

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та інноваційних технологій

«Допущено до захисту»
Гарант освітньої програми
«Металургія чорних металів»

Христина МАЛІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
за підсумками виконання освітньо-професійної програми
«Металургія чорних металів»
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Оцінка впливу параметрів виробництва сталі на показники
якості гарячого прокату («БТЛС-1680»)»**

Керівник роботи

Максим ШТОДА

Консультант
від бази практики

Максим МЕДКОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Артем ЄРЬОМЕНКО

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя, 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет гірничо-металургійний
Кафедра металургії та інноваційних технологій
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 136 Металургія
ОПП Металургія чорних металів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми
Христина МАЛІЙ
«10» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Єрмоєнко Артем Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Оцінка впливу параметрів виробництва сталі на показники якості гарячого прокату («БТЛС-1680»)

керівник роботи к.т.н., доцент Штода Максим Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету № 41/23.02.2026 від 23.02.2026

2. Термін подання роботи 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Виробничі дані (інформація зібрана під час практики): дані з марки сталі (№ плавки, хімічний склад); параметри нагріву заготовки (температура посадки, тривалість нагріву, температура металу перед станом та по довжині стану); параметри прокатки (режим обтиснень та температурно-швидкісний режим прокатки в чистовій групі, режим натягу штаби між клітьми чистової групи); режими прискореного охолодження; температура змотування; показники якості (розміри, площинність, механічні властивості) по кожній дослідній штабі

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1 Технологічна частина (Характеристика обладнання та технологія виробництва металопродукції на БТЛС-1680 «Запоріжсталь») 2. Дослідна частина (Аналіз результатів досліджень та розробка практичних рекомендацій) 4. Охорона праці та екологія (Аналіз стану охорони праці на ділянці стану) 5. Економічно-організаційна частина (Техніко-економічні показники впровадження основних технічних рішень) Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки

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

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1	к.т.н., доцент Штода Максим Миколайович
2	к.т.н., доцент Штода Максим Миколайович
3	к.т.н., доцент Штода Максим Миколайович
4	к.т.н., доцент Штода Максим Миколайович

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Технологічна частина	11.05 – 13.06.2026
2	Дослідна частина.	11.05 – 13.06.2026
3	Охорона праці та екологія	06 – 13.06.2026
4	Економічно-організаційна частина	06 – 13.06.2026
5	Оформлення пояснювальної записки	13 – 20.06.2026
6	Захист	за графіком

Здобувач

Артем ЄРЬОМЕНКО

Керівник роботи

Максим ШТОДА

АНОТАЦІЯ

Єршоменко А. С. Оцінка впливу параметрів виробництва сталі на показники якості гарячого прокату («БТЛС-1680»). - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 136 Металургія, ОПП «Металургія чорних металів» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виробництва гарячекатаної смуги на стані БТЛС-1680 ПрАТ «Запоріжсталь».

Предмет дослідження – вплив технологічних параметрів (хімічний склад, температурно-деформаційні режими, якість заготовки) на показники якості гарячекатаного прокату.

Мета роботи – оцінити вплив параметрів виробництва сталі на якість гарячекатаного прокату та розробити практичні рекомендації щодо їх оптимізації.

У першому розділі наведено характеристику обладнання та технологію виробництва гарячекатаних смуг на стані БТЛС-1680, проаналізовано фактори, що впливають на якість прокату.

У другому розділі на основі аналізу плавки №1216256 (сталь S235JR, 3,5×1250 мм) виконано розрахунки обтиснення, енергосилових параметрів, швидкості охолодження та поперечного профілю, розроблено рекомендації щодо оптимізації режимів прокатки.

У третьому розділі проаналізовано стан охорони праці на ділянці стану, виявлено перевищення нормативів за температурою, шумом, запиленістю та тепловим випромінюванням, запропоновано заходи захисту.

У четвертому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження рекомендацій, розраховано одноразові витрати (_____ грн) та річний економічний ефект (_____ млн грн/рік).

ГАРЯЧЕКАТАНИЙ ПРОКАТ, БТЛС-1680, ЯКІСТЬ ПРОКАТУ, ОБТИСНЕННЯ, ТЕМПЕРАТУРА ЗМОТУВАННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1.1 Загальна характеристика та призначення стану БТЛС-1680	10
1.1.2 Технічна характеристика стану 1680	11
1.1.3 Склад та компоновка основного технологічного обладнання	11
1.2 Технологічний процес виробництва гарячекатаних смуг на БТЛС-1680.....	16
1.2.1 Підготовка вихідної заготовки – нагрів злитків у нагрівальних колодязях	16
1.2.2 Прокатка на слябінгу та отримання сляба.....	19
1.2.3 Завантаження та нагрів слябів у методичних печах БТЛС-1680.....	20
1.2.4 Режими обтиснення у чорновій групі	20
1.2.5 Проміжна обробка та чистова прокатка.....	21
1.2.6 Охолодження та змотування готової смуги	22
1.2.7 Швидкісні режими прокатки.....	23
1.3 Фактори, що впливають на формування якості гарячекатаного прокату	24
1.3.1 Вплив якості вихідної заготовки (злиток – сляб)	25
1.3.2 Вплив термічних параметрів нагріву слябів у методичних печах.....	26
1.3.3 Вплив температурно-деформаційних параметрів прокатки	26
1.3.4 Вплив точності обладнання та систем автоматизації.....	28
1.3.5 Нормативна база та технічні вимоги до якості продукції	28
2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	31
2.1 Об'єкт, матеріали та методика проведення досліджень.....	31
2.1.1 Характеристика об'єкта дослідження.....	31
2.1.2 Технологічні параметри виробництва дослідної плавки.....	32
2.1.3 Методика дослідження режимів обтиснення.....	33
2.1.4 Методика дослідження впливу температури змотування.....	34

2.1.5	Методика розрахунку енергосилових параметрів прокатки	35
2.1.6	Методика оцінки поперечного профілю	37
2.2	Результати досліджень та їх аналіз	38
2.2.1	Аналіз режимів обтиснення у чорновій групі	38
2.2.2	Аналіз режимів обтиснення у чистовій групі.....	41
2.2.3	Розрахунок енергосилових параметрів прокатки на кліті №10	43
2.2.4	Розрахунок швидкості охолодження та її впливу на структуру металу	47
2.2.5	Розрахунок параметра Зайця та його зв'язок з міцністю	49
2.2.6	Оцінка поперечного профілю готової смуги	51
2.2.7	Аналіз впливу якості вихідних злитків на дефектність прокату	53
2.2.8	Аналіз впливу хімічного складу та режимів обрізу на утворення тріщин у гарячому прокаті	55
2.2.8.1	Вплив неметалевих включень та сірки на утворення тріщин	55
2.2.8.2	Заходи щодо усунення дефектів та їх ефективність.....	56
2.2.8.3	Результати впровадження.....	57
2.3	Розробка практичних рекомендацій.....	58
2.3.1	Рекомендації щодо режимів обтиснення.....	58
2.3.2	Рекомендації щодо температурних режимів	59
2.3.3	Рекомендації щодо контролю якості	59
2.3.4	Рекомендації щодо зменшення впливу дефектів злитків	60
2.4	Оцінка очікуваного ефекту від впровадження рекомендацій	61
3	ОХОРОНА ПРАЦІ	62
3.1	Нормативно-правова база з охорони праці.....	62
3.1.1	Інструктивна база на стані БТЛС-1680	62
3.2	Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	63
3.2.1	Аналіз мікроклімату.....	63
3.2.2	Аналіз складу повітря	64
3.2.3	Аналіз шуму та вібрації.....	65
3.2.4	Аналіз теплового випромінювання.....	65

3.3 Пожежна безпека	66
3.4 Заходи щодо захисту навколишнього середовища	67
3.4.1 Викиди в атмосферу	67
3.4.2 Стічні води.....	67
4 ЕКОНОМІЧНА-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА.....	68
4.1 Техніко-економічне обґрунтування необхідності впровадження заходів	68
4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження та впровадження нових параметрів	69
4.2.1 Класифікація витрат	69
4.2.2 Розрахунок заробітної плати персоналу, задіяного в дослідженні..	69
4.2.3 Розрахунок витрат на навчання персоналу.....	71
4.2.4 Розрахунок витрат на коригування документації	71
4.2.5 Зведений кошторис витрат.....	72
4.3 Оцінка економічної ефективності від покращення якості продукції ...	73
4.3.1 Вихідні дані для розрахунку	73
4.3.2 Розрахунок економічного ефекту від зменшення браку	74
4.3.3 Розрахунок економічного ефекту від зменшення витрат електроенергії	75
4.3.4 Розрахунок сумарного річного економічного ефекту	75
4.4 Розрахунок показників економічної ефективності.....	76
4.4.1 Розрахунок терміну окупності одноразових витрат	76
4.4.2 Розрахунок коефіцієнта економічної ефективності.....	76
4.4.3 Розрахунок річного економічного ефекту на 1 тону продукції	77
4.5 Організаційні заходи щодо впровадження	77
4.6 Зведена таблиця техніко-економічних показників.....	78
ВИСНОВКИ	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	84

ВСТУП

Гарячекатаний прокат є одним з найбільш затребуваних видів металопродукції в Україні та світі. Він використовується в будівельній галузі, машинобудуванні, трубному виробництві та як підкат для холодної прокатки. ПрАТ «Запоріжсталь» є одним з провідних виробників листового прокату в Україні, а безперервний тонколистовий стан гарячої прокатки «БТЛС-1680» забезпечує випуск продукції обсягом 3,6 млн тонн на рік.

