

О.Г. Курпе  
В.В. Кухар

**mip**  
metinvest  
polytechnic

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВ  
ТА КРАЩІ ПРАКТИКИ  
ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ  
ПЛОСКОЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ**

Монографія



ОЛДІ  
ПЛЮС  
══════════

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

**О. Г. Курпе  
В. В. Кухар**

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВ  
ТА КРАЩІ ПРАКТИКИ  
ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ  
ПЛОСКОЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ**

**Монографія**

Одеса • 2025 • Олді+

УДК 621.771.23-048.35:669.018.255  
М74

**Рецензенти:**

**Василь ЄФРЕМЕНКО** – доктор технічних наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро;

**Олександр ШАПОВАЛ** – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, м. Кременчук;

**Едуард ГРИБКОВ** – доктор технічних наук, професор, ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя;

**Владислав ГОРБАТЕНКО** – кандидат технічних наук, заступник генерального директора з розвитку нових продуктів, ТОВ «Метінвест-СМЦ», м. Київ

*Робота друкується за рішенням Вченої ради  
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»  
(протокол № 5 від 30.01.2025 р.)*

**М74 Модернізація** виробництва та кращі практики термомеханічної прокатки плоскої металопродукції : монографія / О. Г. Курпе, В. В. Кухар ; ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка». – Одеса : Олді+, 2025. – 358 с.

ISBN 978-966-289-959-7

У монографії розглянуто сучасні підходи до розробки та впровадження інноваційних технологій у виробництві плоскої металопродукції. Основна увага приділена впровадженню технологій термомеханічної прокатки, які поєднують переваги прокату та термічної обробки для отримання продукції з підвищеними механічними властивостями. Висвітлено кращі практики використання прокатних станів Стеккеля, що забезпечують гнучкість та продуктивність виробничого процесу. Розроблено нові методики моделювання температурно-деформаційних процесів, що дозволяють прогнозувати якість та рівномірність властивостей металопродукції. Особлива увага приділена оптимізації температурних режимів та мікроструктури сталі, що дозволяє досягати високої конкурентоспроможності продукції. Представлено рекомендації щодо впровадження технологій, орієнтованих на зниження енерговитрат і підвищення ефективності виробничих процесів. Монографія буде корисною для здобувачів вищої освіти третього та другого освітнього рівня (в тому числі з науковою складовою), спеціалістам з управління металургійними проєктами і фахівцям-металургам, що займаються удосконаленням технологій прокатного виробництва.

УДК 621.771.23-048.35:669.018.255

ISBN 978-966-289-959-7

© О. Г. Курпе, В. В. Кухар, 2025  
© ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», 2025

# ЗМІСТ

---

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>1 ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ПРОКАТНОГО УСТАТКУВАННЯ НА РІВЕНЬ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ</b> .....	14
1.1 Формування та вдосконалення способу виробництва «Термомеханічна прокатка» .....	14
1.2 Аналіз вимог до виробництва прокату способом термомеханічної прокатки .....	29
1.2.1 Прокат конструкційного призначення .....	29
1.2.2 Прокат для виробництва труб .....	34
1.3 Аналіз рівня устаткування вітчизняних та деяких закордонних станів гарячої прокатки .....	42
1.3.1 Товстолистові стани гарячої прокатки .....	42
1.3.1.1 Стан 3000 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» .....	42
1.3.1.2 Стан 3600 металургійного комбінату «МК «АЗОВСТАЛЬ» .....	48
1.3.1.3 Стан 3200 заводу <i>Trametal, Італія</i> .....	53
1.3.2 Широкоштабові стани гарячої прокатки .....	60
1.3.2.1 Широкоштабовий стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» .....	60
1.3.2.2 Широкоштабовий стан 1680 МК «Запоріжсталь» .....	64
1.3.3 Стан Стеккеля .....	67
1.3.4 Порівняння характеристик станів щодо впровадження технології термомеханічної прокатки .....	71
1.4 Аналіз сучасних тенденцій вдосконалення устаткування прокатних станів, що виробляють продукцію способом термомеханічної прокатки .....	74
1.5 Аналіз етапів розробки технології термомеханічної прокатки .....	79
Висновки до розділу 1 .....	86

<b>2 ВИБІР НАПРЯМКІВ І МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	88
2.1 Систематизація технологічних етапів процесів термомеханічної обробки плоского металопрокату .....	88
2.2 Вибір та описання методів теоретичних досліджень .....	90
2.3 Методика проведення експериментальних лабораторних та промислових досліджень .....	93
Висновки до розділу 2 .....	96
<b>3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШТАБИ ТА ПРОЦЕСІВ РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЛЯ УМОВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ</b> .....	98
3.1 Вдосконалення математичної моделі змінення температурного поля нерівномірно нагрітої штаби, що охолоджується, для умов термомеханічної прокатки .....	98
3.1.1 Отримання вдосконалених залежностей для розрахунку необхідної форми нерівномірного температурного поля методами математичного моделювання .....	98
3.1.2 Отримання залежностей для безперервного розрахунку фізичних та теплофізичних властивостей матеріалу .....	107
3.1.3 Реалізація моделі, оцінка впливу на результати розрахунку вдосконалення математичної моделі .....	113
3.2 Апроксимація діаграм рекристалізації для прогнозування механічних властивостей у залежності від температурно-деформаційних умов прокатки .....	120
3.2.1 Використання програмного забезпечення для розробки технології термомеханічної прокатки .....	120
3.2.2 Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки низьколегованих маловуглецевих марок сталі .....	125
Висновки до розділу 3 .....	132

<b>4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРОКАТКИ МЕТОДАМИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ</b> . . . . .	134
4.1 Проведення експерименту, обробка експериментальних даних . . . . .	134
4.2 Аналіз результатів експерименту, рекомендації по маркам сталі-аналогам . . . . .	138
4.3 Порівняння розрахованих на підставі експерименту даних з фактичними результатами прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» . . . . .	147
Висновки до розділу 4 . . . . .	150
<b>5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ НА СТАНІ СТЕККЕЛЯ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ</b> . . . . .	152
5.1 Математична модель процесу гарячої прокатки . . . . .	152
5.1.1 Модель фізико-механічних властивостей матеріалу, що прокатується, початкові дані . . . . .	152
5.1.2 Обробка результатів розрахунку . . . . .	156
5.2 Результати розрахунку процесу прокатки на стані Стеккеля в середовищі Abaqus CAE . . . . .	158
5.2.1 Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 3170 в середовищі Abaqus CAE . . . . .	158
5.2.2 Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 1780 (Стеккеля) в середовищі Abaqus CAE . . . . .	159
5.3 Аналіз даних по результатах скінченно-елементного моделювання процесу прокатки рулонів на стані Стеккеля . . . . .	174
Висновки до розділу 5 . . . . .	180
<b>6 ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ ТА ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ СПОСОБОМ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ</b> . . . . .	181
6.1 Розробка технології в межах внутрішньої координації між підприємствами однієї компанії . . . . .	181
6.1.1 Розробка технології виробництва листового прокату розмірами $4 \times 3125 \times 16000$ на стані 3200 заводу Trameal, Італія, зі слябу товщиною 220 мм . . . . .	181

6.1.2 Розробка технології виробництва термомеханічного прокату на стані Стеккеля	189
6.1.2.1 Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля	189
6.1.2.2 Перевірка аналітичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу <i>Ferriera Valsider</i>	196
6.1.2.3 Освоєння технології виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу <i>Ferriera Valsider</i>	203
6.2 Освоєння виробництва нового сортаменту на підприємствах України	212
6.2.1 Освоєння виробництва конструкційного прокату способом термомеханічної прокатки	212
6.2.1.1 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S355MC товщиною 6 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»	212
6.2.1.2 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S460MC товщиною 2,5 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»	219
6.2.2 Освоєння виробництва прокату для труб способом термомеханічної прокатки	226
6.2.2.1 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки B товщиною 4,7 мм та 5,7 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»	226
6.2.2.2 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X52M товщиною 8 мм згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»	234
6.2.3 Освоєння виробництва товстолистового прокату зі сталі марки EN36 товщиною 25 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами Правил Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»	244

6.3 Обґрунтування можливості виробництва прокату за технологією термомеханічної прокатки на станах з існуючим рівнем устаткування	253
Висновки до розділу 6	254
<b>7 РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ, ЗАСВОЄННЯ НОВОГО СОРТАМЕНТУ, ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СТРАТЕГІЇ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ В УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ</b>	<b>257</b>
7.1 Оцінка сучасних та перспективних вимог до виробництва прокатної продукції, аналіз додаткових вимог	257
7.2 Розвиток системних підходів до превентивного керування якістю термомеханічного прокату. Методологія керування якістю	268
7.3 Методологія освоєння нового сортаменту	287
7.4 Технологічна стратегія та її реалізація	292
7.4.1 Обґрунтування вибору підприємства для реалізації технологічної стратегії	292
7.4.2 Цільовий сортамент стану 1700 після модернізації, існуючі обмеження	297
7.4.3 Комплекс устаткування, що підлягає модернізації, аналіз вузьких місць, визначення необхідних технічних характеристик	301
7.4.4 Вдосконалення методології аналітичних розрахунків температурного режиму прокатки на широкоштабовому стані з установкою CoilBox	305
7.5 Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 з метою збільшення ваги готових рулонів	313
Висновки до розділу 7	317
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>	<b>320</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b>	<b>325</b>

## ВСТУП

---

В умовах безперервного інноваційного технічного розвитку та глобалізації ринків збуту перед металургійними компаніями, а, отже, і перед безпосередніми виробниками металопрокату стоїть життєво важлива проблема – підвищення ефективності виробництва та забезпечення конкурентоспроможності продукції для відповідності сучасному рівню вимог за якістю. У зв'язку з цим, освоєння виробництва нового конкурентоспроможного сортаменту товстолистового та рулонного прокату, який виробляється за найсучаснішою та найекономнішою, що є на сьогодні, технологією термомеханічної прокатки, при порівнянні співвідношення рівень властивостей / витрати на виробництво, становить комплексну багатофакторну проблему. Актуальність вирішення такої проблеми для нашої країни визначається необхідністю оптимізації та оновлення існуючих технологічних підходів, які тісно пов'язані зі станом, технічним рівнем устаткування та організацією виробництва продукції, що відповідає сучасним світовим вимогам.

