 = *(0,15 – 0,20)* C_{K3} = *(0,15 – 0,20) · 38,5 = 5,77 – 7,7 мм*

Приймаю t_3 = *7,4 мм*

Ширина калібру по врізу: $B_{вр3} = H_3 - t_3 = 54,4 – 7,4 = 47$ *мм*

Висоту калібру по скелету приймаю *54,4мм*

Висота калібру (полоси): $H'_3 = H_3 – 0,83\ (r)_3 = 54,4 – 0,83 \cdot 7 = 48,6$ *мм*

$(1/\eta)_3 = 84,5 / 48,6 = 1,739;\ A_3 = 401,5 / 48,6 = 8,27;\ (a_0)_3 = 84,5 /27,5 = 3,07$

$\beta_3 = 1 + 0,948\ (1,739 – 1)^{1,203} \cdot 8,27^{0,368} \cdot 3,07^{-0,852} \cdot 0,9^{-3,45} \cdot 0,7^{0,629} = 1,77$

Ширина полоси: $B'_3 = 1,77 \cdot 27,5 = 48,67$ *мм*

Можливо переповнення калібру

Приймаю t_3 = *5,7 мм*

$B_{вр3} = H_3 – t_3 = 54,4 – 5,7 = 48,7$ *мм*

Площа перетину: $F_3 = 0?98 \cdot C_{К3}^2 = 0,98 \cdot 38,5^2 = 1452,6$ *мм*^{2}

$Д_{К3} = 511,447/1452,6 = 0,352$ *м*

$Д_{Н3} = 352 + 54,4\sqrt{0,59} = 394$ *мм*

$\upsilon_3 = (3,14 \cdot 0,394 \cdot 35,48) / 60 = 0,732$ *м/с*

$[\alpha_3] = (100 \cdot R_\alpha) / (13,7 + 0,0092 : \upsilon_3^2 - 0,77 \cdot f_T – 5,1\delta_0 + 0,23M - 3,56 \cdot 10^{-3} \cdot t_{п3}) =$

$= (100 \cdot 1,17)/(13,7 + 0,0092:0,732^2 – 0,77 \cdot 1 – 5,1 \cdot 0,9 + 0,23 \cdot 1 – 3,56 \cdot 1,10) =$

$= 25,11^0$

де: R_α – коефіцієнт, що характеризує збільшення середньостатистичних значень $[\alpha]$.

$[\Delta H_3]_\alpha = 394 \cdot (1 - \cos 25,11^0) = 37,24$ *мм*

ΔH_3 = *84,5 – 48,6 = 35,9 мм;* $[\Delta H_3]_\alpha > \Delta H_3$

$\mu_3 = 1927/1452,6 = 1,327.$

4-й прохід (шестикутний калібр)

Приймаю $C_{K5} = 25$ *мм*

$C_{K5} / H_4 = 1,41$

$H_4 = 25/1,41 = 17,7$ *мм*

$\Delta H_4 = 38,5 – 17,7 = 20,8$ *мм*

$Д_{К4} = 405 – 17,7\sqrt{0,88} = 389,42$ *мм*

$\upsilon_4 = (3,1 \cdot 0,389 \cdot 55,01) / 60 = 1,12$ *м/с*

$[\alpha_4] = (100 \cdot R_\alpha) / (10,3 + 0,00375 \cdot 1,12^2 – 0,653 \cdot 1 – 1,78 \cdot 1,05 + 0,071 \cdot 1 –$

$- 2,22 \cdot 1 \cdot 10^{-3}) = 22,9^0$

$[\Delta H_4]_\alpha = 398 \cdot (1 - \cos 22,9^0) = 30,65$ *мм;* $[\Delta H_4]_\alpha < \Delta H_4$ **стр. 95**

$(1/\eta)_4 = 38,5/17,7 = 2,175;\ A_4 = 389,4/17,7 = 22,0$

Приймаю $\Delta B_4 = 16,5$ *мм:*

$B_{К4} = (38,5 + 16,5)/0,9 = 61$ *мм*

$a_{К4} = 61/17,7 = 3,45$

$\beta_4 = 1 + 2,075(2,175 – 1)^{1,848} \cdot 22^{0,815} \cdot 3,45^{-3,453} \cdot 0,8^{0,659} = 1,416$

$B_4 = 1,416 \cdot 38,5 = 54,53$ *мм*

$\Delta B_4 = 54,53 – 38,5 = 16,03$ *мм*

$B_{К4} = (38,5 + 16,03)/0,9 = 60,6$ *мм*

$a_{К4} = 60,6/17,7 = 3,42$

$F_4^{'} = [(3,42 – 0,5) – 0,5 \cdot 3,42^2\ (1-0,9)^2 – 0,088(0/17,7)^2] \cdot 17,7^2 = 896,5$ *мм*^{2}

$F_4 = 331,189/0,389 = 851,38$ *мм*^{2}*;*

$(r)_4 = [(896,5 – 851,38)/0,86]^2 = 7,2$ *мм*

Приймаю $(r_1)_4 = 7$ *мм*

$\mu_4 = 1452,6/851,38 = 1,7$

Розрахунок формозмінення металу 4-му проході необхідно передивитися у зв’язку з великим значенням $\mu_4 = 1,7$