В умовах жорсткої конкуренції на внутрішньому та зовнішньому ринках підвищення якості прокату є ключовим фактором конкурентоспроможності підприємства. Якість гарячекатаної смуги визначається комплексом факторів: хімічним складом сталі, температурно-деформаційними параметрами прокатки (обтиснення, температури, швидкості), якістю вихідної заготовки (злиток – сляб), точністю обладнання та систем автоматизації. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах використання традиційної мартенівської технології виплавки сталі та розливки у виливниці, які залишають значний відбиток на чистоті, структурі та геометричних параметрах кінцевого металу.

Таким чином, дослідження впливу параметрів виробництва сталі на показники якості гарячого прокату на стані БТЛС-1680 є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи – оцінити вплив технологічних параметрів виробництва сталі на якість гарячекатаного прокату на стані БТЛС-1680 ПрАТ «Запоріжсталь» та розробити практичні рекомендації щодо їх оптимізації.

Завдання дослідження:

1. Навести характеристику обладнання та технологію виробництва гарячекатаних смуг на стані БТЛС-1680, проаналізувати фактори, що впливають на якість прокату.

2. На основі аналізу реальної плавки №1216256 (сталі S235JR, розмір 3,5×1250 мм) виконати розрахунки обтиснення, коефіцієнтів витяжки, енергосилових параметрів, швидкості охолодження та параметра Зайця.

3. Оцінити поперечний профіль готової смуги та вплив якості вихідних злитків на дефектність прокату.

4. Розробити практичні рекомендації щодо оптимізації режимів обтиснення, температурних режимів та контролю якості.

5. Проаналізувати стан охорони праці на ділянці стану БТЛС-1680 та запропонувати заходи щодо зниження впливу шкідливих факторів.

6. Виконати техніко-економічне обґрунтування впровадження розроблених рекомендацій.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виробництва гарячекатаної смуги на безперервному тонколистовому стані «БТЛС-1680» цеху гарячої прокатки ПрАТ «Запоріжсталь».

Предмет дослідження – вплив хімічного складу сталі, температурно-деформаційних параметрів (обтиснення, температура кінця прокатки, температура змотування) та якості вихідної заготовки на показники якості гарячекатаного прокату (геометрична точність, механічні властивості, стан поверхні).

У роботі використано аналітичний метод (вивчення технологічних інструкцій, стандартів та нормативно-правових актів), розрахунковий метод (розрахунок обтиснення, коефіцієнтів витяжки, енергосилових

параметрів прокатки за методикою А.І. Целікова, швидкості охолодження, параметра Зайця), порівняльний метод (зіставлення фактичних параметрів з нормативними) та метод узагальнення (розробка практичних рекомендацій).

Розроблені рекомендації щодо оптимізації режимів обтиснення (збільшення на клітях «Дуо», №5-№6, №10), температурних режимів (підтримання температури змотування в діапазоні 520-540 °С) та контролю якості можуть бути впроваджені в цеху гарячої прокатки ПрАТ «Запоріжсталь». Економічний ефект від впровадження становить 230,7 млн грн/рік при терміні окупності 3 години.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку джерел посилання. Загальний обсяг роботи становить 85 сторінок, робота містить 25 таблиць, 3 рисунки та 17 найменувань у списку літератури.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1.1 Загальна характеристика та призначення стану БТЛС-1680

Безперервний тонколистовий стан гарячої прокатки «БТЛС-1680» є ключовим агрегатом цеху гарячої прокатки (ЦГП) ПрАТ «Запоріжсталь». Цей високопродуктивний комплекс, введений в експлуатацію у 1938 році та неодноразово модернізований, орієнтований на випуск широкого асортименту гарячекатаної металопродукції. Продукція стану використовується як у будівельній галузі та машинобудуванні, так і слугує заготовкою (підкатом) для подальшого холодного переділу – виробництва холоднокатаного листа та рулонів на стані 1680 холодної прокатки.

Проектна потужність стану становить 3,6 млн тонн на рік. У 2023 році цех гарячої прокатки досяг значних успіхів: завдяки збільшенню стійкості горизонтальних валків об'єм прокату на одній наплавці зріс з 200 до 220 тис. тонн, що дало економічний ефект близько 18 тис. доларів США на рік. Сортова насиченість стану дозволяє виконувати замовлення як для внутрішнього ринку України, так і на експорт – до країн ЄС, Туреччини, Єгипту та Північної Африки.

Основні види готової продукції стану БТЛС-1680:

- гарячекатаний товстий лист (до 120 мм);
- гарячекатаний рулон стандартний (товщиною 1,5-10 мм);
- гарячекатаний рулон з одностороннім черевичним рифленням (специфічний профіль, що підвищує жорсткість металу при збереженні гнучкості);
- підкат для холоднокатаного переділу (товщиною 2,0-3,5 мм).

1.1.2 Технічна характеристика стану 1680

Геометричні параметри смуги (згідно з ГОСТ 19903-94):

- товщина смуги: основний діапазон від 1,5 мм до 10 мм; товстий лист – до 120 мм (для останнього необхідне додаткове налаштування обладнання, оскільки це є нетиповим для стану 1680);
- ширина смуги: від 850 мм до 1520 мм;
- маса рулону: до 15 тонн (на моталках №1-3) та до 7,5 тонн (на моталках №4-6).

Марки сталі, що прокатуються на стані: Ст3кп/пс/сп, 08-20кп/пс, 08Ю, 20, 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, S235JR, S275JR, S355JR, DD11, A36, 30MnB5, SS400, 65Г, DC01 та інші. Для кожної марки розроблено індивідуальний технологічний режим (температура нагріву, обтиснення, температура змотування), який забезпечує отримання необхідного комплексу механічних властивостей.

Для сталей, призначених для подальшого холодного переділу (наприклад, 08Ю або DC01), висуваються підвищені вимоги до якості поверхні та мінімізації різнотовщинності. Допустима різниця товщини кромки для такого підкату не повинна перевищувати 0,05 мм, а телескопічність рулону – 50 мм. Це необхідно для запобігання обриву смуги на високих швидкостях у станах холодної прокатки та забезпечення рівномірної товщини готового холоднокатаного листа.

1.1.3 Склад та компоновка основного технологічного обладнання

Стан 1680 є складним багатоагрегатним комплексом, де кожен елемент виконує чітко визначену функцію. Уся технологічна лінія може

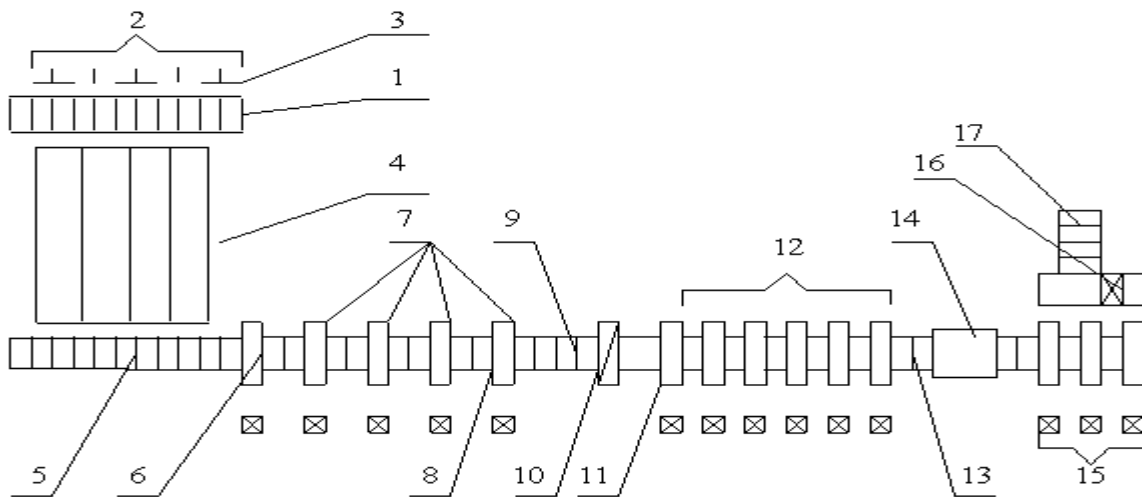
бути умовно поділена на чотири основні зони: нагріву (методичні печі), первинної деформації (чорнова група), вторинної деформації та калібрування (чистова група) і завершальної обробки (душируючий пристрій, моталки).

1. Дільниця нагрівальних печей

Для підготовки вихідних слябів (як гарячого садіння – після слябінгу, так і холодного – зі складу) перед прокаткою на БТЛС-1680 слугують чотири методичні штовхальні печі. Це дворядні, чотиризонні агрегати рекуперативного типу з торцевим садінням та видачею заготовок. Вони забезпечують двостороннє нагрівання слябів до температур, необхідних для формування аустенітної структури металу (діапазон 1060–1120 °С для більшості вуглецевих марок, а для деяких низьколегованих сталей – до 1220–1250 °С).

Схема розташування обладнання на дільниці нагріву та подальшої прокатки включає всі ключові елементи: від завантаження слябів у печі до змотування готового рулону. Подача слябів у нагрівальні печі здійснюється зі складу заготовок через приймальні столи верхнього пічного рольгангу, куди заготовки доставляються електромостовим краном.