Аналіз сучасного стану галузевих проектів показав розширення застосування продукції, виробленої за технологією термомеханічної прокатки (ТМСП), по всіх напрямках. При засвоєнні такої продукції для технологів залишаються нерозв'язаними питаннями щодо можливостей впровадження технології ТМСП з урахуванням складу основного технологічного устаткування, яке не передбачало використання таких процесів та забезпечення підвищених механічних властивостей продукції. Розв'язання вказаних протиріч робить необхідним науково-технологічний розвиток процесів освоєння технології ТМСП на існуючому прокатному устаткуванні.

З літературних джерел та виробничого досвіду відомі механізми впровадження технології ТМСП на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля. Але галузеве засвоєння технології ТМСП стримується через неповноту уявлень про механізми впливу

режимів деформації на механізми еволюції та формування зеренної структури, керування розподілом деформації за товщиною прокату, механізми оцінки та забезпечення рівномірності розподілу температур в металі, що необхідно для забезпечення підвищеного рівня та стабільності розподілу механічних властивостей в прокаті. Відсутність та неповнота таких відомостей обмежує застосування процесів ТМСР у прокатці. Застосування такої технології потребує єдиних підходів до оцінки можливостей різних типів прокатних станів.

Дослідження щодо розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей товстолистових, широкоштабових станів та станів Стеккеля на підставі розвитку наукових основ термомеханічної прокатки і розробки рекомендацій з вдосконалення технологій, що враховують різний конструктивно-структурний склад основного прокатного устаткування пов'язані із розв'язанням наступних задач:

- проведення аналізу проблем, сучасних тенденцій і напрямків розвитку технології термомеханічної прокатки та відповідного устаткування для виробництва товстих листів та штаб в рулонах конструкційного та трубного призначення;

- систематизація технологічних етапів процесів термомеханічної прокатки в залежності від категорії міцності прокату та устаткування, що використовується;

- розвиток методу скінченних різниць щодо моделювання зміни температурного поля підкату, що охолоджується попереду термомеханічної прокатки, для визначення ділянок підстужування і розробка рекомендацій, що забезпечать зменшення градієнту температур по ширині штаби в умовах стану Стеккеля;

- аналіз впливу температурно-деформаційних режимів чорнової прокатки на формування рекристалізованого зерна аустеніту в умовах процесів ТМСР та встановлення закономірностей зміни розміру зерна аустеніту в залежності від ступеня деформації та температури і відповідно зміни опору деформації матеріалу, а також умов отримання якомога більш дрібного розміру зерна для успадкованого формування кінцевих механічних властивостей сталі категорії міцності X65;

– розвиток методу фізичного моделювання для дослідження силових режимів прокатки сталей, що виробляються способом ТМСР, у лабораторних умовах і визначення температурно-деформаційних меж їх застосування;

– вивчення закономірностей впливу температурно-деформаційних умов процесу прокатки на підвищення рівномірності розподілу деформації по товщині підкату;

– рекомендації щодо розробки та впровадження технологічних процесів виробництва товстолистого та штабового прокату підвищеної міцності, що виготовляється термомеханічною прокаткою із урахуванням технічних характеристик та складу основного устаткування;

– розробка рекомендацій для промислового впровадження методологій керування якістю, освоєння нового сортаменту та технологічної стратегії;

– розробка рекомендацій щодо удосконалення режимів роботи основного прокатного та термічного устаткування та формування пропозицій з необхідного складу та характеристик технологічних ліній широкоштабового стану 1700, що модернізується.

Отримані в роботі результати складаються з наступних положень:

Вперше для низьковуглецевої мікролегованої сталі групи міцності Х65, встановлено залежність розміру зерна аустеніту та опору деформації від температурно-деформаційних умов термомеханічної прокатки. Раніше такі залежності для низьковуглецевої сталі групи міцності Х65 відомі не були. Отримано коефіцієнти для розрахунку опору деформації на основі співвідношення Холла – Петча в залежності від розміру зерна аустеніту, який є закономірно зв'язаним зі значеннями одиничних обтиснень при певних температурно-швидкісних умовах. Отримані залежності необхідні для визначення температурно-деформаційних умов, що забезпечують потрібний розмір зерна аустеніту. Встановлені залежності дозволяють корегувати режими прокатки з метою керування структурою та механічними властивостями продукції, що успадковуються.

Вперше встановлено температурно-деформаційні умови прокатки, при яких досягають максимальної рівномірності розподілу деформації по товщині плоского розкату в чорнових проходах.

До цього такі умови були не відомі. Рівномірність деформації визначається запропонованим коефіцієнтом  $K_{нд}$ , який є відношенням мінімального до максимального значення еквівалентної деформації (інтенсивності деформації) в осередку деформації, що розраховані методом скінченних елементів при певних температурах, ступенях та показниках форми осередку деформації (відношення довжини осередку деформації до середньої товщини прокату). Встановлено, що в дослідженому діапазоні температурно-деформаційних умов термомеханічної прокатки, максимальне значення коефіцієнту  $K_{нд}$  не перевищує 0,92 (92 %), тому обтиснення  $\geq 20\%$  забезпечує найкращу рівномірність розподілу деформації по товщині. Це дозволяє забезпечувати умови рівномірного розподілу механічних властивостей у готовому прокаті.

Уточнено закономірності впливу конвекційного теплообміну на розподіл температури по ширині штаби для умов термомеханічної прокатки у широкоштабових та реверсивних станах з пічними моталками. Розробка відрізняється врахуванням конвекційного теплообміну при визначенні розподілу температур у підкаті, отриманого після пічних моталок або пристроїв міжклітьового перемотування на подальший розподіл температури по ширині штаби, розрахований методом елементарних теплових балансів при температурах термомеханічної прокатки. Це дозволяє знизити похибку між методами розрахунку в дослідному діапазоні умов чистової термомеханічної прокатки на 4 %, а також забезпечувати умови рівномірного розподілу механічних властивостей прокату по ширині.

Уточнено закономірності впливу ступеня, швидкості і температури гарячої деформації на опір деформації при термомеханічній прокатці сталі групи міцності X70, що покладені в основу аналітичних моделей для його розрахунку. Розробка відрізняється врахуванням впливу на опір деформації сталі групи міцності X70 властивостей, що успадковані з попередніх технологічних операцій (аустенізація, природне та примусове охолодження перед прокаткою), що визначаються фактором спадковості  $K_n$ , який залежить від значення температури ( $t$ ) деформації  $K_n = 0,1344 \exp^{0,0021t}$ . Уточнення фактору спадковості  $K_n$  дозволяє знизити похибку розрахунку опору деформації з 9 % до 7,4 %. Отримані результати

дозволяють визначати силові та раціональні температуро-деформаційні параметри прокатки.

Уточнено закономірність зміни середньомасової температури металу від умов нагрівання вуглецевих та низьколегованих сталей в пічних моталках станів Стеккеля. Метод відрізняється додатковим врахуванням радіусів барабану моталки та рулону, довжини розкату, швидкості прокатки, що забезпечує зменшення похибки розрахунку температури металу на 11,25 % (з 9,15 % до -2,1 %). Уточнений метод покладений в основу аналітичних моделей для визначення зміни температури підкату в пічних моталках, корегування режимів нагрівання та прокатки з метою керування структурою та механічними властивостями продукції.

Отримали подальший розвиток методологічні засади розробки та вдосконалення технологій виробництва гарячого прокату на товстолистових та штабових станах. Відмінності полягають у систематизації елементів процесів розробки технологій виробництва товстолистого та штабового прокату із встановленням рівнів впливу значень технологічних факторів на показники якості плоскої металопродукції за допомогою їх аналізу і обробки методами Парето, використання правила «трьох сигм» і карт Шухарта, багатофакторного регресійного аналізу даних і впровадження трирівневої системи кольорових маркерів для оцінки стабільності технології (стабільний рівень, рівень який потребує уваги та порушення процесу). Застосування запропонованих елементів дозволяє встановлювати залежний зв'язок між технологічними факторами, складом і конструкційними особливостями технологічних ліній та показниками механічних властивостей плоскої металопродукції, генерувати нові конструктивно-технологічні рішення при розробці та вдосконаленні процесів гарячої прокатки за допомогою комбінації встановлених зв'язків.