Приймаю $H_4 = 19$ *мм;*

$\Delta H_4 = 38,5 – 19 = 19,5$ *мм*

$Д_{К4} = 405 – 19\sqrt{0,88} = 387$ *мм*

$(1/\eta)_4 = 38,5/19,5 = 1,97;\ A_4 = 387/19 = 20,36$ *мм;*

$B_{К4} = (38,5 + 16,0)/0,9 = 60,55$ *мм;* $a_{К4} = 60,6/19 = 3,187;$

$\beta_4 = 1 + 2,075(1,97 – 1)^{1,848} \cdot 20,36^{0,815} \cdot 3,187^{-3,453} \cdot 0,8^{0,659} = 1,415$

$B_4 = 1,415 \cdot 38,5 = 54,5$ *мм*

$\Delta B_4 = 54,5 – 38,5 = 16,0$ *мм*

$F_4' = [(3,187 – 0,5) – 0,5 \cdot 3,187^2 (1\text{-}0,9)^2 – 0,088(0/19)^2] \cdot 19^2 = 951$ *мм*^{2}

$F_4 = 331,189/0,387 = 855,78$ *мм*^{2}*;*

$F_4 < F_4'$

Приймаю $(r)_4 = 0,4 \cdot H_4 = 0,4 \cdot 19 = 7,6$ *мм*

Приймаю $(r)_4 = 7$ *мм;* $(r_1)_4 = 6$ *мм,*

Тоді: $F_4 = 951,67 - 0,86 \cdot 7^2 = 909,$ *мм*^{2}*;*

$Д_{К4} = 331,189 / 909,53 = 0,364$ *м*

$Д_{Н4} = 364 + 19\sqrt{0,88} = 382$ *мм*

$\mu_4 = 1452,6 / 909,53 = 1,59$

Приймаю $t_4 = 5,5$ *мм*

Розрахунок формозмінення металу та розмірів калібрів по схемі шестикутник – квадрат в 5, 6, 7-й клітях веду аналогічно. Результати заношу в таблицю 3.3.

1-а проміжна група клітей

Розрахунок в 1-й проміжній групі клітей веду аналогічно розрахунку в чорновій групі клітей, результати заношу в таблицю.

2-а проміжна і чистова група клітей

По [28, рис.65]: $C_{К11} / H_{12} = 1,7;\ B_{К12} / H_{12} = 2,8$

$H_{12} = 10,7 / 1,65 = 6,5$ *мм*

$B_{К12} = 6,5 \cdot 2,8 = 18,2$ *мм*

$\Delta H_{12} = 10,7 – 6,5 = 4,2$ *мм*

$t_{12} = 0,3 \cdot 6,5 \approx 2$ *мм*

$Д_{К12} = 325 – 6,5\sqrt{0,735} = 319,0$ *мм*

$(1/\eta)_{12} = 10,7 \backslash 6,5 = 1,646$

$A_{12} = 319/6,5 = 49,07$

$\beta_{12} = 1 + 0,377 \cdot (1,646 – 1)^{0,507} \cdot 49,07^{0,316} \cdot 2,8^{-0,405} \cdot 0,85^{1,136} = 1,566$

$B_{12} = 1,566 \cdot 10,7 = 16,76$ *мм*

$\Delta B_{12} = 16,76 – 10,7 = 6,06$ *мм*

δ_{12} = *16,76/18,2 = 0,92*

Радіус овалу:

$R_{12} = H_{12}\ (1 + a_{К12}^2) / 4 = 6{,}5\ (1 + 2{,}8^2) / 4 = 14{,}36$ *мм*

$F_{12} = B_{12} \cdot t_{12} + 2/3 B_{12}\ (H_{12} - t_{12}) = 16{,}76 \cdot 2{,}0 + 2/3\ (6{,}5 \cdot 2{,}0) = 83{,}7$ *мм*

$\upsilon_{12} = 984{,}89/63{,}7 = 11{,}77$ *м/с*

$$n_{12} = \frac{6{,}0 \cdot 11{,}77}{3{,}14 \cdot 319 \cdot 10^{-3}} = 704{,}5 \text{ об/хв}$$

μ_{12} = *112,2/83,7 = 1,34*

$[\alpha_2] = (100 \cdot 1{,}3) / (19{,}1 + 0{,}00432 \cdot 11{,}7^2 - 0{,}128 \cdot (14{,}36/6{,}5) - 1{,}03 \cdot 1 +$

$+ 2{,}67 \cdot 1 - 13{,}7 \cdot 1000 \cdot 10^{-3}) = 17{,}9^0$

$[\Delta H_{12}]_\alpha = 319 \cdot (1 - \cos 17{,}9^0) =$ *15,49 мм;*

$[\Delta H_{12}]_\alpha < \Delta H_{12}$

Для отримання чистового та проміжного кругів правильної геометричної форми необхідно визначити розміри предчистових овальних полос.

Розміри овальних полос визначаються в залежності від розмірів чистового круга.

Чистовий калібр для круглої сталі окреслений одним радіусом, не задовольняє вимоги отримання геометрично правильного якісного профілю. В такому калібрі навіть при незначних змінах технологічних умов відбувається переповнення калібру.

Щоб усунити ці недоліки, слід для круга конструювати чистовий калібр з розвалом (випуском) [19].