Для переміщення слябів усередині печей застосовуються два штовхачі рейкового типу. Кожен із цих потужних механізмів розвиває зусилля до 80 тонн, що дозволяє проштовхувати важкі заготовки (масою до 16 тонн) через усю довжину печі (понад 31 м) без ризику заклинювання або пошкодження футеровки. Після проходження печі сляб видається на нижній пічний рольганг, який транспортує його до чорнового окалиноломача.



1 – рольганг верхній пічний; 2 – штовхачі слябів; 3 – штовхач слябів;
 4 – піч методична; 5 – нижній пічний рольганг; 6 – окалинозламач
 чорновий; 7 – кліті чорнової групи; 8 – кліті вертикальні; 9 – рольганг
 проміжний; 10 – ножиці; 11 – окалинозламач чистовий; 12 – чистова група
 клітей; 13 – рольганг розкатний; 14 – душируючий пристрій; 15 – моталки;
 16 – стіл приймальний; 17 – конвейер відвідний

Рисунок 1.1 – Схема розташування обладнання безперервного тонколистового стану гарячої прокатки 1680

Кожна з чотирьох технологічних зон печі (методична, дві зварні зони та томильна) оснащена незалежною системою контролю й регулювання температури. Контроль температури в зонах печі здійснюється за допомогою термопар W-Re (вольфрам-ренієвих), здатних працювати при температурах до 1600 °С. Вимірювання температури поверхні розкату за кліттю №4 виконується швидкодіючими потенціометрами за імпульсами від фотоелектричного пірометра.

Печі опалюються сумішшю доменного, коксового та природного газів. Керамічні рекуператори загальною площею поверхні нагріву 330 м²

дозволяють підігрівати повітря, що подається на горіння, до температури 450-550 °С. Це дає економію палива 20-25% порівняно з холодним дуттям.

2. Чорнова група клітей

Призначена для первинного обтиснення та формування профілю «розкату». До її складу входять:

- окалиноломатель (кліть «Дуо») – руйнує щільний шар первинної окалини, що утворився під час нагрівання, з максимальним обтисненням до 25%. Руйнування окалини відбувається під дією гідрозбиву високого тиску;
- чотири робочі кліті «кварто» – забезпечують основне обтиснення по товщині (кліті №1-4);
- три вертикальні кліті (еджери) – встановлені між горизонтальними клітями для формування рівної кромки та контрольованого обтиснення по ширині (обтиснення 15-30 мм).

Особливістю конструювання чорнової групи є наявність вертикальних клітей, що дозволяє ефективно контролювати ширину смуги. Вертикальні валки мають діаметр 800-1000 мм. Встановлено, що оптимальне співвідношення обтиснення в горизонтальній кліті до обтиснення у вертикальній має бути 4:1 або 5:1. Це забезпечує формування стабільної ширини без утворення «грибоподібності» кромки.

3. Проміжне обладнання (Coilbox та летючі ножиці)

Coilbox – це проміжний перемотувач, призначений для змотування довгого розкату після чорнової групи в рулон перед його задачею в чистову групу. Технічне значення Coilbox полягає в тому, що цей пристрій дозволяє нівелювати перепад температур по довжині смуги (передній край гарячий, задній – холодніший). Вирівнюючи температурне поле, він забезпечує стабільність процесу прокатки в чистовій групі, зменшує

різновтовщинність на 0,05-0,1 мм та покращує механічні властивості по всій довжині рулону. Сучасна конструкція Coilbox на «Запоріжсталі» здатна обробляти рулони з інтервалом менше 5 секунд.

Летючі ножиці барабанного типу, встановлені перед чистовою групою, призначені для обрізання переднього та заднього кінців смуги, що виходить із чорнової групи. Довжина відрізуваних кінців зазвичай становить 100–300 мм залежно від типорозміру та марки сталі.

4. Чистова група клітей

Чистова група є завершальним деформуючим комплексом стану 1680, де розкат остаточно формується за товщиною, профілем та площинністю перед змотуванням у рулон. До складу чистової групи входять:

- чистовий окалиноламач – система гідрозбиву високого тиску (150–250 атм) для видалення вторинної окалини, що утворилася під час чорнової прокатки;
- шість робочих клітей типу «кварто» (№5–10);
- система гідравлічного протизгину робочих валків на клітях №8–10.

Кліті розташовані послідовно, і смуга проходить через них безперервно (одночасно перебуваючи в декількох клітях). Між клітями встановлені петлетримачі, які регулюють натяг смуги та компенсують неминучі коливання швидкості, пов'язані з нерівномірністю товщини або температури різних ділянок смуги.

На клітях чистової групи (особливо на клітях №8–10) реалізована гідравлічна система протизгину робочих валків – активний засіб впливу на геометрію смуги. Підвищуючи або знижуючи тиск у гідродомкратах (по 4 на кожну кліть), можна створювати додатковий згинальний момент, який деформує робочі валки в напрямку,

протилежному їхньому природному прогину. Це дозволяє усувати хвилі (коробоватість) та лінзоподібність смуги.

5. Хвостова частина стану (моталки та відвідне обладнання)

Після завершення прокатки смуга надходить на пристрої охолодження – душируючий пристрій (система подачі води на верхню та нижню поверхню смуги для регульованого охолодження), а потім на шість моталок. Вони поділені на дві групи за вантажопідйомністю: №1-3 (до 16 тонн) та №4-6 (до 7,5 тонн). Після змотування рулони транспортуються ланцюговими конвеєрами до підйомно-поворотних столів (ППС) для подальшого сортування, маркування та відправлення на склад готової продукції або в листообробне відділення.

1.2 Технологічний процес виробництва гарячекатаних смуг на БТЛС-1680

1.2.1 Підготовка вихідної заготовки – нагрів злитків у нагрівальних колодязях

Хоча безпосередньо на БТЛС-1680 надходять сляби, якість цих слябів значною мірою залежить від попереднього етапу — нагріву злитків у нагрівальних колодязях та їх прокатки на слябінгу. Тому нижче наведено короткий опис цього етапу. Цей етап є критичним для формування якості майбутнього прокату, оскільки саме в колодязях закладається рівномірність температури по перерізу злитка та мінімізується ризик утворення тріщин. Технологічний процес нагріву регламентується інструкцією ТІ 226-П.03-ГЛ-02-22.

Фізичні процеси при нагріві злитків. Нагрів злитків у колодязях – це не просто підвищення температури, а складний фізико-хімічний процес.

При досягненні температури 1000 °С починається інтенсивне окислення заліза з утворенням окалини. Хімічна реакція має вигляд:



Для запобігання надмірному окисленню (утворенню «рванин») важливо підтримувати оптимальне співвідношення газу та повітря (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,0-1,1$):

- якщо $\alpha > 1,2$ – це окислювальна атмосфера, яка призводить до великих втрат металу з окалиною (до 2-3% маси злитка);
- якщо $\alpha < 0,9$ – відновлювальна атмосфера, що може спричинити насичення металу воднем та утворення флокенів (внутрішніх тріщин).

Контроль температури та допустимі відхилення. Різниця показань температури в ячейці на вимірювальних приладах (PMT-59 або потенціометр «Диск-250») та на моніторі оператора не повинна перевищувати 10 °С. На діаграмних стрічках допускаються короткочасні «піки» з перевищенням заданої максимальної температури томління не більше ніж на 10 °С, що пов'язано з інерційністю системи регулювання. Контроль положення шиберів та заслонок газу та повітря здійснюється за допомогою кінцевих вимикачів.

Температура садіння злитків. Температура осередка нагрівального колодязя до моменту садіння злитків повинна становити від 1400 до 1420 °С. Це забезпечує рівномірний початковий прогрів металу та запобігає утворенню термічних напружень. При одночасному надходженні кількох складів зі злитками дозволяється виконувати послідовне садіння двох плавок:

- перша плавка – з часом транспортування до 3 годин;

– друга плавка – з «рідкою серцевиною» (свіжовідлиті злитки, які не встигли повністю закристалізуватися по перерізу).

Після закриття кришки колодязя обов'язково виконується «розігрів під шлаком» протягом 15 хвилин при температурі 1400-1420°C. Це необхідно для того, щоб рідкий шлак на поверхні розплавився та утворив захисну плівку, яка запобігає прямому контакту металу з киснем. Далі виконується власне нагрівання до 1340-1345°C.

Розрахунок часу транспортування та режиму нагріву. Після садіння останнього злитка в осередку та закриття кришки старший нагрівальник розраховує час транспортування як різницю між часом закінчення садіння останнього злитка та часом закінчення розливання плавки. Режим нагріву визначається індивідуально для кожного осередку, залежно від часу транспортування та типу злитка.

Управління процесом нагріву. Підйом температури в осередках здійснюється при витраті газу від 2900 до 3800 м³/год (при теплотворній здатності газової суміші 851–950 ккал/м³). Коефіцієнт надлишку повітря підтримується в діапазоні 1,0–1,35. Розрідження перед шиберам регулюється в межах від 10 до 18 кгс/м², що запобігає вибиванню полум'я через нещільності та підсмоктуванню холодного повітря. Реверс факела (зміна напрямку руху газів) виконується через кожні 5–9 хвилин для рівномірного прогріву по висоті осередку.

Томління та завершення нагріву. Після досягнення в ячійці температури 1340–1345 °C виконується томління злитків тривалістю згідно з нормативною таблицею. Після закінчення часу нагріву виконується закриття заслонок газу, повітря та шибера. Якщо до моменту видачі злитків на замовлений час цеху прокатки залишається 30 хвилин або менше, нагрів триває з томлінням при температурі 1340–1345 °C до моменту видачі.