Практичне значення роботи сформовано наступними отриманими результатами:

– методика визначення значень технологічних факторів, що впливають на механічні властивості металопродукції, їх роль і механізм корегування;

– аналітичні моделі розрахунку зміни температурних параметрів прокатки для безперервних станів з використанням установок CoilBox та станів Стеккеля з пічними моталками;

– математична модель розрахунку зміни температурного поля штаби при режимах ТМСР, яка охолоджується після пічної моталки на стані Стеккеля та запропоновані рекомендації щодо коригування розподілу температур по ширині штаби;

– рекомендації з вибору температурно-деформаційних умов чорнової термомеханічної прокатки низьковуглецевої мікролегованої сталі 06Г2ДБ (Х65) трубного призначення, які забезпечують отримання якомога меншого успадкованого розміру зерна аустеніту;

– запропоновані схеми обтисень та температурні режими чорнової прокатки конструкційної марки сталі S355JR+AR в умовах стану Стеккеля, що забезпечують зменшення нерівномірності деформації по товщині підкату;

– розроблені режими контрольованого повітряного охолодження рулонного прокату, що забезпечують зниження товщини повітряної окалини, яка утворюється після термомеханічної прокатки;

– рекомендації з розробки та вдосконалення технології термомеханічної прокатки на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля;

– рекомендації з удосконалення проектів реконструкції та модернізації прокатного устаткування широкоштабових станів для забезпечення виробництва термомеханічного прокату підвищеної міцності.

---

# ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ПРОКАТНОГО УСТАТКУВАННЯ НА РІВЕНЬ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ

---

## 1.1 Формування та вдосконалення способу виробництва «Термомеханічна прокатка»

Великий перелік світових стандартів з виробництва прокату дозволяє виробляти схожу продукцію різноманітними способами, такими, як класична гаряча прокатка, нормалізувальна прокатка, термомеханічна прокатка (ТМСР), або із застосуванням термічної обробки. Але боротьба за собівартість, конкуренція та вимоги до якості продукції встановлюють чіткі пріоритети щодо термомеханічного способу виробництва прокату.

Наразі вже не виникає сумнівів щодо оптимального співвідношення комплексу механічних властивостей та собівартості прокатої продукції, яка виробляється способом ТМСР.

Процес термомеханічної прокатки отримав розвиток з процесу контрольованої прокатки. Методом ТМСР виробляють дрібнозернисту сталь, шляхом поєднання хімічного складу і сукупності способів контролю процесів виготовлення, починаючи від нагрівання сляба до охолодження після прокатки в певних для кожного хімічного складу діапазонах температур, забезпечуючи, таким чином, необхідний комплекс властивостей.

Відомо, що технологія отримання прокату способом ТМСР має певні переваги в порівнянні з технологією «класичної» контрольованої прокатки і звичайно ж технологією термічної обробки, в тому числі:

– найкраща зварюваність, за рахунок забезпечення комплексу властивостей, при більш низькому вуглецевому еквіваленті;

- висока міцність у поєднанні з високою пластичністю;
- енергозбереження за рахунок більш низьких температур нагрівання металу під прокатку, більш високих температур чистої прокатки і застосуванням прискореного охолодження.

Безумовною перевагою цієї технології є більш високі споживчі властивості продукції, що одержана, це неодноразово підкреслювалося багатьма дослідженнями.

Завдяки низці суттєвих переваг, технологія термомеханічної прокатки отримала поширення на виробництво майже усіх видів прокату. Внаслідок цього споживачі отримали продукцію, яка відповідає сучасним вимогам з якості, а виробники отримали додаткову можливість знизити собівартість продукції, тим самим зберегти, а в деяких випадках і суттєво підвищити свою конкурентоспроможність. Важливим фактором для підвищення вітчизняної конкурентоспроможності металопродукції на Європейських ринках є навіть вимоги до умов роботи на підприємствах – виробниках металопродукату [1, 2].

Розробка та подальше поширення технології термомеханічної прокатки у світі почалось з 60-х років минулого сторіччя [3]. В нашій країні впровадження цієї технології почалося з виробництва товстолистового прокату на 10 років пізніше [4]. З того часу технологія ТМСП набула розвитку, суттєві зміни також відбулися і у відповідному устаткуванні [5–17]. Зараз цей спосіб виробництва є таким, що постійно розвивається та поширюється на різні види прокату.

Великий вплив на розвиток, становлення та сучасне сприйняття технології термомеханічної прокатки у світі надали роботи таких вчених як E. O. Holl (University of Sheffield, England); N. J. Petch (University of Leeds, England); M. Л. Бернштейн, В. О. Займовский (MICiC); В. І. Погоржельський, Ю. І. Матросов, Ю. Д. Морозов, Л. І. Ефрон (ЦНДІЧормет імені І. П. Бардіна); E. Orowan, A. J. DeArdo (University Pittsburg, USA); J. M. Gray (Microalloying Steel Institute, USA); L. J. Cuddy (Pennsylvania State University, USA); C. Ouchi (Tohoku University, Japan); S. Okaguchi, T. Hashimoto (Sumitomo Metal Industries, Japan); K. Hulka, F. Heisterkamp

(Niobium Products Company GmbH, Germany); H.Brandis (Thyssen Edelstahlwerke AG, Germany); L. E. Collins (IPSCO, Canada) та інші.

Наразі, способом ТМСР поширено виробляється товстолистовий та рулонний прокат для конструювання, будівництва, вироблення посудин під тиском, для виробництва трубопроводів, дослідження якого наведено у багатьох працях авторів з різних країн світу [3, 5–7, 18–36].

Раніше, процес ТМСР переважно був поширений на виробництво прокату з низьковуглецевих марок сталі [25, 26], але в останній час поширилось вивчення термомеханічного процесу із застосуванням сталей з вмістом вуглецю до 0,40% [37]. Вивчення та впровадження сталей з вмістом вуглецю від 0,06% та нижче отримало подальшого розвитку одночасно з поглибленим дослідженням процесів зміцнення та отриманням додаткових властивостей [20, 22, 27, 38, 39]. Дослідження впливу різноманітних швидкостей охолодження при реалізації процесу ТМСР на структуру та властивості прокату становлять окрему цікавість [23, 40] та підтверджують ефект суттєвого підвищення властивостей при збільшенні швидкості прискореного охолодження.

Відомо, що великий вплив на отримання кінцевих механічних властивостей при термомеханічній прокатці з прискореним охолодженням має дотримання необхідної технологічної температури прокату перед початком аустенітного перетворення, а також мінімізація коливань температури по ширині та довжині прокату [18–20, 41, 42].

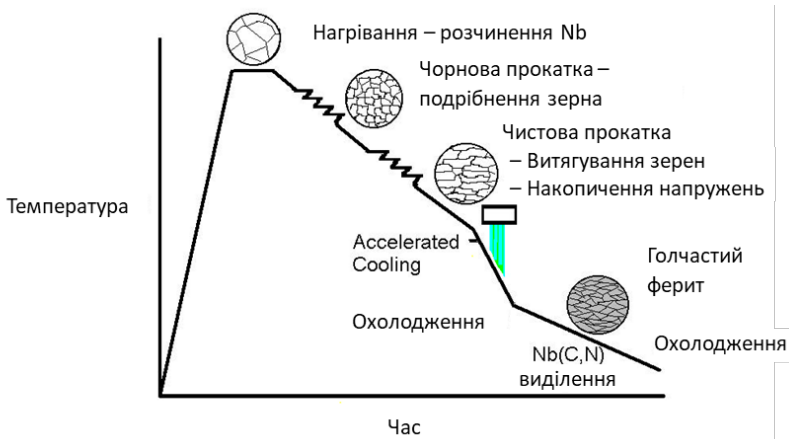
Якщо дозволяє устаткування, то сучасний рівень технології забезпечує виробництво прокату з границею плинності до та понад 800 МПа, але нові більш високі рівні властивостей становлять і нові проблеми, які потребують подальшого вивчення, серед яких питання стабільності механічних властивостей та необхідної мікроструктури [23, 24, 26, 27, 29, 30, 32]. Великий перелік наукових праць свідчить, що для засвоєння технології виробництва продукції способом ТМСР треба виконати низку цілеспрямованих досліджень з метою підтвердження можливостей технології, устаткування та отримання відповідної якості, згідно з вимогами стандартів та споживачів [43–49].

З розвитком обчислювальної техніки набули поширення дослідження, що виконуються різноманітними методами математичного моделювання [50–68]. Слід зазначити, що багато робіт виконана на базі методу скінченних елементів [52–56]. Ці методи дозволяють поглибити існуючі знання про фізичні процеси обробки металів тиском та розробити превентивні методи впливу на кінцевий результат. Тенденція з розширення досліджень процесів обробки металів тиском шляхом математичного моделювання, замість існуючих аналітичних залежностей, у більшості випадків є науковою тенденцією, що відкриває нові можливості для проектування устаткування та освоєння технологій нового рівня. Вивчення технології ТМСП методами математичного моделювання дозволяє отримати більше важелів для її тонкого керування. Але, запропоновані авторами моделі мають різний рівень похибок. Так, наприклад, в роботі [69] похибка визначена у силі прокатки та становить в середньому 142 т. Слід відмітити, що вказана похибка залежить від рівня сили прокатки, що можна побачити на графіках, які наведені у роботі [69]. Похибка при моделюванні, вказана авторами в роботі [70], складає  $\pm 10\%$ , а в роботі [71] похибка складає до  $15,6\%$  у першому проході і далі знижується. Таким чином, немає чітких рекомендації щодо точності розроблених моделей, але безумовно метою усіх авторів є її підвищення. У роботі [55] автори пропонують застосовувати розроблену модель для проектування технології контрольованої або термомеханічної прокатки [56], так як вона враховує термофізичні та структурні параметри. При цьому авторами не вказаний рівень похибки, який дозволяє отримати ця модель. Особу цікавість становить запропонована авторами [72] модель, яка враховує анізотропність металу в процесі прокатки, у той час як ця особливість іншими авторами не вказана або не враховується. В роботі [73] похибка складає менш ніж  $8\%$ . Таким чином, різний рівень похибок у авторів дає можливість диференційовано використовувати запропоновані моделі для розрахунку більш або менш чутливих до них способів виробництва.