На безперервному дротовому стані 250 Криворіжського металургійного комбінату прийняли наступний порядок побудови (рис. 3.1):

1) Розміри номінального діаметру катанки в гарячому стані:

$d_{15Г} = 1{,}013 \cdot 8{,}0 = 8{,}1$ *мм;*

$d_{17Г} = 1{,}013 \cdot 6{,}5 = 6{,}58$ *мм;*

2) Проводять вертикальну та горизонтальну осі калібру;

3) Проводять дві допоміжні лінії через центр, під нахилом до горизонтальної осі, що дорівнює 40^0;

4) З центру радіусом, що дорівнює половині діаметру, будують дві дуги (зверху і знизу) до перетину їх з допоміжними лініями; **стр. 99**

5) З точок перетину дуг з допоміжними лініями радіусом R_1 проводять дуги до перетину з лініями роз'єму калібру.

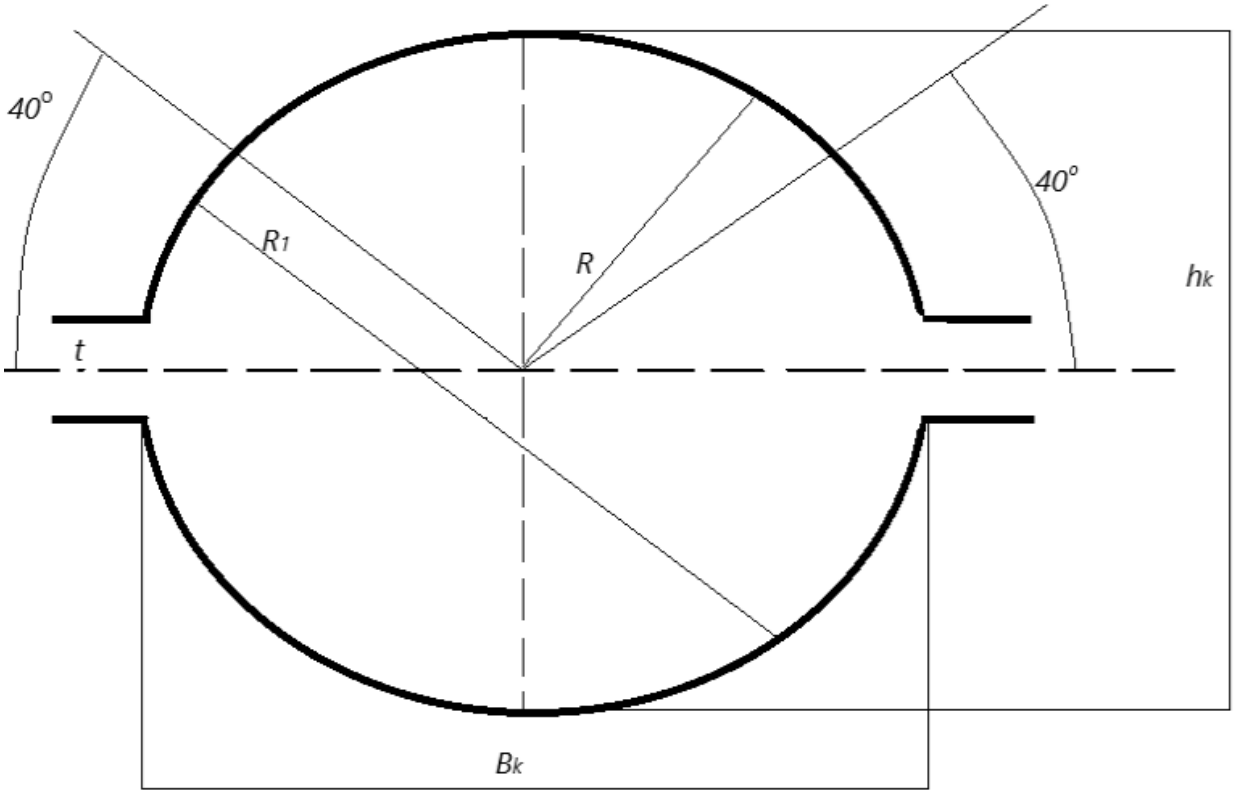


Рисунок 3.1 – Чистовий калібр для круглої сталі, побудований по двох радіусах

Величину зазору *t* приймаю по [19, рис. 63] $t_{15} = 1{,}6$ *мм* ; $t_{17} = 1{,}3$ *мм*.

У встановленій додатковій форсунці охолодженню піддається не рівноосний перетин (овал). У зв'язку з цим найбільш віддалені елементи перетину овальної полоси після 16-го пропуску, найбільше віддалені від геометричного центру, охолоджуються більшою мірою.

Через малість міждеформаційних пауз нерівномірне охолодження приводить до того, що в центрі деформації наступної чистової кліті можуть виникати розриви переохолоджених ділянок металу.

Окрім того, захват валками переднього кінця розкату малого перетину через нерівномірність охолодження утруднений, а у ряду випадків практично неможливий. Це пов'язано з тим, що в момент захвату металу валками найбільш підстужені віддалені дільниці знижуються на менший кут [24].

Відомо використання методу стабілізації розширення. Цей метод базується на дотриманні певного співвідношення між середньою шириною центру деформації $в_{ср}$ до довжини дуги захвату lg. Підтримуючи в ході прокатки це співвідношення в межах певного інтервалу, добиваються того, що показник розширення не залежить від термомеханічних параметрів прокатки і природи матеріалу [24].