Дії при перегріві злитків. У разі виявлення перегріву (ознакою є утворення характерних рваних на поверхні злитка при обтисненні до товщини 350–450 мм на слябінгу) злиток повертається в нагрівальний колодязь та разом з рештою злитками плавки відсувається (без подачі палива, шибер закритий) до температури 1260 °С. Після досягнення цієї температури виконується витримка не менше 30 хвилин, потім повторний нагрів до 1320 °С тривалістю 15–30 хвилин, після чого злиток знову видається в прокатку.

1.2.2 Прокатка на слябінгу та отримання сляба

Після завершення нагріву в нагрівальних колодязях злитки надходять на обтиснений стан «Слябінг-1150», де відбувається їх первинна деформація в сляби товщиною 140–200 мм (залежно від кінцевого призначення). Для злитків, що прокатуються за схемою «злиток – сляб» з подальшою прокаткою на БТЛС-1680, товщина сляба після слябінгу становить 150–170 мм.

Процес деформації на слябінгу є критичним для «заварювання» внутрішніх дефектів злитків. Достатнє обтиснення на цьому етапі (сумарний коефіцієнт витяжки 3-5) дозволяє усунути усадочну раковину та мікропористість. Якщо обтиснення недостатньо, ці дефекти переходять у сляб, а потім, при прокатці на БТЛС-1680, витягуються у вигляді «розшарувань» або «плів», що є неприпустимим браком для листового прокату.

1.2.3 Завантаження та нагрів слябів у методичних печах БТЛС-1680

Сляби після слябінгу (або зі складу слябів) надходять на ділянку методичних нагрівальних печей БТЛС-1680. Садінням слябів у печі керує посадник гарячого металу на основі «картки поплавкового посаду», затвердженої ВТК. Він зобов'язаний перевірити геометрію кожної заготовки.

Зони нагріву в методичній печі:

1. Методична зона ($t = 600-900^{\circ}\text{C}$): сляб нагрівається повільно для зняття залишкових напружень. Швидкість нагріву тут не повинна перевищувати $3-4^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ перерізу.

2. Зварні зони ($t = 1200-1350^{\circ}\text{C}$): інтенсивне нагрівання до температури прокатки. Тут важливо досягти рівномірності температури по перерізу сляба, щоб уникнути різнодеформативності при прокатці.

3. Томильна зона ($t = 1240-1290^{\circ}\text{C}$): витримка сляба для вирівнювання температури по довжині та ширині.

Для сталі 08кп при холодному посаді сляба товщиною 168 мм температурний режим становить: у томильній зоні $1240-1290^{\circ}\text{C}$, у першій зварній зоні $1300-1370^{\circ}\text{C}$, час нагріву – 2 години. Для низьколегованих марок (S355, 09Г2С) температура нагріву в томильній зоні може підвищуватися до $1250-1280^{\circ}\text{C}$ для розчинення карбонітридів ніобію та ванадію.

1.2.4 Режими обтиснення у чорновій групі

Після видачі з методичної печі сляб надходить на чорновий окалиноломач (кліть «Дуо»). Типовий режим обтиснення для сталі

марки **S235JR** (плавка №1216256, розмір готової смуги 3,5×1250 мм) наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Режим обтиснення у чорновій групі клітей

Найменування	Дуо	кл. №1	кл. №2	кл. №3	кл. №4
Товщина на вході H_0 , мм	140	120	81	53	35
Товщина на виході H_1 , мм	120	81	53	35	23
Абсолютне обтиснення ΔH , мм	20	39	28	18	12
Відносне обтиснення ε , %	14,3	32,5	34,6	34,0	34,3

*Примітка: «Дані наведено лише для горизонтальних клітей. Обтиснення у вертикальних клітях (еджерах) становить 15-30 мм по ширині».

Аналіз наданого режиму обтиснення. Абсолютне обтиснення у першій кліті чорнової групи (№1) становить 39 мм, що є найбільшим за весь процес. Це виправдано, оскільки при високій температурі (понад 1100°C) метал має найнижчий опір деформації. У подальшому, зі зниженням температури, абсолютні обтиснення зменшуються, щоб уникнути перевантаження обладнання та появи тріщин.

1.2.5 Проміжна обробка та чистова прокатка

Після чорнової групи розкат товщиною 23 мм надходить на проміжне обладнання: летючі ножиці (обрізання «грибоподібних» кінців)

та Coilbox (вирівнювання температури по довжині). Потім виконується чистова прокатка в клітках №5–10.

Для забезпечення нормального безперервного процесу в чистовій групі повинна виконуватись умова сталості секундних об'ємів:

$$V_5 \cdot H_5 = V_6 \cdot H_6 = \dots = V_{10} \cdot H_{10} \quad (1.2.2)$$

де V – швидкість прокатки, H – товщина штаби після відповідної кліти.

Типовий режим обтиснення для сталі S235JR наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Режим обтиснення у чистовій групі клітей

Найменування	кл.№5	кл.№6	кл.№7	кл.№8	кл.№9	кл.№10
Товщина на вході h , мм	23,00	14,20	8,70	6,30	4,70	3,90
Абсолютне обтиснення Δh , мм	8,80	5,50	2,40	1,60	0,80	0,40
Відносне обтиснення ϵ , %	38,26	38,73	27,59	25,40	17,02	10,26

1.2.6 Охолодження та змотування готової смуги

Після виходу з останньої кліти (№10) смуга проходить душируючий пристрій – систему ламінарного охолодження. Система складається з сотень трубок (ванн), розташованих над та під смугою. Вода витікає з них повільно, ламінарним потоком, що дозволяє уникнути утворення парової

«сорочки» навколо струменя та забезпечує рівномірне та ефективне охолодження.

Режим охолодження виконується в ручному режимі шляхом послідовного включення/виключення ванн ламінарного охолодження на першій смузі для підбору оптимального режиму. Регулюючи кількість відкритих ванн, можна змінювати швидкість охолодження від 20 до 200 °С/сек. Це дозволяє отримувати різну структуру металу: від дрібнозернистого фериту (повільне охолодження) до бейніту або мартенситу (швидке охолодження для високоміцних сталей).

Потім смуга надходить на моталки, де формується щільний рулон. Для сталі S235JR температура змотування підтримується в діапазоні 500–540 °С.

1.2.7 Швидкісні режими прокатки

Швидкість прокатки збільшується від кліті до кліті для забезпечення умови сталості секундних об'ємів. Для дослідної плавки №1216256 швидкісні режими наведено в таблиці 1.3.

На основі наведених даних ($362 \text{ м/хв} = 6,03 \text{ м/с}$ для товщини 3,5 мм) можна оцінити продуктивність стану. Для смуги довжиною 300-400 метрів час проходження чистової групи становить лише 50-60 секунд, що вимагає блискавичної роботи систем автоматики та високої кваліфікації персоналу.

Таблиця 1.3 – Швидкісні режими прокатки, м/хв

Чорнова група	Швидкість, м/хв	Чистова група	Швидкість, м/хв
Дуо	43	Окалиноломатель чист.	55
Кліть №1	62,1	Кліть №5	95
Кліть №2	63,2	Кліть №6	148
Кліть №3	100,3	Кліть №7	215
Кліть №4	114	Кліть №8	283
–	–	Кліть №9	339
–	–	Кліть №10	362

1.3 Фактори, що впливають на формування якості гарячекатаного прокату

Якість гарячекатаного прокату є фундаментальною передумовою для подальшої обробки. На БТЛС-1680 формування якості визначається комплексом взаємопов'язаних факторів, які умовно можна поділити на три групи: металургійні (якість вихідної заготовки), термічні (температурні режими нагріву та прокатки) та деформаційні (режими обтиснення і швидкості).

1.3.1 Вплив якості вихідної заготовки (злиток – сляб)

В умовах використання мартенівської технології та розливки у виливниці якість вихідного злитка суттєво впливає на кінцеві властивості прокату. Основними проблемами є:

- підвищений вміст неметалевих включень (оксиди, силікати, сульфіди). При прокатці вони витягуються, утворюючи «смугастість» або стаючи осередками руйнування;
- нерівномірний розподіл сірки та фосфору (сегрегація). Високий вміст сірки (>0,035%) спричиняє червоноламкість, фосфору (>0,035%) – холодноламкість;
- поверхневі дефекти злитків (гарячі тріщини глибиною до 50–60 мм, пояси, недоливи);
- внутрішні дефекти (усадочна раковина, центральна пористість), які при недостатньому обтисненні на слябінгу трансформуються в розшарування смуги.

Якість нагріву злитків безпосередньо впливає на структуру та властивості кінцевого прокату. Основними порушеннями температурного режиму є:

- перегрів – спричиняє оплавлення границь зерен, що призводить до появи тріщин при деформації. Ознакою є утворення «рванин» при обтисненні на слябінгу;
- недогрів (температура нижче 1200 °С) – підвищується опір деформації, зростає ризик поломки обладнання, погіршується якість поверхні;
- нерівномірний нагрів (різниця температур по перерізу понад 40 °С) – призводить до виникнення залишкових напружень та утворення тріщин у центральній зоні.

1.3.2 Вплив термічних параметрів нагріву слябів у методичних печах

При нагріві слябів у методичних печах БТЛС-1680 відбуваються два ключові процеси:

Окислення (утворення окалини). Товщина окалини при температурі 1200 °С та тривалості нагріву 2,5–3 години становить 1,5–2,5 мм. Невидалена окалина призводить до утворення вкатаних дефектів («закатів», «рябизни»), що погіршують зовнішній вигляд прокату та підвищують витрати кислоти при травленні.