Наявність перевіреної моделі для розробки технології прокатки на будь якому стані суттєво спрощує цей процес, зменшує технологічні похибки та зменшує ризик отримання продукції незадовільної якості. Ще одна перевага – це можливість оптимізації процесу [53, 74, 75].

Однак, що є одностайним, так це використання моделей з найменшою похибкою для проектування технології контрольованої або термомеханічної прокатки, як вказано в роботах [55, 56]. Слід зазначити, що більшість математичних та аналітичних моделей, які розробляються інжиніринговими підприємствами та перевірені на діючому устаткуванні, мають обмежений доступ.

У загальному вигляді, схема процесу термомеханічної прокатки, що запропонована автором роботи [76], виглядає наступним чином, рис. 1.1.



**Рисунок 1.1** – Схема термомеханічного процесу прокатки у загальному вигляді [76]

Водночас, з розробкою технології та поглибленим вивченням її впливу на нові властивості прокату, отримав поширення напрямок прогнозування результатів впровадження технології через моделювання розвитку мікроструктури та механічних властивостей [18, 19, 25, 77, 78].

Але технологія ТМСП не є тією, що не змінюється, вона адаптується в залежності від типу прокатного стану, переліку устаткування, що використовується, та відповідного сортаменту, який виробляється.

Якщо розглядати загалом технологію ТМСР, то вона мала свої етапи розвитку. З технології контрольованої прокатки або низькотемпературної контрольованої прокатки, контрольованої прокатки з додатковим охолодженням до термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням минули декілька десятиліть [79]. Якщо порівнювати всі ці варіанти технології, які, доречі, і зараз ще поширено використовуються виробниками прокату, безумовно, наразі, перевага буде на боці сучасної технології ТМСР з прискореним охолодженням [80–82].

Посеред багатьох наукових праць з впровадження технології ТМСР загальним питанням лишається комбінування цілей і рівня механічних властивостей сортаменту, який треба освоїти, з технічними можливостями існуючого устаткування [83, 84]. При цьому слід враховувати оптимальну комбінацію між хімічним складом сталі, можливостями технології та отриманим рівнем характеристик міцності прокату, щоб не отримати занадто дорогий кінцевий продукт.

Розглянемо поточний стан досліджень та основні напрямки розвитку технології ТМСР по видах прокату та прокатних станів.

На товстолистових станах поглиблено досліджується як сама комплексна технологія термомеханічної прокатки, так і впровадження її окремих етапів.

Прискорене охолодження після прокатки є одним з основних етапів технології, а тому, вивчення впливу швидкості та температури переривання охолодження є переважним напрямком багатьох досліджень [85], в комплексі з дослідженнями впливу температур прокатки на станах [86, 87]. Гарним прикладом є дослідження процесів прокатки, прискореного охолодження, мікроструктури та механічних властивостей плит (товстолистого прокату) товщиною до 60 мм [88, 89]. Також поширено досліджується вплив різноманітних комплексів хімічного складу сталі на властивості товстолистого прокату [90–94], на підставі яких надалі формуються вимоги до технології обробки та необхідні особливі характеристики устаткування для прискореного охолодження [95–97]. Одна з цих характеристик є швидкість, яку повинна забезпечити установка прискореного охолодження, і яка змінюється в залежності

від вимог та сортаменту від 10 °C/с до 40 °C/с, а для плит, або для досягнення високоміцних категорій в сталі необхідна підвищена швидкість яка дорівнює 100 °C/с.

На сьогодні згідно з класифікацією американського інституту нафти API SPECIFICATION 5L, в залежності від вимог, для виробництва труб поширено застосовуються марки сталей від В, Х42 до Х120 (або їхні аналоги). Також відомі і поширені аналоги, наприклад, по стандартах ISO, та по інших стандартах з різними вимогами до зварювального шву та його якості [98]. Сучасні дослідження спрямовані на поглиблене вивчення та поширене впровадження таких сталей категорій міцності, як Х70, Х80, Х100, Х120 [23, 24, 99–106]. Особливе місце займають дослідження технології виробництва прокату категорій міцності Х90 та Х100 [103, 107].

Але потреба в менш міцних марках також залишається. Газо-нафтотранспортні об'єкти, які були побудовані раніше, потребують ремонту, також будуються невеликі ділянки для транспортування відносно малих об'ємів продуктів. Тому і на сьогодні питання виробництва марок сталі типу В, Х42, Х56 є актуальним.

У якості подальшого розвитку технології ТМСР при виробництві товстолистового прокату можна розглядати дослідження процесів проміжного охолодження чорнових підкатів в товщинах 60–180 мм [108], у тому числі з трубних марок сталі [109]. Цей напрямок вдосконалення технології набув розвитку тільки в останні декілька років при виробництві прокату підвищених категорій міцності, наприклад типу Х90 згідно зі стандартом API-5L. Наразі, цей спосіб вже підтвердив свої переваги в мікроструктурі металу, механічних властивостях, особливо при випробуваннях на ударну в'язкість KV. Так, в прокаті товщиною 19,6 мм з марки сталі Х90 при виробництві з проміжним охолодженням підкату, значення випробування KV склало 499 Дж в порівнянні з класичною технологією ТМСР, тобто без проміжного охолодження, значення KV склало 261 Дж [107]. Таким чином ударна в'язкість є майже вдвічі вищою.

При безсумнівно великому переліку переваг технології ТМСР, при виробництві високоміцних марок сталі з границею плинності більше ніж 690 МПа [110] та судносталі підвищеної міцності типу ЕН36, відзначається наявність підвищених напружень, в порівнянні

з технологією виробництва термічною обробкою «загартуванням та відпуск», які проявляють себе при подальшій обробці прокату, зварюванні. Такі залишкові напруження можуть викликати утворення дефектів типу «розриви» зварених швів. Тому замовникам та переробникам необхідно враховувати цей стан прокату та корегувати технологію обробки цих сталей [107, 111].

Окремими напрямком розглядаються процеси оптимізації технології та можливості виробництва тонколистового прокату на товстолистових станах. Особливе значення при оптимізації технологічних процесів має врахування параметрів устаткування, що також відмічене авторами роботи [74], та дозволяє на етапі проектування керувати часом та температурою в комплексі з товщиною прокату, у тому числі в двофазній області, та зменшувати кількість проходів, як наведено авторами [53]. Окрему цікавість в роботі [53] становить режим прокатки при отриманні листа розмірами  $5 \times 3200$  мм зі сляба 150 мм, при розрахунку якого виконана оптимізація зі зменшенням кількості проходів з 15 до 13, що дало змогу підвищити температуру закінчення прокатки з  $713$  °С до  $821$  °С. Слід зазначити, що вказаний в існуючих літературних джерелах сортамент та способи оптимізації його виробництва є унікальними для кожного виробника з урахуванням характеристик устаткування, яке застосовується.

Вивчення термомеханічних процесів, що відбуваються на безперервних станах гарячої прокатки, є не менш поширеними [112, 113].

Одною з існуючих особливостей безперервних станів є велика довжина штаби, що обробляється. В залежності від товщини та можливостей устаткування, довжина штаби може сягати 1000 м, або більше. Вздовж всієї довжини штаби необхідно забезпечити рівномірність температури при охолодженні з перепадом не більше ніж  $20\text{--}30$  °С, для цього використовуються сучасні математичні моделі [114–118], за допомогою яких здійснюють керування установками прискореного охолодження. Безумовно, важливо щоб штаба вже поступала на охолодження з мінімальним розподілом температур. Для цього на сучасних безперервних станах для виготовлення нескінченних полос застосовуються декілька проміжних перемотувальний пристроїв, встановлених між чорною та чистою групами [119].

Моделювання температурного режиму гарячої прокатки широко досліджено авторами робіт [120–131]. Запропоновані рішення орієнтовані як на конкретні комплекси прокатного устаткування, так і на лабораторні прокатні стани. Залишається питанням універсальність існуючих моделей з можливістю їх застосування для розрахунку прокатних комплексів з різним складом основного технологічного устаткування.

Важливим моментом, зазначеним у праці [126], є потреба в отриманні точних моделей для проектування технології контрольованої прокатки мікролегованих марок сталі. Також важливість точного визначення температури відзначена авторами робіт [127] і [128] з метою забезпечення необхідної структури механічних властивостей і якісних характеристик прокату.

Слід зазначити, що в роботах [126–128, 130] авторами вивчалися дискретні процеси прокатки без прив'язки до конкретних виробничих комплексів.

У той же час в роботі [120] автори пропонують розрахунки і обґрунтовують використання різного дизайну технологічного устаткування з установкою CoilBox, а також з індукційної піччю, що дозволяє додатково підвищити температуру і знизити навантаження на прокатне устаткування. В роботі [131] авторами описаний спосіб розрахунку втрат температури на установці CoilBox, який враховує втрати на кожному витку. Даний спосіб є цікавим, проте сам спосіб або залежність в роботі не наведено. Також необхідна перевірка похибки, яка була одержана при використанні даного методу, так як загальна похибка моделі, за даними автора, становить понад 6%. У той же час автори досліджували технологію в широкому діапазоні температур, в тому числі в двофазній області, що дозволяє застосовувати модель для процесів низькотемпературної контрольованої прокатки.

Точності в цілому моделей прокатки, з урахуванням температурних моделей, розроблених різними вченими, мають відмінності, що пов'язано з різною структурою моделей, підходами і методами розрахунків. Так авторами роботи [121] запропонований адаптований спосіб розрахунку, похибка якого не перевищує 3,4% по клітках, в порівнянні з неадаптованим, похибка якого становила до 6% від

фактичних даних по силі прокатки. В роботі [131] загальна похибка моделі також визначена розрахунком сили прокатки.