У зв'язку з вище сказаним розрахунок розмірів 16-го калібру ведемо за методикою [24] з ціллю визначення можливості існування овальної полоси, що забезпечує певне співвідношення $в_{ср} / lg = 0,65 – 0,85$ при прокатці в чистовому кругу.

$Д_{К17} = 280 – 6,5\sqrt{0,785} = 274,2$ *мм*

Орієнтовно: $\Delta B_{17} = 1,4$ *мм;* $\Delta H_{17} = 11 – 6,5 = 4,5$ *мм*

$B_{16} = 6,5 - 1,4 = 5,1$ *мм* в положенні прокатки

$$\frac{в_{ср}}{lg} = \frac{B_{16} \cdot d_{17}}{2\sqrt{\frac{Д_{К17}}{2} \cdot \Delta H_{17}}} = \frac{5,1 + 6,5}{2\sqrt{\frac{274,2}{2} \cdot 4,5}} = 0,233$$

При даному значенні $Д_{К17}$ розрахунок не є можливим.

Визначаю розміри полоси після16-гопроходу.

$A_{16} = (270 – 5,1\sqrt{0,735})/5,1 = 52,08$

$(1/\eta)_{16} = 8,0/5,1 = 1,48$

$B_{К16} = 11/0,85 = 12,9$ *мм*

$a_{К16} = 12,9/5,1 = 2,5$

$\beta_{16} = 1 + 0,227 \cdot (1,48 - 1)^{1,563} \cdot 52,08^{0,591} \cdot 2,5^{-0,852} \cdot 0,9^{0,587} = 1,39$

$B_{16} = 8,0 \cdot 1,39 = 11,1$ *мм*

$\Delta B_{16} = 11,1 - 8,0 = 3,1$ *мм*

$t_{16} = 0,3 \cdot 5,1 = 1.6$ *мм*

$F_{16} = 11, 1 + 2/3 \cdot 11,1(5,7 - 1,6) = 43,66$ *мм*

$\mu_{16} = 50,26/43,66 = 1,15$

Визначаю розширення в чистовому калібрі за методикою [30]

$\mu_{17} = 43,66 / 33,2 = 1,315$

Радіус овалу, що входить в числовий калібр: **стр. 102**

$R_{16} = [(3,2 \cdot \mu_{17} - 0,714 \ln d_{17}/Д_{Н17} - 3,61)] \cdot d_{17}/2 = (32 \cdot 1,315 - 0,714 \ln 6,5/280 - 3,61) \cdot 6,5/2 = 10,65$ *мм*

$\Delta B_{17} = 2 \cdot (0,293 \cdot d_{17}/2 + R_{16}^2 - 0,5(d_{17}/2)^2 - R_{16}) = 2 / (0,293 (6,5/2) + + \sqrt{10,65^2 - 0,5 \cdot (6,5/2)^2} - 10,65 = 1,4$ *мм*

$d_{17} - 5,1 + 1,4 = 6,5$ *мм*

Визначаю розміри полоси після 14-го проходу.

Приймаю: $\mu_{15} = 1,2$

$R_{14} = (3,2 \cdot 1,2 - 0,714 \cdot \ln 8/270 - 3,61) / 8,0/2 = 11,0$ *мм*

$\Delta B_{15} = 2 (0,293 (8,0/2) + \sqrt{11,0^2 - 0,5 \cdot (8,0/2)^2} - 11,0) = 1,6$ *мм*

$\Delta H_{14} = 8,0 - 1,6 = 6,4$ *мм*

$t_{14} = 0,3 \cdot 6,4 \approx 1,8$ *мм*

$B_{14} = \sqrt{(H_{14} - t_{14}) \cdot (4 \cdot R_{14} - H_{14} + t_{14})} = \sqrt{(6,4 - 1,8) \cdot (4 \cdot 11,0 - 6,4) + 1,8} = 13,5$ *мм*

$F_{14} = 13,46 \cdot 1,8 + 2/3 \cdot 13,5(6,4 - 1,8) = 65,5$ *мм*^{2}

Визначаю розміри полоси після 13-го проходу.

Приймаю: $\mu_{13} = 1,15$; $B_{13} = 9,5$ *мм*

$B_{13}/Д_{Н13} = 9,5/325 = 0,3$

По [24]: $R_{12}/R_{13} = 3,2$

$R_{13} = 19,52/3,2 = 6,1$ *мм*

Параметр $К_{р.о13} = 0,1 + 0,037 (Д_{Н13} / B_{13}) = 0,1 + 0,037 \cdot (0,3)^{-1} = 1,36$

$\Delta B_{15} = 2 \cdot К_{р.о13} \cdot (0,293 \cdot R_{13} + \sqrt{R_{12}^2 - 0,5 \cdot R_{13}^2} - R_{12}) = 2 \cdot 1,36 \cdot (0,293 \cdot 6,1 +$