Зневуглецювання поверхневого шару. Для низьковуглецевих сталей (08Ю, СтЗкп) глибина зневуглецьованого шару може досягати 0,3–0,5 мм при нагріві вище 1200 °С. Це призводить до зниження твердості та міцності поверхневого шару, що особливо критично для деталей, що працюють на згин та контактну витривалість.

Опір деформації. При зниженні температури прокатки з 1100°С до 850°С опір деформації сталі 08Ю зростає з 80 МПа до 180 МПа. Тому в чистовій групі, де температура падає, зменшуються й обтиснення (з 38% до 10%), щоб не перевантажувати двигуни та валки.

1.3.3 Вплив температурно-деформаційних параметрів прокатки

Температура кінця прокатки (ТКП) є одним з найважливіших параметрів, що визначають структуру та властивості готового прокату:

- ТКП > 900 °С – крупнозерниста структура (розмір феритного зерна 25–40 мкм), низька міцність (межа текучості $\sigma_t \leq 240$ МПа), висока пластичність (відносне подовження $\delta \geq 32\%$).

- ТКП = 850–880 °С – оптимальна структура (зерно 15–25 мкм), $\sigma_T = 260\text{--}320$ МПа, $\delta = 28\text{--}32\%$.
- ТКП < 820 °С – формування смугастої структури (деформація в двофазній області аустеніт+ферит), підвищення міцності (σ_T до 380 МПа) за рахунок зниження пластичності ($\delta \leq 24\%$).

Температура змотування (ТЗ) є найбільш критичним параметром з точки зору формування стабільних механічних властивостей по всій довжині рулону:

- ТЗ = 500–540 °С – підвищена міцність за рахунок дисперсійного зміцнення карбонітридами (застосовується для сталі S235JR та інших низьколегованих марок);
- ТЗ = 570–620 °С – оптимальне співвідношення міцності та пластичності для більшості вуглецевих сталей;
- ТЗ > 650 °С – збільшення розміру зерна фериту (до 30-40 мкм), зниження межі текучості (до 220-260 МПа), але покращення штампованості та холодної деформованості.

Розрахунок параметра Зайця (Z-параметр). Для інженерного опису процесу формування структури використовують параметр Зайця, який поєднує температуру та швидкість деформації:

$$Z = \epsilon' \cdot \exp(Q / (R \cdot T)) \quad (1.3.1)$$

де ϵ' – швидкість деформації,

Q – енергія активації (константа для даної сталі),

R – газова стала,

T – абсолютна температура.

Чим вище Z, тим вища міцність металу після прокатки. Режим, що використовується на стані 1680 (температура кінця прокатки 800-850°С

та середня швидкість 6 м/с), відповідає діапазону значень Z , які забезпечують формування дрібного зерна (розміром 10-15 мкм).

1.3.4 Вплив точності обладнання та систем автоматизації

Стабільність геометричних параметрів гарячекатаної смуги забезпечується комплексом автоматизованих систем:

- система автоматичного регулювання товщини (САРТ) – гідравлічна з використанням гідродомкратів на клітках чистової групи. Датчики: рентгенівські товщиноміри (X-ray gauges) за кліткою №10 та між клітками. Точність підтримання товщини: $\pm 0,03$ мм для діапазону 1,5–3,0 мм.

- система регулювання площинності – використовується на клітках №8–10. Датчики площинності (лазерні або тензометричні) вимірюють розподіл напружень по ширині смуги. Виконавчі механізми: гідравлічні системи протизгину робочих валків (до 250 тс на сторону).

- система регулювання температури змотування – датчики: оптичні пірометри (діапазон 400–1000 °С), встановлені за кліткою №10 та перед моталками. Виконавчі механізми: регулювання витрати води на душируючому пристрої (продуктивність до 3000 м³/год).

1.3.5 Нормативна база та технічні вимоги до якості продукції

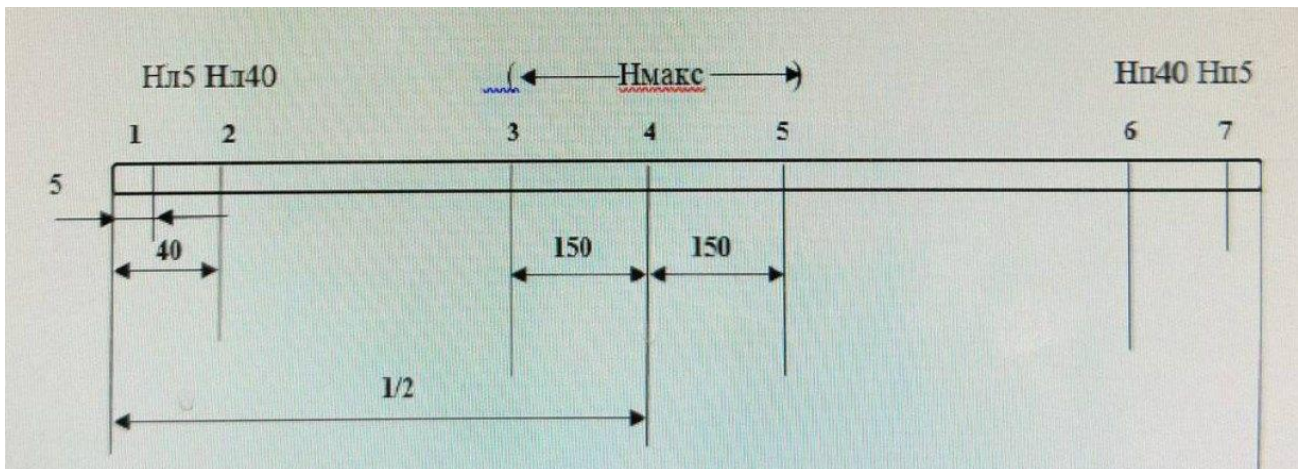
Контроль якості продукції на комбінаті «Запоріжсталь» здійснюється відповідно до низки міждержавних стандартів (ГОСТ), технічних умов (ТУ) та внутрішніх стандартів підприємства. Основними з них є:

- ГОСТ 19903-94 – «Прокат листовий гарячекатаний. Сортамент» (визначає граничні відхилення за розмірами та формою);

- ГОСТ 16523-97 – «Прокат тонколистовий з вуглецевої сталі якісної та звичайної якості»;
- ГОСТ 14637-89 – «Прокат товстолистовий з вуглецевої сталі звичайної якості».

Методика контролю поперечного профілю регламентується ТІ 226-П ОЗ-ГЛ-01-2022. Вимірювання товщини виконується ручним мікрометром у контрольних точках (рисунок 1.2):

- точки 1 та 7: на відстані 5 мм від кромки;
- точки 2 та 6: на відстані 40 мм від кромки;
- точки 3 та 5: на відстані 150 мм від середини смуги;
- точка 4: середина перерізу смуги.



Точки 1; 7 – на відстані 5 мм від кромки; точки 2; 6 – на відстані 40 мм від краю; точки 3; 5 - на відстані 150мм від середини смуги; точка 4 – середина перерізу смуги

Рисунок 1.2 – Схема розташування точок для виконання замірів поперечної різновтовщинності прокату

Розрахункові параметри поперечного профілю:

- Випуклість (різновтовщинність) зліва: $H_{\text{вип.л}} = H_{\text{макс}} - H_{\text{л40}}$
- Випуклість справа: $H_{\text{вип.п}} = H_{\text{макс}} - H_{\text{п40}}$
- Клиновидність профілю: $H_{\text{кл}} = H_{\text{л40}} - H_{\text{п40}}$
- Клиновидність кромки зліва: $H_{\text{кр.л}} = H_{\text{л40}} - H_{\text{л5}}$
- Клиновидність кромки справа: $H_{\text{кр.п}} = H_{\text{п40}} - H_{\text{п5}}$

Основні допустимі відхилення геометричних параметрів наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Допуски на геометричні параметри гарячекатаних смуг

Параметр	Умова / діапазон	Допустиме значення
Відхилення по ширині	Ширина до 1000 мм	+20 мм
Відхилення по ширині	Ширина понад 1000 мм	+30 мм
Телескопічність рулону	Товщина 2,0-2,5 мм	≤ 100 мм
Телескопічність рулону	Товщина 2,6-9,0 мм	≤ 70 мм
Різновтовщинність кромки	біля крайки (5-40 мм)	$\leq 0,10$ мм
Різниця товщини кромки	між лівою та правою крайкою	$\leq 0,06$ мм

2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1 Об'єкт, матеріали та методика проведення досліджень

2.1.1 Характеристика об'єкта дослідження

Для проведення дослідження впливу параметрів виробництва сталі на якість гарячекатаного прокату було обрано гарячекатану смугу зі сталі марки S235JR виробництва цеху гарячої прокатки ПрАТ «Запоріжсталь». Вибір марки обумовлений її широким застосуванням у будівельних конструкціях, машинобудуванні та як підкату для холодної прокатки, а також наявністю повних технологічних даних для аналізу.

Сталь S235JR згідно з ДСТУ EN 10025-2:2022 належить до групи низьковуглецевих сталей звичайної якості. Низький вміст вуглецю (до 0,17%) забезпечує добру зварюваність та пластичність. Відсутність легуючих елементів робить цю сталь чутливою до температурно-деформаційних параметрів прокатки, що робить її зручним об'єктом для дослідження впливу технологічних факторів на якість.