У вигляді самостійного елемента авторами робіт [122] і [128] запропонована температурна модель, похибка якої визначена в град. С. Так, відхилення температури в роботі [128], яке визначається двома способами, становить 4,2 °С, в роботі [122] відхилення температури на поверхні двох досліджених листів складала від -20 °С до +10 °С і від +10 °С до +30 °С відповідно. В роботі [124] авторами досліджено вплив швидкісних процесів на температурний перепад по довжині штаби, з урахуванням змотування на установці CoilBox, проте сама залежність не наведена. Також авторами умовно прийнято, що температура металу, змотаного в рулон не змінюється, що вносить певну похибку у розрахунки. У той же час в роботі [125] наведено залежності для визначення втрат температури при змотування на CoilBox, що базується на диференціальному рівнянні теплопровідності. Дані рівняння не враховують втрати температури в процесі змотування і розмотування штаби, що обмежує їх застосування.

Таким чином, існуючі залежності і методи для розрахунку втрат температури на установках CoilBox здебільшого є спрощеними, не враховують частини факторів і не забезпечують необхідну точність розрахунків. Найявні в літературних джерелах інформації недостатньо для універсального математичного або аналітичного опису процесів охолодження металу в установках CoilBox. Розрахунки, які виконуються інжиніринговими компаніями, мають обмежений доступ. Існуючі обмеження обумовлюють необхідність в розробці залежностей для широкого застосування в інженерних розрахунках температурних процесів прокатки в комплексі з устаткуванням CoilBox.

Поглиблене вивчення температурних процесів, які відбуваються при обробці металів тиском шляхом математичного моделювання, становить окрему цікавість [132–135]. Так, в роботі [132] автори вивчають змінення температури одночасно з фазовим перетворенням при охолодженні в процесі змотування рулону. В роботі [133] автори вивчають вплив температурних полів та теплових потоків на форму штаби з можливістю керування в режимі реального

часу. Вплив температурних полів на дефекти форми штаби автори роботи [134] вивчають зворотнім тримірним методом. Слід зазначити, що в цих роботах нахил вивчення зроблено на широкий діапазон змінення температур гарячої прокатки, в той час як технологія ТМСП має вузький температурний коридор, що потребує проведення окремих досліджень.

Відомо, що формування властивостей в процесах ТМСП відбувається в тому числі після прокатки та охолодження, так зване карбонітридне твердіння [136]. Отже, після змотування штаби в рулон, формування властивостей ще відбувається та викликає додаткові напруження. Тому важливо індивідуально, в залежності від категорії міцності сталі враховувати умови прискореного ламінарного охолодження [137, 138], а також впроваджувати додатковий режим охолодження рулонів після змотування [139, 140].

Окремим питанням при впровадженні технології ТМСП є дослідження якості. З підвищенням категорії міцності і відповідно підвищенням внутрішнього напруження в металі, серед інших, можуть з'являтися такі дефекти, як тріщини (тріщини напружень), на появу яких може впливати поєднання хімічних елементів, таких як Са, Al [141], використання яких в інших технологічних напрямках, раніше, навпаки, вважалося тільки покращенням.

Серед параметрів якості параметр, який є чутливим до рівномірного охолодження, це «площинність штаби», який надалі формує ще один параметр – «геометричну форму» рулону [142], тому важливо це враховувати як при оцінці можливостей існуючого устаткування, так і при розробці технології та верифікації отриманого результату.

Наступним кроком в розвитку та вдосконаленні технології термомеханічної прокатки рулонної сталі можна назвати виробництво прокату з TRIP-сталі (Transformation – Induced Plasticity – пластичність, що наведена перетворенням), метастабільна високоміцна аустенітна сталь з високою пластичністю. Така сталь застосовується для виготовлення високонавантажених виробів. При її виробництві необхідно забезпечити можливість впровадження декількох стадій високошвидкісного (до 100 °C/c) охолодження прокату перед змотуванням [143, 144].

Слід зазначити еволюційне застосування технології ТМСР для виробництва ІF сталі [145], впровадження технології термомеханічної прокатки для яких вважалося неефективним через малий вміст елементів в сталі та неможливість відтворити необхідні умови для створення бар'єрів для зупинення дислокацій [146, 147].

Окрему цікавість становлять дослідження технологічних процесів виробництва прокату за технологією ТМСР на станах Стеккеля.

Цільовим призначенням станів Стеккеля, які були спроектовані до 60-х років минулого століття, було виробництво рулонної трансформаторної сталі, легованих сталей, які вироблялись способом гарячої прокатки в аустенітній області.

З метою розширення сортаменту стани Стеккеля були модернізовані [50, 51, 148, 149] та обладнанні установками прискореного охолодження прокату, що дозволило суттєво розширити сортамент, у тому числі за рахунок застосування технології термомеханічного контрольованого процесу [76, 150–152]. Стани Стеккеля останніх поколінь вже мають увесь необхідний комплекс устаткування для виробництва широкого сортаменту вуглецевих, мікролегованих та спеціальних сталей, а також широко використовуються в комплексі ливарно-прокатних модулів [50, 51, 148, 149, 153, 154]. Функціонуючі стани за своєю конструкцією поділяються на декілька типів: одноклітьові, двоклітьові, з чорною кліттю, з додатковими чистовими клітьями [51, 154].

Сучасні стани в змозі виробляти не тільки важкодеформовані електротехнічні та вуглецеві сталі, а і високоміцні та корозійностійкі мікролеговані сталі [155, 156]. Також суттєво розширився розмірний сортамент: замість товщин 2–12 мм сучасні стани можуть виробляти прокат у товщинах від 1,5 мм до 50 мм, у тому числі в листах. Маса слябів, які використовуються, становить до 70 т [51]. Сучасні стани Стеккеля мають усе необхідне устаткування для виробництва високоякісного прокату.

Авторами роботи [148] досліджено енергосилові параметри процесу прокатки на стані Стеккеля та відзначено необхідність та важливість моделювання технологічного процесу для розрахунку виробничих агрегатів, для розглядання динаміки температур, сили та моментів прокатки. Ця необхідність підтверджується

приведеними в роботі [148] графіками з результатами моделювання. Проте інформація про математичні залежності, які були використані, є обмеженою.

Як і на інших станах, багатьма авторами виконувались дослідження комплексних процесів виробництва на станах Стеккеля [47, 150, 157–160] і дослідження окремих технологічних процесів, які також можна використати для проектування цілісної технології [161, 162]. Серед інших, дослідження впливу температури на формування структурних складових по довжині штаби при виробництві аустенітних сталей [157], результати яких можуть бути частково застосовані при розробці технології або її корегуванні на стані Стеккеля.

Виробництво високоміцних марок сталі, здебільшого, це прерогатива товстолистових станів. Але стан Стеккеля є комбінацією товстолистого та безперервного стану. Сортамент, що виробляють на станах Стеккеля, є змішаним.

Дослідження та виробництво прокату для труб великого діаметра категорії міцності X80 [76, 150] на цьому типі стану цілком обґрунтовані. Слід зазначити, що ці технології впроваджені на устаткуванні, яке збудоване у 90-х роках, що дозволяє зробити окремий аналіз технічних можливостей та відмінностей устаткування з устаткуванням, побудованим раніше. Зокрема, новий стан обладнаний системою керування температурою головної та хвостової частин розкатів через автоматичне регулювання витрати охолоджувальної води.

Виробництво на стані Стеккеля є досить складним процесом, тому безумовно дослідження процесів з використанням лабораторної моделі стану [158] дозволяють суттєво поглибити знання та покращити процеси промислового засвоєння технології.

Слід зазначити, що в існуючих літературних джерелах питання моделювання процесів на станах Стеккеля висвітлені недостатньо. Розрахунки, які виконуються інжиніринговими компаніями при проектуванні схожих станів мають обмежений доступ. Існуючі обмеження обумовлюють необхідність в розробці залежностей, які будуть широко застосовуватися в інженерних розрахунках температурних процесів прокатки на станах Стеккеля. Обмежена кількість

досліджень залишає відкритим питання з оцінки технічних можливостей існуючого устаткування станів Стеккеля по освоєнню нового сортаменту підвищених категорій міцності.

Таким чином, поширене вивчення та цільове впровадження технології ТМСР спостерігається на товстостілових, безперервних станах та станах Стеккеля з урахуванням технічних особливостей станів, їх устаткування та сортаменту прокату, як марочного, так і розмірного. Здебільшого дослідження стосуються впливу різних швидкостей прискореного охолодження, загального моделювання процесів ТМСР, оцінки їх точності, якості прокату, прогнозування впливу параметрів прокатки на механічні властивості. При цьому, дослідження впливу деформаційних процесів на формування вихідної структури термомеханічного прокату, що успадковується, з сучасною схемою мікрولةгування сталі може заповнити прогалину в загальних дослідженнях та розширити напрямки подальшого вивчення, в тому числі методами математичного моделювання, та вдосконалення технології ТМСР. Вивчення змінення розподілу температури по ширині підкату в умовах термомеханічної прокатки дозволить покращити процес розробки технології та забезпечити рівномірність розподілу механічних властивостей в готовому прокаті. Розробка закономірностей для розрахунку змінення температури підкату в установці CoilBox та в пічних моталках стану Стеккеля, які відсутні в наявних дослідженнях, дозволить встановити вплив цього устаткування на загальний процес розробки технології термомеханічної прокатки. Розширення класичного методу фізичного моделювання для вивчення, в лабораторних умовах, силових характеристик прокату, що виробляється термомеханічним способом, дозволить отримати необхідні дані для подальшої розробки технологічного процесу.