$+ \sqrt{14{,}36^2 - 0{,}5 \cdot 6{,}1^2} - 14{,}36) = 3{,}05$ *мм*

$B_{13} = 6{,}4 + 3{,}05 = 9{,}45$ *мм*

$F_{13} = 83{,}7/1{,}15 = 76{,}09$ *мм*^{2}

$H_{13} = 76{,}09/ (0{,}75 \cdot 9{,}45) = 10{,}74$ *мм*

При $\delta_{13} = 0{,}95$ ширина калібру: $B_{К13} = 9{,}45/0{,}95 = 9{,}95$ *мм* **стр.103**

Перевіряю заповнення 14-го калібру

$Д_{К14} = 270 - 6{,}4 \sqrt{0{,}735} = 264{,}5$ *мм*

$\Delta H_{14} = 9{,}5 - 6{,}4 = 3{,}1$ *мм*

$\Delta B_{14} = 0{,}35 \cdot \frac{\Delta H_{14}}{H_{13}} \cdot \sqrt{\frac{Д_{К14}}{2} \cdot \Delta H_{14}} = 0{,}35 \cdot (3{,}1/9{,}5) \cdot \sqrt{\frac{264{,}5}{2}} \cdot 3{,}1 = 2{,}3$ *мм*

$B_{14} = 9{,}45 + 2{,}3 = 11{,}75$ *мм*

$\delta_{14} = 11{,}75/13{,}5 = 0{,}87$

$a_{К13} = 9{,}95/10{,}74 = 0{,}926$

Застосування 13-го калібру у формі реберного овалу при $a_{К13} = 0{,}926$ недоцільно. Краще отримувати після 13-го проходу ще один проміжний круг.

По [28] між стороною предовального квадрату і діаметром чистового круга існує залежність: $C_{кв} \approx d$.

Для нашого випадку це коло діаметром *10 – 11 мм*

Приймаю форму 13-го калібру – круг.

Побудова 13-го калібру аналогічна 15 і 17-му калібрам.

Значення, яких не вистачає і які визначають форму калібру знаходжу по формулі, наведеній в [23, табл.3.2].

Результати розрахунків заношу в таблиці 3.2 та 3.3

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків формозмінення металу і швидкісного режиму прокатки катанки діаметром 6,5 мм на ПС-250-1,2 комбінату «Криворіжсталь» зі сталі БСт3кп

Номер проходу	Форма калібру	Розміри полоси, мм			Коефіцієнт витяжки	Обжимання, мм	Розширення, мм	Площа перетину,мм^2	Діаметр валків, мм		Обороти валків, об/хв		Обороти двигуна, об/хв	Швидкість прокатки, м/с	Константа прокатки мм^2 · м/с
		висота	ширина	Сторона квадрата або кола					номінальний	що катає	розрахункові	максимальні			
0		62	62	62	-	-	-	3844	-	-	-	-	-	-	-
1	ящична	44,0	69,0	-	1,33	18,0	7,0	2806	446	402,4	15,91	18,12	530	0,335	942,57
2	шестикут.	27,5	84,6	-	1,45	16,5	15,5	1927	446	420,2	22,32	25,4		0,491	946,34
3	квадрат	48,6	48,67	38,5	1,327	35,9	21,17	1452,6	394	352,0	35,48	40,4		0,732	950,13
4	шестикут.	19,0	34,5	-	1,59	19,5	16,0	909,5	382	364,0	55,65	62,6		1,05	953,93
5	квадрат	35,25	31,6	25,1	1,38	19,25	12,6	617,4	350	322,0	92,05	105,4		1,55	957,75
6	шестикут.	13,0	36,5	-	1,58	11,5	11,0	390,5	350	338,0	139,19	158,8		2,462	961,58
7	квадрат	22,4	21,6	17,2	1,34	14,1	8,6	290,0	345	326,0	195,13	221,4		3,33	965,43
8	шестикут.	9,5	26,0	-	1,22	8,5	8,0	237,3	310	301,0	258,4	372	415	4,07	966,29
9	квадрат	18,2	13,7	13,4	1,34	7,8	4,2	175,9	310	295,0	358,2	508		5,59	973,17
10	шестикут.	8,0	20,72	-	1,27	5,4	6,5	138,5	310	302,5	445,4	600	446	7,05	977,06
11	квадрат	13,2	12,55	10,7	1,23	7,52	4,55	112,2	307	295,0	365,2	760		8,74	980,97
12	овал	6,5	16,76	-	1,34	4,2	6,06	83,7	325	319,0	704,5	900	704,5	11,77	984,89
13	реб. овал	10,75	9,05	-	1,15	5,76	3,05	73,06	310	284,5	900	900	900	12,5	988,83
14	овал	6,4	12,37	-	1,15	4,6	1,37	65,5	270	264,5	1094,9	1650	1501	15,6	992,79
15	круг	8,0	-	8,0	1,2	4,37	1,6	50,16	270	263,7	1440,7	1860	1161	19,83	996,76
16	овал	5,1	11,1	-	1,15	2,9	3,1	43,66	270	265,6	1652,7	2190	1132	22,92	1000,75
17	круг	6,6	-	6,6	1,31	4,5	1,4	33,2	280	274,2	2108,9	2400	1318	30,26	1004,75

Таблиця 3.3 – Розміри та форма калібрів для прокатки катанки діаметром 6,5 мм зі сталі БСт3кп в умовах комбінату «Криворіжсталь» з заготівок 62х62 мм