Хімічний склад сталі S235JR згідно з ДСТУ EN 10025-2:2022 наведено в таблиці 2.1 [3].

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі S235JR (нормативний), %

Марка сталі	C	Mn	Si	P	S	N
S235JR	≤ 0,17	≤ 1,40	–	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,012

Таблиця 2.2 – Параметри дослідної плавки №1216256:

Параметр	Значення
Номер плавки	1216256 ЕРУЛ Б/Р
Марка сталі	S235JR
Тип заготовки	сляб після слябінгу
Товщина вихідного сляба	140 мм
Ширина сляба	1250 мм
Товщина готової смуги	3,5 мм
Ширина готової смуги	1250 мм
Тип прокатки	транзитна (без проміжного охолодження)

2.1.2 Технологічні параметри виробництва дослідної плавки

На основі технологічної інструкції ТІ 226-П.03-ГЛ-02-22 та фактичних даних цеху гарячої прокатки було зафіксовано наступні параметри прокатки плавки №1216256. Температурні та швидкісні режими детально описані в п.1.2.7 та п.1.3.3 першого розділу, тому тут вони наведені стисло для використання в розрахунках.

Температурні режими прокатки:

- температура сляба перед БТЛС-1680: 1060–1120 °С;
- температура розкату перед чистовою групою: 1060–1120 °С;
- температура прокатки за останньою кліттю чистової групи: 800–850 °С;

– температура змотування: 500–540 °С.

Режим охолодження: здійснювався в ручному режимі шляхом послідовного включення/виключення ванн ламінарного охолодження на першій смузі для підбору оптимального режиму.

2.1.3 Методика дослідження режимів обтиснення

Для аналізу впливу деформаційних параметрів на якість прокату було виконано порівняння фактичного обтиснення на кожній кліті з нормативними значеннями, встановленими технологічною інструкцією.

Розрахунок відносного обтиснення виконувалося за формулою:

$$\varepsilon = (H_0 - H_1) / H_0 \cdot 100\% \quad (2.1)$$

де H_0 – товщина смуги на вході в кліть, мм;

H_1 – товщина смуги на виході з кліті, мм.

Фізичний зміст відносного обтиснення полягає в тому, що він характеризує інтенсивність деформації металу в осередку деформації. Чим вище відносне обтиснення, тим більше зміцнення металу за рахунок наклепу та тим менша товщина смуги після прокатки. Однак надмірне збільшення обтиснення може призвести до перевантаження обладнання, підвищеного зносу валків та утворення тріщин на поверхні смуги.

Розрахунок коефіцієнта витяжки виконувався за формулою:

$$\mu = H_0 / H_1 \quad (2.2)$$

Коефіцієнт витяжки показує, у скільки разів збільшилась довжина смуги після проходження кліті (за умови сталості ширини та об'єму

металу). Сумарний коефіцієнт витяжки за декілька проходів дорівнює добутку коефіцієнтів витяжки на кожній кліті.

Розрахунок абсолютного обтиснення:

$$\Delta H = H_0 - H_1, \text{ мм} \quad (2.3)$$

2.1.4 Методика дослідження впливу температури змотування

Для оцінки впливу температури змотування на структуру та механічні властивості готової смуги було виконано:

1. Розрахунок швидкості охолодження після виходу з останньої кліті чистової групи за формулою:

$$V_{\text{охол}} = (T_{\text{кп}} - T_{\text{зм}}) / t_{\text{охол}} \quad (2.4)$$

де $T_{\text{кп}}$ – температура кінця прокатки (за кліттю №10), °С;

$T_{\text{зм}}$ – температура змотування, °С;

$t_{\text{охол}}$ – час охолодження смуги на душируючому пристрої, с.

Час охолодження розраховується за формулою:

$$t_{\text{охол}} = L_{\text{душ}} / V_{\text{ср}} \quad (2.5)$$

де $L_{\text{душ}}$ – довжина душируючої секції (ламінарного охолодження), м (за технічною характеристикою стану 1680 становить ≈ 20 м);

$V_{\text{ср}}$ – середня швидкість смуги на ділянці охолодження, м/с.

2. Оцінка очікуваної структури металу залежно від швидкості охолодження на основі термодинамічних діаграм розпаду переохолодженого аустеніту для низьковуглецевих сталей.

2.1.5 Методика розрахунку енергосилових параметрів прокатки

Для оцінки навантаження на обладнання та перевірки відповідності режимів прокатки технологічним можливостям стану виконано розрахунок основних енергосилових параметрів для кліті №10 чистової групи, яка працює в найбільш напружених умовах (найнижча температура, висока швидкість, мале обтиснення).

Розрахунок виконувався за методикою А.І. Целікова, яка враховує основні фактори, що впливають на зусилля прокатки: опір деформації металу, геометрію осередку деформації, коефіцієнт тертя та температурний режим.

Послідовність розрахунку:

1. Визначення опору деформації металу σ_d при заданій температурі прокатки.
2. Розрахунок довжини дуги контакту металу з валком l_d .
3. Визначення коефіцієнта напруженого стану n_σ .
4. Розрахунок середнього контактного тиску $p_{cp} = \sigma_d \cdot n_\sigma$.
5. Розрахунок зусилля прокатки $P = p_{cp} \cdot B \cdot l_d$.
6. Розрахунок моменту прокатки $M = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l_d$.
7. Розрахунок потужності прокатки $N = M \cdot \omega = M \cdot (V / R)$.

Таблиця 2.3 – вихідні дані для розрахунку:

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Товщина на вході в кліть №10	H_0	3,90	мм
Товщина на виході з кліті №10	H_1	3,50	мм
Абсолютне обтиснення на кліті №10	Δh	0,40	мм
Ширина смуги	B	1250	мм
Температура прокатки	T	825 (середнє)	°C
Швидкість прокатки на кліті №10	V	6,03 (362 м/хв)	м/с
Радіус робочого валка кліті №10	R	310	мм
Коефіцієнт тертя (емульсія, гаряча прокатка)	μ	0,27	–
Коефіцієнт плеча прикладеної рівнодіючої	ψ	0,5 (для гарячої прокатки)	–
Опір деформації при 1000 °C (довідково)	σ_0	80	МПа

Примітка: опір деформації $\sigma_0 = 80$ МПа прийнято для низьковуглецевих сталей при температурі 1000 °C на основі експериментальних даних, наведених у довідковій літературі [4, 5].

2.1.6 Методика оцінки поперечного профілю

Контроль поперечного профілю готової смуги виконувався згідно з ТІ 226-П ОЗ-ГЛ-01-2022 (детальний опис методики наведено в п.1.3.5 першого розділу). Вимірювання товщини здійснювалося ручним мікрометром типу МК-125 з точністю $\pm 0,01$ мм у семи контрольних точках по ширині смуги.

Для кожної дослідної плавки виконувалось не менше трьох вимірів (з переднього, середнього та заднього кінців рулону). За результатами вимірювань розраховувались параметри поперечного профілю за формулами (2.6)-(2.10):

- Випуклість (різновтовщинність) зліва:

$$H_{\text{вип.л}} = H_{\text{макс}} - H_{\text{л40}} \quad (2.6)$$

- Випуклість справа:

$$H_{\text{вип.п}} = H_{\text{макс}} - H_{\text{п40}} \quad (2.7)$$

- Клиновидність профілю:

$$H_{\text{кл}} = H_{\text{л40}} - H_{\text{п40}} \quad (2.8)$$

- Клиновидність кромки зліва:

$$H_{\text{кр.л}} = H_{\text{л40}} - H_{\text{л5}} \quad (2.9)$$

- Клиновидність кромки справа:

$$H_{\text{кр.п}} = H_{\text{п40}} - H_{\text{п5}} \quad (2.10)$$

де $H_{\text{макс}}$ – максимальна товщина по перерізу (зазвичай в точці 4 – середина смуги), мм;

$H_{л40}$, $H_{п40}$ – товщина на відстані 40 мм від лівої та правої кромки відповідно, мм;

$H_{л5}$, $H_{п5}$ – товщина на відстані 5 мм від лівої та правої кромки відповідно, мм.

2.2 Результати досліджень та їх аналіз

2.2.1 Аналіз режимів обтиснення у чорновій групі

На основі даних технологічної інструкції та фактичних параметрів прокатки плавки №1216256 проведено порівняльний аналіз відносних обтиснень у чорновій групі клітей. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вихідні дані для розрахунку обтиснення у чорновій групі

2.2.8 Аналіз впливу хімічного складу та режимів обрізу на утворення тріщин у гарячому прокаті

Для поглибленого аналізу впливу якості вихідної заготовки на дефектність готового прокату було проведено порівняльне дослідження двох типів плавки сталі марки S235JR, які прокатувались на стані БТЛС-1680 в однакових режимах (товщина 3,5×1250 мм). Перша група — умовно «контрольна» плавка №1216256 (якість вихідних злитків задовільна), друга група — «проблемна» плавка №1216300 (зафіксовано підвищену кількість дефектів типу «тріщина» в готовому прокаті). Метою аналізу було встановлення кількісного зв'язку між вмістом шкідливих домішок у сталі та виробничими заходами щодо усунення дефектів.

2.3 Розробка практичних рекомендацій

На основі проведеного аналізу плавки №1216256 (сталь S235JR, розмір 3,5×1250 мм) розроблено наступні практичні рекомендації для стану БТЛС-1680.