Відповідно до різних стандартів, трактування терміну «Термомеханічна прокатка» є майже однаковим [163–166]. Нижче наведені приклади терміну «Термомеханічна прокатка» згідно з деякими нормативними документами які ототожнюють основні групи призначення прокату.

При виробництві прокату з судносталі, згідно з класифікацією Bureau Veritas (BV), Правила на матеріали та зварку для

класифікації морських споруджень NR 216 Глава 2 (п. 1.7.3) [163], термомеханічна прокатка ТМ (термомеханічний контрольований процес ТМСП) передбачає суворий контроль температури металу і обтиску при прокатці. Як правило, основна частина обтиску проводиться при температурі, наближеної до температури  $A_{г3}$ , і може припускати прокатку в двофазній області. Властивості після ТМ (ТМСП) не можуть бути відтворені наступною нормалізацією або іншими видами термообробки. По спеціальному схваленню товариства після прокатки може застосовуватися прискорене охолодження АСС, при якому забезпечується поліпшення механічних властивостей за рахунок контрольованого охолодження зі швидкістю більшою, ніж охолодження на повітрі.

При виробництві прокату з конструкційних марок сталі, згідно зі стандартом EN 10149-1 «Гарячекатаний плоский прокат зі сталей з високою границею плинності для холодної обробки тиском» [164], термомеханічна прокатка – це процес, при якому кінцева деформація відбувається в певному діапазоні температур, що дозволяє отримати матеріал з певними властивостями, які неможна досягти або повторити тільки за допомогою термообробки. Гаряча обробка тиском або термообробка після зварювання при температурі вище за  $580\text{ }^{\circ}\text{C}$  може погіршити значення тимчасового опору, і тому вказані види обробки краще не виконувати. Не рекомендується проводити наступне нагрівання до температури вище за  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  для марок S900MC та S960MC. Термомеханічна прокатка може включати процеси з прискореним охолодженням з відпуском, або без нього, в тому числі з самовідпуском, але виключаючи загартування з цементаційного нагріву та загартування і відпуску.

При виробництві прокату зі сталей для труб, згідно зі стандартом API Specification 5L «Специфікація на трубопровідні труби» [165] термомеханічний прокат – це стан поставки труби, отриманий у процесі гарячої прокатки штабового або листового матеріалу, коли остаточну деформацію проводять в певному інтервалі температур, внаслідок чого матеріал набуває певні властивості, які неможливо досягти або відтворити тільки однією термічною обробкою. Після деформації проводиться охолодження (можливо з прискореними темпами охолодження) з відпуском або без нього,

включаючи самовідпуск. Наступний нагрів понад 580 °C (1075 F) може знизити значення міцності.

При виробництві прокату зі сталей для посудин високого тиску, згідно зі стандартом ASTM A841/A841M «Стандартна специфікація на сталеві плити для посудин високого тиску, що виготовляються способом термомеханічного контрольованого процесу (ТМСР)» [166], метод ТМСР складається з регулювання швидкості прокатки та охолодження, що призводить до механічних властивостей готової пластини, еквівалентних тим, які досягаються за допомогою звичайних процесів прокатки та термообробки, які тягнуть за собою повторне нагрівання після прокатки. Внаслідок властивостей методу ТМСР пластини не можуть формуватися при підвищеній температурі без значних втрат у міцності та в'язкості. Пластини можуть бути сформовані і після зварювання та термооброблені при температурах, що не перевищують 1200 °F [650 °C].

Єдине трактування терміну та розуміння ТМСР всіма учасниками процесу виробництва та споживання дозволяє спільно використовувати переваги цієї продукції, результати досліджень та надалі розвивати цей технологічний напрямок.

## **1.2 Аналіз вимог до виробництва прокату способом термомеханічної прокатки**

### **1.2.1 Прокат конструкційного призначення**

Звичайний конструкційний прокат призначений головним чином для використання в машинобудівних та будівельних конструкціях звичайного масового призначення. В той же час, конструкційний прокат, що вироблений за технологією термомеханічної прокатки, за рахунок особливого комплексу властивостей має вже більш відповідальне призначення.

Конструкційний прокат, що виробляється по стандарту EN 10025-4 [167], призначений головним чином для використання на навантажених ділянках зварних конструкцій, що піддаються великим

навантаженням, такі як: мости, шлюзові затвори, резервуари-сховища, резервуари системи водопостачання та інші, для використання при температурі навколишнього середовища і низькій температурі. Прокат з конструкційних сталей згідно зі стандартом EN 10149-2 [168] придатний до зварювання, має високу границю плинності та застосовується для подальшої холодної обробки тиском.

Ці обидва типових та найпоширеніших Європейських стандарти регламентують виробництво конструкційного прокату за технологією термомеханічної прокатки, але мають деякі відмінності у вимогах до механічних властивостей та сортаменті сталей.

Стандарт EN 10025-2 [169] дозволяє виготовлення прокату способом гарячої, нормалізуючої та термомеханічної прокатки. Стандартом EN 10025-4 регламентовано значно нижчий рівень вуглецевого еквіваленту в порівнянні зі стандартом EN 10025-2 для аналогічних марок сталі.

В стандарті EN 10149-2 вуглецевий еквівалент взагалі не застосовується, дотримання умов зварювання забезпечується більш низьким обмеженням хімічного складу. Проте, при розрахунку вуглецевого еквіваленту згідно з п. 7.2.3 стандарту EN 10025-1 [170], для хімічного складу відповідно до стандарту, маємо нижчий рівень СЕ в порівнянні з EN 10025-4 та значно нижчий рівень в порівнянні зі стандартом EN 10025-2, для марок сталі, що можна порівняти.

По трьох вказаних стандартах для аналогічних марок сталі регламентовано майже однаковий рівень границі плинності. Виняток становить зміння границі плинності в залежності від товщини прокату у випадках, регламентованих відповідними стандартами. У той же час, рівень тимчасового опору має відмінності як по стандартах, так і в залежності від товщини прокату. Тимчасовий опір прокату, що вироблений за технологією термомеханічної прокатки, має більш низький рівень, ніж прокат по режимах гарячої прокатки. Цими обмеженнями дозволяють дотримуватися іншого показника механічних властивостей прокату, такого, як співвідношення «границя плинності / тимчасовий опір ( $\sigma_T/\sigma_B$ )». Цей показник не використано в перерахованих стандартах, але його використовують при виробництві прокату для труб, що буде показано в наступних підрозділах. Проте показник співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  дуже важливий при

розробці як хімічного складу так і термомеханічних режимів прокатки, які впливають на його рівень [165].

Слід зазначити, що в даній роботі використане уніфіковане позначення границі плинності  $\sigma_T$  та тимчасового опору  $\sigma_B$ . В наведених стандартах з урахуванням умов випробувань вказані показники можуть бути позначені іншим чином.

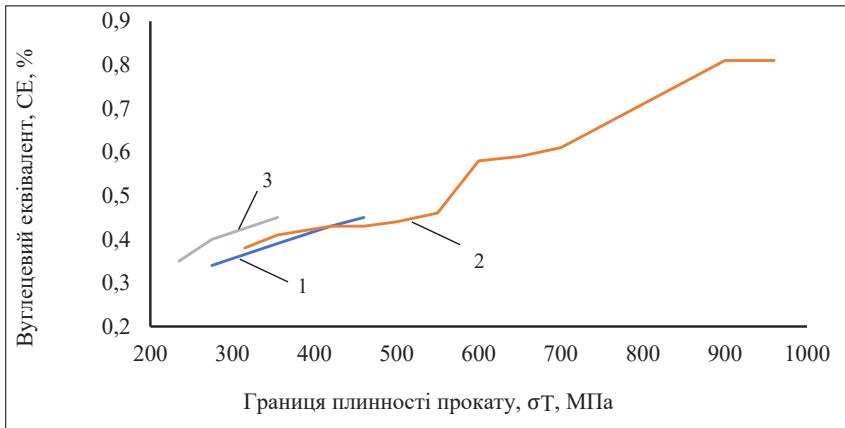
Розраховане співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , на підставі даних зі стандартів, для прокату, що виробляється способом термомеханічної прокатки, має більш високий рівень в порівнянні з прокатом, що виробляється способом гарячої прокатки. Це обумовлено властивостями самої сталі, що має більш низький рівень вуглецю та містить мікролегуючі елементи, які зсувають температуру перетворення аустеніту в ферит, забезпечуючи, таким чином, необхідний комплекс механічних властивостей та можливості зварювання. Також сталі, що виробляються способом термомеханічної прокатки, мають більш високі вимоги до відносного видовження, ніж сталі, що виробляються способом гарячої прокатки, для марок сталі, які можна порівняти.

Сталі, що виробляються способом термомеханічної прокатки, мають більш високі вимоги до енергії удару, ніж сталі, що виробляються способом гарячої прокатки, для марок сталі, які також можна порівняти. Це ствердження стосується як самого рівня енергії удару, так і більш низьких температур випробувань, які для гарячекатаного прокату взагалі не застосовуються.