Номер проходу	Форма калібру	Ширина, мм	Ширина по дну, мм	Ширина по врізу, мм	Висота, мм	Висота по скелету, мм	Стріла прогину, мм	Сторона квадрату або діаметр круга, мм	Радіус округлення по дну, мм	Радіус округлення у бортів, мм	Радіус овалу мм	Зазор, мм	Кут розвалу круглого калібру, рад.
1	ящична	73,0	59,0	69,8	44,0	-	0	-	10	8	-	10	-
2	шестикут.	94,0	66,5	85,8	27,5	-	0,9	-	14	11	-	8,2	-
3	квадрат	54,4	-	48,7	48,6	34,4	-	38,5	7	7	-	5,7	-
4	шестикут.	60,6	41,6	55,1	19,0	-	0	-	7	6	-	5,5	-
5	квадрат	35,75	-	32,25	33,26	35,75	-	25,1	3	3	-	3,0	-
6	шестикут.	42,8	29,8	38,8	13,0	-	0	-	7	7	-	4,0	-
7	квадрат	25,4	-	22,4	22,4	25,4	-	17,2	3,6	3,6	-	3,0	-
8	шестикут.	28,9	19,4	25,9	9,5		0	-	1,5	1,5	-	3,0	-
9	квадрат	18,9	-	16,4	18,2	18,9	-	13,4	3,0	3,0	-	3,5	-
10	шестикут.	22,6	14,6	20,1	8,0	-	0	-	2,0	2,0	-	2,5	-
11	квадрат	15,08	-	13,1	13,2	15,08	-	10,7	2,2	2,2	-	2,0	-
12	овал	18,2	-	16,2	6,5	-	-	-	-	2,0	14,36	2,0	-
13	реб. овал	9,95	-	10,74	10,74	-	-	-	1,5	1,5	5,17	1,5	-
13а	круг	13,05	-	11,37	10,0	-	-	10,0	-	1,5	-	2,0	40
14	овал	13,5	-	11,7	6,4	-	-	-	-	1,5	8,72	1,8	-
15	круг	9,8	-	8,3	8,1	-	-	8,0	-	1,5	-	1,6	40
16	овал	12,9	-	11,3	5,1	-	-	-	-	1,0	9,43	1,6	-
17	круг	8,6	-	7,5	6,6	-	-	6,6	-	1,0	-	1,3	40

Аналіз результатів розрахунку калібрування валів

Чернова група клітей

З точки зору систем калібрів, що використовуються калібрування валів чорнової групи слід вважати раціональною з точки зору розподілення шару, що не містить вуглець. Однак, застосування системи калібрів ящичний-шестикутний вважають нераціональним, тому що відсутня кантування розкату. Щоб уникнути цього явища необхідно застосування на стані парного числа пропусків. Калібрування валків чорнової групи забезпечує інтенсивне обтискання розкату в усіх проходах. Нерівномірне розподілення витягування по проходам визначається не використанням системи калібрів, а передатним відношенням редуктора та необхідністю підтримання константи прокатки.

Проміжні групи клітей

Використання системи калібрів в проміжній групі клітей також відповідає вибраним раніше. Заміна калібру 13-ї кліті з квадратного на вертикальний овал виправдовується малим витягуванням в цьому проході, крім того з’являється можливість прокатки третього проміжного круга. Однак, ефект прискореного охолодження для цього кругу буде значно меншим. Прокатка проводиться з максимально-можливим швидкісним режимом (13-й прохід).

Чистова група клітей

Калібрування дозволяє отримати необхідні розміри чистових кругів

Параметри обладнання не дозволяють застосувати метод стабілізації розширення з відомих способів збільшення стійкості процесу, тому лише залишається застосування в чистовому проході системи калібрів плоский овал – круг.

Застосування цієї системи при співвідношенні ширини овалу до ширини горизонтальної дільниці – 0,3 – 0,4.

Досвід роботи показує, що при застосуванні калібру такого типу при прокатці катанки з’являється дефект «лиска». Для його усунення необхідно робити невеликі виступи на горизонтальній площадці. При застосуванні

прискореного охолодження перед чистовою кліттю це може привести до надмірного охолодження виступів. Калібр форми плоского овалу з виступами показаний на рисунку 3.2.