2.4 Оцінка очікуваного ефекту від впровадження рекомендацій

Впровадження розроблених рекомендацій дозволить досягти наступних результатів.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Нормативно-правова база з охорони праці

Охорона праці — комплекс правових, соціально-економічних, організаційно-технічних та лікувально-профілактичних заходів для збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці.

Нормативну базу України формують:

- Конституція України (ст. 43);
- Закон України «Про охорону праці»;
- Кодекс цивільного захисту України.

3.1.1 Інструктивна база на стані БТЛС-1680

Регламентация безпечних умов праці базується на НПАОП 27.1-1.04-09 «Правила безпеки у прокатному виробництві». Для кожної посади розроблено інструкції з охорони праці.

Таблиця 3.1 – Інструкції з охорони праці

Інструкція	Призначення
№0.01	Загальноцехові вимоги
№05.03	Для працівників з садіння металу
№05.22	Для фахівців з нагріву металу
№05.40	Для вальцювальників
№05.41	Для операторів пультів управління

Усі інструкції мають чотирироздільну структуру: вимоги перед початком роботи, під час роботи, після роботи та дії при аваріях.

3.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Згідно з ГОСТ 12.0.003-74, для стану БТЛС-1680 характерні наступні фактори:

Таблиця 3.2 – Перелік фізичних небезпечних та шкідливих факторів на ділянці стану 1680

Група	Конкретні фактори на стані 1680
Рухомі елементи	Валки (до 6 м/с), шпинделі, муфти, рольганги, моталки
Підвищена температура	Поверхня слябів (до 1200 °С), смуги (до 850 °С)
Теплове випромінювання	Від нагрітих поверхонь (до 603 Вт/м ²)
Підвищений шум	Від двигунів, прокатки, транспортування (до 90 дБА)
Підвищена вібрація	Від обертання валків, роботи редукторів
Запиленість	Пил окалини, оксидів заліза (до 4,76 мг/м ³)

3.2.1 Аналіз мікроклімату

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99, для робіт середньої важкості (категорія ІІб) нормативними є:

- температура повітря: не більше 28 °С;
- відносна вологість: 40-60%;

- швидкість руху повітря: 0,2-0,5 м/с.

Таблиця 3.3 – Фактичні показники в цеху

Параметр	Фактичне значення	Норма	Відповідність
Температура (літо)	до 38 °С	≤ 28 °С	перевищено
Відносна вологість	45-55%	40-60%	відповідає
Швидкість повітря	0,3-0,6 м/с	0,2-0,5 м/с	відповідає

Рекомендовані заходи: встановлення локальних постів кондиціювання, тепловідбивних екранів, повітряне душення, регламентація часу перебування в зоні підвищеної температури.

3.2.2 Аналіз складу повітря

Згідно з ГОСТ 12.1.005-88, фактичні показники вмісту шкідливих речовин наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Фактичний та гранично допустимий вміст шкідливих речовин

Інгредієнт	Фактичне значення, мг/м ³	ГДК, мг/м ³	Перевищення
Пил	4,76	4,0	1,19 рази
SO ₂	6,2	10,0	в межах норми
Оксид марганцю	0,18-0,3	0,3	в межах норми
СО	5,8	20,0	в межах норми

Джерела пилоутворення: вивантаження слябів із печей, робота окалинозламувача, прокатка в клітках. Рекомендується впровадити загальнообмінну витяжну вентиляцію з фільтрацією.

3.2.3 Аналіз шуму та вібрації

Згідно з ДСН 3.3.6.037-99, допустимий рівень шуму становить 80 дБА. Фактичний рівень досягає 90 дБА (перевищення на 10 дБА).

Джерела шуму: двигуни (85-95 дБА), прокатка металу (90-100 дБА), рольганги (80-90 дБА), моталки (85-95 дБА).

Заходи: звукоізоляція обладнання, дистанційне керування, протишумні навушники (зниження на 20-30 дБА).

Згідно з ГОСТ 12.1.012-90, для захисту від вібрації застосовуються окремі фундаменти, амортизатори, віброзахисні рукавиці.

3.2.4 Аналіз теплового випромінювання

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99, допустима інтенсивність теплового опромінення — 140 Вт/м². Фактичне значення — 603 Вт/м² (перевищення в 4,3 рази).

Розрахунок мінімальної безпечної відстані:

$$I = I_0 \cdot (I_0^2 / R^2) \rightarrow R = I_0 \cdot \sqrt{I_0/I} \quad (3.1)$$

При $I_0 = 1$ м, $I_0 = 603$ Вт/м², $I = 140$ Вт/м²:

$R = 1 \cdot \sqrt{(603/140)} = \sqrt{4,31} = 2,08$ м (від джерела)

Заходи захисту: тепловідбивні екрани (зниження до 95%), водяні завіси (зниження на 60-85%), окуляри зі світлофільтрами.

3.3 Пожежна безпека

Згідно з ДСТУ 2272-93, будівля цеху належить до категорії «Г» (помірна пожежна небезпека), приміщення з електроустаткуванням — до класів П-I та П-II.

Основні джерела горючого середовища:

- мастилопроводи (випаровування мастила);
- методичні печі (газова небезпека);
- електрокабелі (займання ізоляції).

Первинні засоби пожежогасіння:

- пожежні щити (відро, лопата, багор, ящик з піском);
- вогнегасники пінні ВПП-10 (2 шт.) – для твердих матеріалів;
- вуглекислотні вогнегасники ВВ-8 (2 шт.) – для електроустановок.

Розрахунок необхідної кількості вогнегасників (НАПБ А.01.001-2014):

$$N = S_{\text{цеху}} / 600 = 12\,000 / 600 = 20 \text{ вогнегасників} \quad (3.2)$$

Час евакуації (ДБН В.1.1-7-2016): при довжині найвіддаленішої точки 60 м та швидкості руху 1,0 м/с,

$$t_{\text{еваку}} = 60/1,0 = 60 \text{ с} = 1 \text{ хв} \text{ (норма } \leq 6 \text{ хв)}.$$

Дії персоналу при пожежі: повідомити майстра, приступити до гасіння, при неможливості — евакуюватися.

3.4 Заходи щодо захисту навколишнього середовища

3.4.1 Викиди в атмосферу

Пил утворюється при подрібненні окалини валками. Через аераційні ліхтарі надходить 2-18 г пилу на тонну прокату. Сумарний викид пилу — близько 200 г/т готового прокату.

Димові гази нагрівальних печей містять CO, CH₄, оксиди азоту.

Заходи: аспіраційні системи (очищення 95-98%), ванадієві каталізатори для очищення від NO_x.

3.4.2 Стічні води

Стічні води складають 30-50% загального обсягу стоків підприємства. Утворюються при охолодженні валків, змиві окалини та мастил.

Застосовується оборотна система водопостачання з тріступеневим очищенням.

Таблиця 3.5 – Ступені очищення оборотної системи водопостачання

Ступінь	Обладнання	Що видаляє
I	Яма для окалини, відстійники, сітчасті фільтри	Крупна окалина (до 95%)
II	Відстійники з гідроциклонами	Дрібна окалина (до 80%)
III	Антрацито-кварцеві фільтри	Нафтопродукти, тонкий пил

4 ЕКОНОМІЧНО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

4.1 Техніко-економічне обґрунтування необхідності впровадження заходів

Гарячекатаний прокат є однією з основних видів продукції ПрАТ «Запоріжсталь». В умовах жорсткої конкуренції на внутрішньому та зовнішньому ринках металургійної продукції, підвищення якості прокату є ключовим фактором забезпечення конкурентоспроможності підприємства.

У попередніх розділах дипломної роботи було виявлено, що фактичні режими обтиснення на стані БТЛС-1680 мають резерв для оптимізації, а показники якості (геометрична точність, стабільність механічних властивостей) можуть бути покращені шляхом коригування технологічних параметрів. На основі проведеного аналізу плавки №1216256 (сталь S235JR, розмір 3,5×1250 мм) розроблено рекомендації щодо:

- збільшення обтиснення на кліті «Дуо» з 14,3% до 18-20%;
- збільшення обтиснення на клітях №5 та №6 чистової групи з 38,3-38,7% до 40-42%;
- підтримання температури змотування в діапазоні 520-540 °С.

Метою даного розділу є оцінка економічної доцільності впровадження цих рекомендацій.

4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження та впровадження нових параметрів

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано оцінку впливу параметрів виробництва сталі на показники якості гарячого прокату на безперервному тонколистовому стані «БТЛС-1680» ПрАТ «Запоріжсталь». На основі проведених досліджень та розрахунків сформульовано наступні основні положення та висновки.

1. Наведено характеристику обладнання та технологію виробництва гарячекатаних смуг на стані БТЛС-1680. Встановлено, що стан є високопродуктивним комплексом потужністю 3,6 млн тонн на рік, здатним випускати смугу товщиною 1,5-10 мм та шириною 850-1520 мм. Проаналізовано основні фактори, що впливають на якість прокату: якість вихідної заготовки (злиток – сляб), термічні параметри нагріву (температура, тривалість, атмосфера в печі), температурно-деформаційні параметри прокатки (температура кінця прокатки, температура змотування, швидкість деформації), точність обладнання та систем автоматизації. Розглянуто нормативну базу (ГОСТ 19903-94, ГОСТ 16523-97, ГОСТ 14637-89) та методику контролю поперечного профілю згідно з ТІ 226-П ОЗ-ГЛ-01-2022.