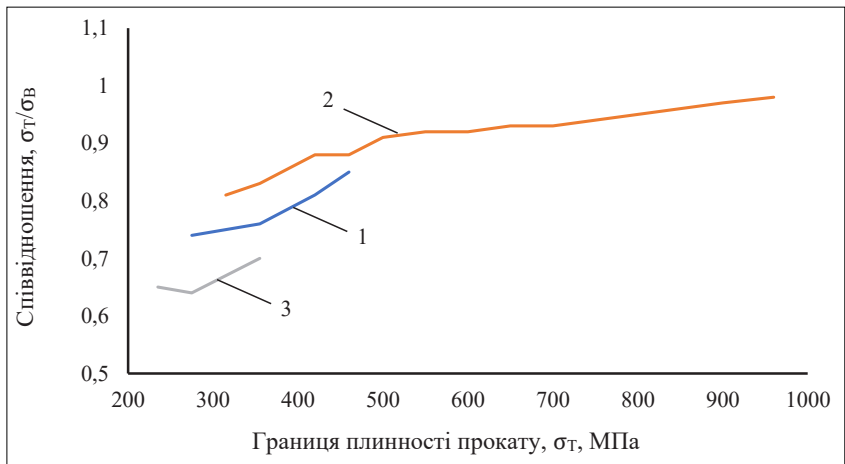
Порівняння вимог по стандартах до вуглецевого еквіваленту  $SE$  та співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , в залежності від границі плинності прокату, наведено на рис. 1.2–1.3.

На підставі порівняння даних зі стандартів для виробництва конструкційного прокату, а також додатково розрахованих показників, можна зазначити основні відмінності або переваги прокату, що виробляється способом термомеханічної прокатки, від прокату, що виробляється способом гарячої або нормалізуючої прокатки:

– хімічний склад має менше вуглецю та містить більше обмежень щодо таких мікролегуючих елементів як  $Ti$ ,  $Nb$ ,  $V$ ,  $Ni$ ,  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $B$  та інші, використання яких, за рахунок меншого рівня вуглецевого еквіваленту, забезпечує краще зварювання прокату, див. рис. 1.2;



**Рисунок 1.2** – Залежність вуглецевого еквіваленту від границі плинності прокату, згідно з вимогами/розрахунками по стандартах EN 10025-4 (1), EN 10149-2 (2) та EN 10025-2 (3)



**Рисунок 1.3** – Залежність розрахованого співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  від границі плинності прокату, згідно з вимогами стандартів EN 10025-4 (1), EN 10149-2 (2) та EN 10025-2 (3)

– механічні властивості характеризуються більш низьким рівнем тимчасового опору при майже однаковому рівні границі плинності, тобто показник співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  є вищим, див. рис. 1.3. Такий стан повинен вимагати встановлення додаткового обмеження та контролю, особливо при використанні прокату в конструкціях, що підлягають розтягненню. Слід зазначити, що наразі цей показник відсутній у вимогах для виробництва конструкційного прокату. Часткова втрата рівня тимчасового опору обумовлена концептуальним підходом до хімічного складу та є типовою для сталі, що використовується для термомеханічного прокату;

– відносно видовження має більш високий рівень вимог. Також більш високий рівень вимог до енергії удару, це стосується як самого рівня енергії удару, так і більш низьких температурі випробувань, які для стану гарячекатаного прокату взагалі не застосовуються;

– технологія термомеханічної прокатки дозволяє виробляти значно ширший асортимент прокату з більш високим рівнем механічних характеристик при інших рівних умовах, ніж технологія гарячої або нормалізувальної прокатки.

Основні показники якості прокату конструкційного призначення, що виробляється способом термомеханічної прокатки, наступні: хімічний склад з вмістом мікролегуючих елементів; вуглецевий еквівалент,  $CE$ ; границя плинності  $\sigma_T$ ; тимчасовий опір,  $\sigma_B$ ; відносно видовження,  $\delta$ ; холодний згин (в роботі не досліджувався, з огляду на візуальне визначення результату цього випробування); енергія удару,  $KV$ .

Таким чином, комплексна технологія термомеханічної прокатки, за рахунок особливого хімічного складу та термомеханічних режимів, забезпечує комплекс механічних властивостей прокату, що має високі властивості міцності та пластичності в поєднанні з більш вищою холодостійкістю.

Відмінності у стандартах EN 10025-4 та EN 10149-2 пов'язані суто з призначенням кінцевої продукції та не порушують загальної концепції. Наприклад, вимоги до нижчого рівня тимчасового опору по EN 10149-2 обумовлені використанням цього прокату для подальшої холодної обробки тиском.

## 1.2.2 Прокат для виробництва труб

Прокат для трубопровідного транспорту призначений для подальшого вироблення різноманітного марочного та розмірного сортаменту труб. Широкий сортамент труб, що виробляються, використовується для виготовлення різноманітних конструкції та для транспортування різних речовин та рідини. Кінцеве призначення труб визначає необхідний перелік властивостей, які, в свою чергу, повинен мати прокат для їх виготовлення.

Слід зазначити, що властивості/вимоги до прокату, який використовується для виробництва труб, та властивості/вимоги до самих труб мають відмінності, які обумовлені способами виробництва та впливом відомого ефекту Баушингера [171, 172]. З метою врахування змінень властивостей прокату при трубній переробці між конкретним виробником труби та виробником прокату розробляється окремий документ, який містить технічні вимоги. Також цей документ може бути розроблений профільним інститутом та узгоджений з усіма зацікавленими сторонами.

Для виробництва труб загального та конструкційного призначення існує багато стандартів, наприклад стандарт ДСТУ 8940 «Труби сталеві профільні. Технічні вимоги» [173], який розповсюджується на виробництво профільних труб загального призначення з вуглецевої сталі, заготовкою для яких є звичайний гарячекатаний прокат. Стандарт ДСТУ 8943 «Труби сталеві електрозварні. Технічні вимоги» [174] розповсюджується на виробництво сталених електрозварних прямошовних труб з вуглецевої сталі, які застосовуються для трубопроводів та конструкцій різноманітного призначення. Заготовкою для виготовлення цих труб є також гарячекатаний прокат, який вироблено без температурних обмежень. Стандарт ДСТУ 8936 «Труби сталеві водогазопровідні. Технічні умови» [175] розповсюджується на зварні труби, що застосовуються у водопроводах, газопроводах системах опалення, а також в деталях водогазопровідних конструкцій. Слід зазначити, що згідно з п. 6.2 цього ДСТУ, труби виробляються без вимоги до механічних властивостей та хімічного складу. Звичайно, що заготовкою для цих труб є гарячий прокат без особливих вимог.

Зі схожими вимогами та областю застосування труб в Сполучених Штатах Америки поширено використовується стандарт ASTM A53/A53M «Стандартна специфікація на сталеві труби без покриття та з цинковим покриттям, нанесеним шляхом занурення у ванну з розплавом, зварні та безшовні» [176]. Труби згідно з цим стандартом призначені для використання при механічних роботах та роботах під тиском, вони також можуть застосовуватись для паропроводів, водопроводів, газопроводів та повітропроводів. Заготовкою для виготовлення цих труб є звичайний гарячекатаний прокат, який вироблено без температурних обмежень, та прокат, що можливо виробляти за допомогою технології термомеханічної прокатки, при цьому вимоги до особливих властивостей в стандарті відсутні.

Також, конструкційне призначення мають труби, що виробляються по стандарту ASTM A500/A500M «Стандарт для холодногнутих зварних та безшовних цільнотянутих конструкційних труб круглого та фасонного перерізу з вуглецевої сталі» [177]. Ці труби використовують для виконання зварних, болтових та клепаних з'єднань у конструкціях мостів, будівель, а також тих, що мають загальне конструкційне призначення. Серед переліку марок сталі, які використовуються при виробництві труб по цьому стандарту, є ті, прокат для яких виробляється за технологією термомеханічної прокатки. Однак, зважаючи на цільове призначення труб, особливі вимоги до їх властивостей в стандарті ASTM A500/A500M не застосовуються.

Окреме місце займає прокат для трубопровідного транспорту, який виробляється згідно з вимогами Американського інституту нафти API Specification 5L (API-5L) [165]. Дія цього стандарту розповсюджується на виготовлення зварних та безшовних труб двох рівнів якості PSL 1 та PSL 2, що застосовуються в трубопровідних транспортних системах в нафтовій та газовій галузях промисловості. Рівень PSL 1 встановлює базовий рівень якості для трубопровідних труб.

Рівень PSL 2 містить додаткові обов'язкові вимоги до хімічного складу, ударної в'язкості і властивостей міцності, а також додаткові неруйнівні випробування. Відповідно до цих вимог формуються вимоги до прокату, що повинен проходити той самий перелік випробувань, що і труби.

На відміну від стандартів на продукцію конструкційного призначення, в стандарті API-5L, з огляду на високу відповідальність продукції та можливі техногенні та екологічні наслідки, окрім особливого переліка вимог до труб регламентовано також вимоги до заготовки, тобто прокату.

Перелік можливих умов поставки прокату, згідно зі стандартом, наведено в табл. 1.1.

Дані в таблиці 1.1 свідчать про те, що прокат найвищих категорій міцності (марок сталі) з найвищими вимогами, тобто рівня PSL 2, можна отримати тільки способом термомеханічної прокатки.