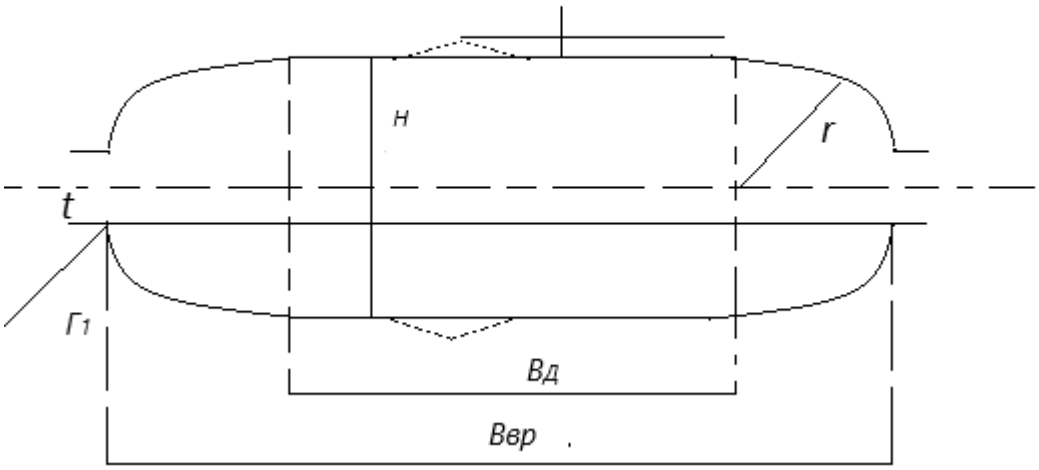


Рисунок 3.2 – Плоский овал з виступами

Висновок до розділу 3

В розділі проведено аналіз калібрування валків безперервних дротових станів 250. Представлено проведений розрахунок калібрування валків для прокатки катанки діаметром 6,5 та 8,0 мм з сталі БСт3кп для вимог дротових станів 250-1,2. За результатами розрахунків представлений розподіл коефіцієнтів витяжки та розрахунок орієнтовного швидкісного режиму прокатки. Проведений вибір систем калібрування і складання схем калібрування, а також розрахунок формозмінення металу і розмірів калібрів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз умов проведення експерименту щодо небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Характеристика умов проведення експерименту щодо небезпечних та шкідливих факторів надана у вигляді таблиці 18

Класифікація небезпечних та шкідливих факторів розглядається у відповідності з [1]

Гранично допустимі значення норм і концентрацій (ГДН та ГДК) розглядається у відповідності з [2] для освітленості виробничих та допоміжних приміщень; для повітря в робочій зоні [3]; для оцінки рівня шуму [4]

.

4.2 Заходи по створенню безпечних умов праці дослідника

Заходи по створенню безпечних умов праці дослідника наведені у таблиці 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Умови проведення експерименту щодо небезпечних та шкідливих факторів

Операція при експерименті	Використання обладнання (місце операції)	Група та підгрупа небезпечних та шкідливих виробничих факторів	ГДК і ГДН	Відповідність нормам
1	2	3	4	5
Маркірування бунтів катанки	Транспортер у моталок	Вироби, що пересуваються; підвищена температура матеріалу та робочої зони. Підвищена рухливість повітря	Освітленість < 200 лк, t > 12 – 17 ^{0}C, відносно вологість 40 – 60%, швидкість вітру 0,3 м/с	не відповідає
Відбір зразків катанки	Ручні ножиці по металу	Непередбачена поведінка катанки	t > 28 ^{0}C	відповідає
Травлення зразків катанки	Лабораторія ХСПКЗ	Хімічно подразнюючі фактори (пари лугів, кислот)	У відповідності з інструкцією по ТБ ХСПКЗ 200 лк	відповідає
Травлення бунтів катанки	Травильні ванни ХСПКЗ	Хімічно подразнюючі фактори (пари лугів, кислот)	У відповідності з інструкцією по ТБ ХСПКЗ	-
Волочіння дроту	Стан-2500	Механізми, що рухаються; підвищені запиленість та рівень шуму; недостатньо природного освітлення; знижена рухливість повітря	t > 12 – 17 ^{0}C; відносна вологість 40%; швидкість руху повітря 0,3 м/с; освітленість 150 лк	не відповідає
Механічні випробування зразків готової катанки	Лабораторія ХСПКЗ	Механізми, що рухаються; не захищені елементи обладнання	освітленість 200 лк	відповідає
Виготовлення мікрошліфів	Шліфувальний верстат	Деталі, що обертаються	-	-

Таблиця 4.2 – Заходи з утворення безпеки праці дослідника

Операція	Заходи з утворення безпеки праці
Маркірування бунтів катанки	Необхідно використовувати захисні окуляри для захисту органів зору та обличчя [5]. У відповідності з [5] необхідно застосовувати спеціальну одежу групи V та виключити можливість її нагріву протягом 10 хв.
Відбір зразків катанки	Необхідно використовувати захисні окуляри для захисту органів зору
Травлення зразків катанки	Умови праці повинні відповідати інструкції по ТБ ХСПКЗ. Умови вентиляції відповідно [3]
Травлення бунтів катанки	Умови праці повинні відповідати інструкції по ТБ ХСПКЗ. Необхідно застосування взуття спеціального призначення з полімерних матеріалів для захисту від кислот групи К по [6]
Волочіння дроту	Необхідно використовувати захисні окуляри для захисту органів зору та обличчя, рук, органів дихання, слуху: захисні рукавиці, беруши, захисні окуляри, шапки [4, 5]. Для захисту від вібрації – взуття групи В [6]
Механічні випробування зразків готової катанки	Умови праці повинні відповідати інструкції по ТБ ХСПКЗ.
Виготовлення мікрошліфів	Згідно [7] перед встановленням абразивний круг оглядатися. Перед встановленням шліфувальні круги повинні бути відбалансовані. Забороняється застосовувати круги з щілинами з простроченим строком зберігання та як що вони не мають відмітки про випробування. Абразивний інструмент та його використання повинно бути огороджене захисним кожухом і міцно закріплено на верстаті.

4.3 Техногенна безпека

Як відмічалося вище в розділі 1.6 технологія прискореного охолодження з використанням води р. Інгулець допомагає зберегти питну воду басейну р. Дніпро.