2. На основі аналізу реальної плавки №1216256 (сталь S235JR, розмір 3,5×1250 мм) проведено порівняльний аналіз фактичних та нормативних обтиснень. У чорновій групі фактичні обтиснення становлять 14,3-34,6%, що на 2,5-5,7% нижче за нормативні. У чистовій групі фактичні обтиснення становлять 10,26-38,73%, що на 4,74-9,60% нижче за нормативні. Розраховано коефіцієнти витяжки: сумарний коефіцієнт витяжки після чорнової групи становить $\mu_{\text{сум}} = 6,09$, після чистової групи – $\mu_{\text{сум}} = 6,52$, загальний коефіцієнт витяжки від сляба до готової смуги – $\mu_{\text{заг}} = 40,0$. Встановлено, що зниження обтиснення є

типовою практикою для забезпечення стабільної площинності та зменшення ризику обриву смуги.

3. Виконано детальний розрахунок енергосилових параметрів прокатки на кліті №10 чистової групи за методикою А.І. Целікова. Отримано наступні значення: опір деформації $\sigma_{\text{д}} = 120$ МПа, довжина дуги контакту $l_{\text{д}} = 11,14$ мм, коефіцієнт напруженого стану $n_{\sigma} = 0,585$, середній контактний тиск $p_{\text{ср}} = 70,2$ МПа, зусилля прокатки $P = 97,7$ тс, момент прокатки $M = 10,9$ кН·м, потужність прокатки $N = 212$ кВт. Отримані значення значно нижчі за максимально допустимі (1500-2000 тс та 6000 кВт), що свідчить про наявність значного резерву для підвищення продуктивності стану.

4. Розраховано швидкість охолодження смуги після прокатки, яка становить 92 °С/с. Визначено, що така швидкість охолодження забезпечує формування дрібнозернистої ферито-перлітної структури з розміром зерна 12-18 мкм. Очікувані механічні властивості сталі S235JR: межа текучості $\sigma_{\text{т}} = 280-320$ МПа, відносне подовження $\delta = 26-30\%$, що відповідає вимогам стандарту ($\sigma_{\text{т}} \geq 235$ МПа, $\delta \geq 24\%$). Розраховано параметр Зайця, який становить $Z = 9,2 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$, що відповідає режиму динамічної рекристалізації та формуванню дрібнозернистої структури.

5. Виконано контроль поперечного профілю готової смуги згідно з ТІ 226-П ОЗ-ГЛ-01-2022. Встановлено, що випуклість профілю становить 0,02-0,03 мм (допуск $\leq 0,10$ мм), клиновидність – 0,01 мм (допуск $\leq 0,06$ мм), кромковий спад – 0,04 мм (допуск $\leq 0,10$ мм). Всі параметри знаходяться в межах допусків згідно з ГОСТ 19903-94. Профіль смуги має позитивну випуклість («лінзу»), що є оптимальним для намотування в рулон та запобігання телескопічності.

6. Проаналізовано вплив якості вихідних злитків на дефектність прокату. Для плавки №1216256 виявлено поодинокі дефекти: пояси на

2 злитках з 12 та підкоркові пузирі на 1 злитку. Виявлені дефекти були усунені на етапах зачистки та обрізання на слябінгу, тому не вплинули на якість готової смуги БТЛС-1680. Встановлено, що якість вихідних злитків є задовільною.

7. Проаналізовано стан охорони праці на ділянці стану БТЛС-1680. Виявлено перевищення нормативних значень: температура повітря в літній період досягає 38 °С при нормі 28 °С (перевищення на 10 °С), рівень шуму становить 90 дБА при нормі 80 дБА, вміст пилу – 4,76 мг/м³ при ГДК 4,0 мг/м³ (перевищення в 1,19 рази), теплове випромінювання – 603 Вт/м² при нормі 140 Вт/м² (перевищення в 4,3 рази). Розраховано мінімальну безпечну відстань від джерела теплового випромінювання ($\approx 2,1$ м) та необхідну кількість вогнегасників (20 шт.). Розроблено рекомендації щодо зниження впливу шкідливих факторів: встановлення локальних постів кондиціонування, тепловідбивних екранів, звукоізоляції обладнання, аспіраційних систем.

8.. Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження розроблених рекомендацій. Розраховано одноразові витрати на впровадження, які становлять _____ грн (включають оплату праці персоналу, навчання та коригування документації). Визначено річний економічний ефект, який складається з ефекту від зменшення браку (_____ грн/рік) та економії електроенергії (_____ грн/рік). Сумарний річний економічний ефект становить _____ грн/рік (\approx _____ млн \$/рік). Розраховано показники ефективності: термін окупності одноразових витрат – 0,11 дня (≈ 3 години), коефіцієнт економічної ефективності – _____ (кожна гривня витрат приносить _____ грн прибутку), питомий ефект на 1 тону продукції – _____ грн/т.

9. Розроблено практичні рекомендації для стану БТЛС-1680: збільшити обтиснення на кліті «Дуо» з _____% до _____%; збільшити

обтиснення на клітях №5 та №6 з _____% до _____%; збільшити обтиснення на кліті №10 з _____% до _____%; підтримувати температуру змотування в діапазоні _____ °С; забезпечити стабільність температури кінця прокатки в діапазоні _____ °С; виконувати контроль поперечного профілю на кожній плавці. Впровадження цих рекомендацій дозволить зменшити брак на _____%, підвищити продуктивність на _____% та отримати значний економічний ефект.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Офіційний сайт ПрАТ «Запоріжсталь». URL: <https://zaporizhstal.com/uk-ua/> (дата звернення: 30.05.2026).
2. Технологічна інструкція «БТЛС-1680» / Цех гарячої прокатки ПрАТ «Запоріжсталь». – Запоріжжя, 2022. – 45 с. (Архів цеху).
3. ДСТУ EN 10025-2:2022 (EN 10025-2:2019, IDT) «Сталі конструкційні гарячекатані з пластичних сталей. Частина 2. Технічні умови постачання конструкційних сталей». – [Чинний від 2022-01-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 15 с.
4. Chichenev N. A. Metal deformation resistance / N. A. Chichenev, S. M. Gorbatyuk // Advanced Welding and Deforming. – 2021.
5. Liang J. L. The Mathematic Model of Deformation Resistance of S50C Medium Carbon Steel in Hot Rolling Process [Електронний ресурс] / J. L. Liang, Y. L. Feng, J. Z. Yin та ін. // [Scientific.Net](https://www.scientific.net). – 2013. – Режим доступу: <https://www.scientific.net/AMR.652-654.2043> (дата звернення: 30.05.2026).
6. Основні дефекти великих сталевих злитків [Електронний ресурс] / Українська асоціація сталеплавильників. – URL: <https://uas.su/books/2011/kslitok/61/razdel61.php> (дата звернення: 30.05.2026).
7. Полухін П. І. Опір деформації металів і сплавів: довідник / П. І. Полухін, Г. Я. Гун, О. М. Галкін. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Москва: Металургія, 1983. – 352 с.
8. Целіков О. І. Теорія прокатки: підручник для вузів / О. І. Целіков, Г. С. Нікітін, С. Є. Рокотян. – Москва: Металургія, 1982. – 335 с.
9. Губкін С. І. Пластична деформація металів: у 3 т. / С. І. Губкін. – Москва: Металургіздат, 1961.
10. Пліскановський С.Т., Проїдак Ю.С., Пономаренко О.І. Теорія металургійних процесів : підручник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2012. 543 с.

11. Наумик В. В., Сажнев В. М., Петруша Ю. П., Василевська Я. А. Ливарне виробництво : підручник. Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. 210 с.
12. .Сучасне дослідження мікроструктури сталі S235JR (2024). Walnik B., Wozniak D., Adamczyk M., et al. Study on the Microstructure and Technological Properties of Clad Plates Made of Steels S235JR and X20Cr13 and S235JR and X5CrNi18-10 after Hot Rolling. *Bulletin of the Institute of Welding*. 2024. Vol. 68, No. 3. DOI: 10.32730/mswt.2024.68.3.1.
13. Оптимізація параметрів для покращення площинності смуги (2025). Shang F., Chen H., et al. Machine learning-based process parameter optimisation and strip plate shape improvement in steel production. *Ironmaking & Steelmaking*. 2025. Vol. 52, No. 8. P. 975–1010.
14. Прогнозування профілю (Crown) для стану гарячої прокатки (2025). A novel spatio-temporal features-aware crown prediction method based on CBAM-ConvGRU for hot strip mill process. *Measurement*. 2025. (ScienceDirect).
15. Дослідження жорсткості клітей чистової групи (2025). Pospelov I.D. Stiffness modulus of stands in finishing group of continuous wide-strip hot rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025. Vol. 68, No. 1. P. 14–20. DOI: 10.17073/0368-0797-2025-1-14-20.
16. Моделювання механічних властивостей та мікроструктури (2025). Wu S., Cao G., et al. Progress in Modelling Microstructural Evolution and Changes of Mechanical Properties for Hot Rolled Steels. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65, No. 8. P. 1061–1077.
17. Вплив параметрів прокатки на дефектність та площинність (2025). Kharlamov I.A., et al. Study of hot-rolled strip parameters and development of conditional quality indicator for flatness control of cold-rolled strips. *Blanking productions in mechanical engineering*. 2025. Vol. 23, No. 11. P. 515–522. DOI: 10.36652/1684-1107-2025-23-11-515-522.