Так як підведення води до установок прискореного охолодження здійснюється з системи оборотного циклу постачання води на комбінат «Криворіжсталь» і збільшення кількості окалини, що змивається не спостерігається, то додаткових заходів з приводу очищення води не передбачається.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Спираючись на матеріали кваліфікаційної роботи можна зробить наступні висновки:

1) Прискорене охолодження катанки шляхом перерозподілу потоку води неоднозначно впливає на технологічність процесів прокатки та волочіння;

2) Оптимальною температурою змотки бунтів слід рахувати - 760 ^{0}C, тому що вона забезпечує необхідні значення механічних характеристик катанки та дроту, найменший розкид значень $\sigma_в$, найбільш рівномірну структуру по дожині бунта та перетину катанки;

3) Застосування додаткової форсунки гарантує відсутність шару відпущеного мартенситу в катанці, а відповідно зменшує обривання дроту при волочінні;

4) Застосування додаткової форсунки зменшує кількість окалини на готовій катанці, що тягне за собою скорочення часу травлення і зменшує витрати H_2SO_4 в травильних відділеннях волочильних цехів;

5) При недостатньо точному налаштуванні стану може збільшуватися кількість «забурювань» та звалювання розкату при прокатці в чистовій кліті стану;

6) У зв'язку з достатньо малим об'ємом металу, який бере участь в експерименті, необхідно відмітити , що питання прискореного охолодження катанки у середовищі з підвищеним вмістом сілі потребує більш детального вивчення;

7) Розрахунок калібрів валків показав, що схема – характеристика обладнання стану, мають багато недоліків, тому режим обтискань прив'язаний до параметрів обладнання стану, при проєктуванні нових станів необхідно враховувати ці недоліки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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

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

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

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

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

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

2008. 238 с.

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

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

9. Середа Б.П., Кругляк І.В., Бєлоконь Ю.О., Жеребцов О.А. Розробка номограм оптимізації діаметрів валків на багатовалкових станах холодної прокатки. Обработка металлов давлением. 2008. № 1 (19). С. 352.

10. Середа Б.П., Прищип М.Г., Михайлін В.М., Жагров А.С., Бєлоконь Ю.О. Дослідження технологічних мастил за формозміною штаби у процесі холодної прокатки. Металургія. 2013. 1. С. 116-120.

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

12. Ніколаєв В.О., Мазур В. Л. Виробництво плоского прокату : підручник для ВНЗ. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 319 с. : іл.

13. Ніколаєв В.О. Обтискне та сортове виробництво прокату : навч. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 129 с.

14. Ніколаєв В. О. Теорія обробки металів тиском : навч. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 112 с.

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

16. Сологуб М.А. Технологія конструкційних матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 2002. 374 с.

17. Разливка стали. Под общей ред. В.И. Баптизманского. Киев – Донецк: Выща школа, 1977. 200 с.

18. Горбатенко В.П., Лукін О.В., Гріненко Д.В. Вплив контрольованої прокатки та подальшої термічної обробки на структуру та властивості стали 13Г1С–У // Вісник ДонНАБА – 2007.

19. Killmore C. R., Greely H., Phillips A. Development of ultra-thin cast strip products the CASTRIP-process // Materials Forum. 2008. V. 32. P. 12-28.

20. Lindenberg H. U. u. a. Steel Research. 2001. V. 11-12. P. 727-735.

21. Ноговицын А. В., Нурадинов А. С., Гончаров А. Л. и др. Влияние горячей деформации и термической обработки на механические свойства литой ленты из сплава В95 // Материалы 16 (9) Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия – 2020». 6-10 сентября 2020 года. Запорожье, Украина. С.106-107.

22. Данченко В.М., Грінкевич В.О., Головко О.М. Теорія процесів обробки металів тиском : підручник. Дніпропетровськ : Пороги, 2008. 370 с. ISBN 978-966-525-968-8.

23. ДСП 3. 3.1. 038-99. Державні санітарні правила «Підприємств чорної металургії від 1.12.99 № 38

24. ДБН В. 2. 5 – 28 : 2018. Природне і штучне освітлення

25. ДСН 3. 3. 6. 042 – 99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 № 42. Київ

26. ДСН 3. 3. 6. 037 – 99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 № 37. Київ

27. Наказ Мінсоцполітики від 29.11.2018 № 1804 (НПАОП 0.00 – 7.17 – 18)

28. ДСТУ 4409 : 2005. Профілактичне взуття. Наказ Держспоживстандарту України від 30.05.2005 р. № 133.

29. Правила охорони праці під час роботи з абразивним інструментом. Наказ МНС України від 22.10.2012 № 1277.

30. Орнатский Э. А., Анедченко С. Т. Интенсификация процессов прокатки и волочения. Науч. тр./ММИ УССР. Киев: Техніка, 1977. С. 19-21.

31. Мишаков О.П., Карпенко Г.В. Особливості технології процесів прокатки та волочіння. Матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти «Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки». Запорізький національний університет. Запоріжжя : ЗНУ, 2024. С.491.

32. Properties of Silicone Rubber-Based Composites Reinforced with Few-Layer Graphene and Iron Oxide or Titanium Dioxide / Vineet Kumar, Anuj Kumar, Minseok Song, Dong-Joo Lee, Sung-Soo Han, Sang-Shin Park // Polymers. 2021. № 13. P. 1550.