**Таблиця 1.1** – Умови поставки прокату для виробництва труб

<b>Рівень якості, PSL</b>	<b>Умови поставки</b>	<b>Марка сталі</b>	
1	2	3	
PSL 1	гаряча прокатка, нормалізувальна прокатка, нормалізація	A25	
		A25P	
		A	
	гаряча прокатка, нормалізувальна прокатка, термомеханічна прокатка, нормалізація, нормалізація та відпуск	B	
			X42
			X46
			X52
			X56
			X60
			X65
X70			
PSL 2	гаряча прокатка	BR	
		X42R	
	нормалізувальна прокатка, нормалізація, нормалізація та відпуск	BN	
		X42N	
		X46N	
		X52N	
		X56N	
		X60N	

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
PSL 2	загартування та відпуск	BQ
		X42Q
		X46Q
		X52Q
		X56Q
		X60Q
		X65Q
		X70Q
	X80Q	
	термомеханічна прокатка	BM
		X42M
		X46M
		X52M
		X56M
		X60M
		X65M
		X70M
		X80M
		X90M
X100M		
X120M		

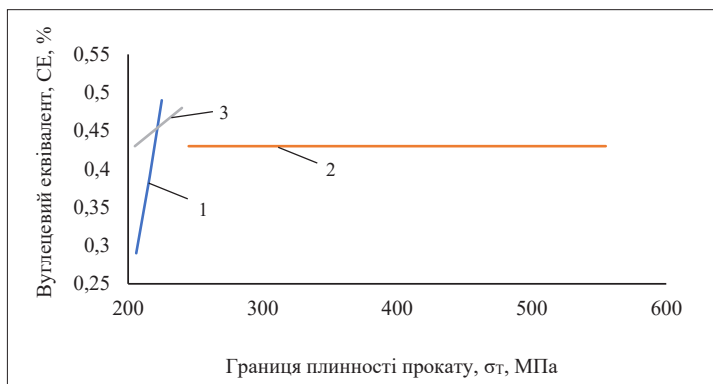
Порівняння вимог, по стандартах, до вуглецевого еквіваленту двох типів СЕ, СЕР<sub>ст</sub> та співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , в залежності від границі плинності прокату, наведено на рис. 1.4–1.6.

Таким чином, прокат/труби, які призначені для трубопровідного транспорту, мають наступні відмінності від прокату/труб конструкційного призначення:

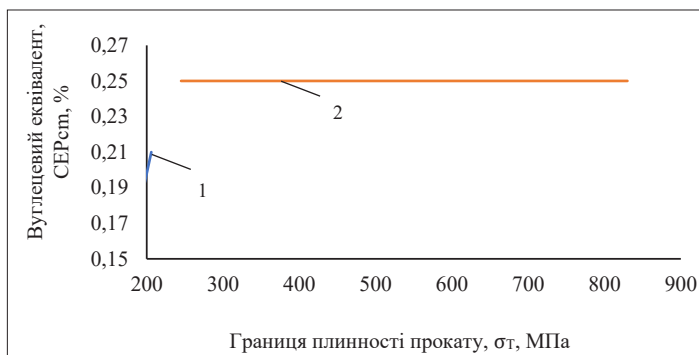
- хімічний склад містить більше обмежень щодо мікролегуючих елементів, таких як Ti, Nb, V, Ni, Cr, Mo, B та інших, що забезпечує краще зварювання прокату;

- використання однакового для всіх марок сталі обмеження щодо максимального рівня вуглецевого еквіваленту двох типів (СЕ для прокату з вмістом вуглецю >0,12 % та СЕР<sub>ст</sub> для прокату з вмістом вуглецю ≤0,12 %) яке невід’ємно пов’язане з комплексним хімічним

складом сталі/прокату. Застосування вимог CE та CER<sub>ст</sub> з розподілом по категорії міцності сортаменту наявно показано на рис. 1.4, 1.5. Слід зазначити, що в стандартах конструкційного призначення таке обмеження взагалі не застосовується, а рівень, який було розраховано, показав як менші, так і більші значення цього показника в порівнянні зі стандартом API-5L (PSL 2);

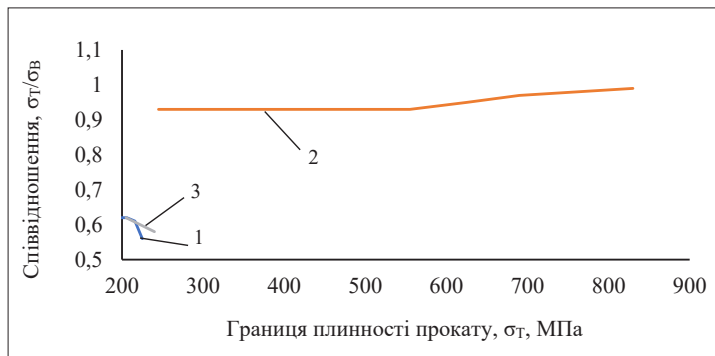


**Рисунок 1.4** – Залежність вуглецевого еквіваленту CE від границі плинності прокату, згідно з вимогами /розрахунками по стандартах ДСТУ 8943 (1), API-5L (2), ASTM A53/A53M (3)



**Рисунок 1.5** – Залежність вуглецевого еквіваленту CER<sub>ст</sub> від границі плинності прокату, згідно з вимогами/розрахунками по стандартах ДСТУ 8943 (1), API-5L (2)

– використовується обмеження щодо показника співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , застосування якого обумовлено особливостями хімічного складу та термомеханічними режимами прокатки; рівень співвідношення прокату / труб для трубопровідного транспорту сягає 0,93–0,97, в той час, як цей показник для прокату / труб конструкційного призначення стандартами взагалі не обмежений, а його розрахований рівень становить максимум 0,56–0,62, див. рис. 1.6;



**Рисунок 1.6** – Залежність співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  від границі плинності прокату, згідно з вимогами/розрахунками по стандартах ДСТУ 8943 (1), API-5L (2), ASTM A53/A53M (3)

– з підвищенням категорії міцності прокату/труб максимальний рівень вмісту вуглецю знижується з одночасним зниженням шкідливих домішок та збільшенням допустимого рівня  $Mn$  та мікролегуючих елементів. В стандартах для труб конструкційного призначення, навпаки, збільшення міцності здійснюється переважно за рахунок збільшення вмісту вуглецю;

– в якості обов’язкових випробувань застосовується випробування енергії удару KV та оцінка площі зламу при випробуванні падаючим вантажем DWT, що свідчить про підвищені умови експлуатації труб, зокрема запобіганню крихкому руйнуванню трубопроводів.

Необхідно відмітити, що використання таких показників як  $\sigma_T/\sigma_B$ , CE, CERcm, KV та площа зламу застосовується тільки для

трубопровідного транспорту по API-5L, рівня якості PSL 2. Рівень якості PSL 1 таких обмежень та випробувань не передбачає.

При порівнянні способів виробництва прокату для труб, стандарт API-5L дозволяє використовувати різноманітні технології, включаючи термічну обробку для виробництва прокату для труб. Але кожний спосіб виробництва має обмеження щодо сортаменту. Найвищі категорії міцності, вище X80, в якості PSL 2, згідно зі стандартом API-5L, виробляють тільки способом термомеханічної прокатки.

Основні показники якості прокату для виробництва труб, що виробляється способом термомеханічної прокатки, наступні: хімічний склад з вмістом мікролегуючих елементів; вуглецевий еквівалент, CE та CEM; границя плинності,  $\sigma_T$ ; тимчасовий опір,  $\sigma_B$ ; співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ ; відносне видовження,  $\delta$ ; енергія удару, KV; випробування падаючим вантажем DWT.

Таким чином, комплексна технологія термомеханічної прокатки забезпечує можливість виробництва всього переліку сортаменту стандарту API-5L, від марки В до марки (категорії міцності) X120, у найвищому рівні якості PSL 2.

Для оцінки різниці між конструкційним прокатом та прокатом для труб, що виробляється способом термомеханічної прокатки, основні показники якості зведені в табл. 1.2.

**Таблиця 1.2** – Порівняння основних показників якості прокату, що виробляється способом термомеханічної прокатки, в залежності від кінцевого призначення

Показник якості <sup>a</sup>	Призначення прокату			
	конструкційний прокат		прокат для труб	
	наявність показника в стандарті	рівень показника	наявність показника в стандарті	рівень показника
1	2	3	4	5
Хімічний склад з вмістом мікролегуючих елементів	+	порівнянний	+	порівнянний
Вуглецевий еквівалент, CE	+/-	$\leq(0,34-0,46)$	+	$\leq 0,43$

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5
Вуглецевий еквівалент, СЕР <sub>ст</sub>	–	–	+	≤0,25
Границя пластичності, σ <sub>T</sub> , МПа <sup>b</sup>	+	від 275 до 960	+	від 245 до 830
Тимчасовий опір, σ <sub>B</sub> , МПа <sup>b</sup>	+	від 370 до 980	+	від 415 до 915
Співвідношення σ <sub>T</sub> /σ <sub>B</sub>	-	–	+	≤(0,93–0,99)
Відносне видовження, δ, %	+	≥(24–7)	+	≥(23–11)
Енергія удару, KV, Дж <sup>c</sup>	+	≥(47–55)	+	≥(27–40)
Випробування падаючим вантажем DWT, площа зламу, %	–	–	+	≥85

<sup>a</sup> в таблиці вказані тільки ті параметри та їх рівні які регламентовано відповідними стандартами, що наведені вище; <sup>b</sup> вказана нижня межа; <sup>c</sup> наведено для порівняння при температурі випробувань 0 °С.

Основні від'ємності, що відрізняють прокат по призначеннях, є застосування для прокату для труб показника СЕР<sub>ст</sub>, що свідчить про використання сталей з вмістом вуглецю менше за 0,12 %, використання показника σ<sub>T</sub>/σ<sub>B</sub>, дотримання обмежень якого в прокаті конче необхідно при подальшому випробуванні – експандуванні труб, а також випробування DWT, яке дозволяє запобігати крихкому руйнуванню трубопроводів.

Слід зазначити, що порівняння вимог до прокату, який буде використано при подальшому виготовленні труб, виконано без врахування ефекту Баушингера [171, 172]. В порівнянні використано перелік вимог, який стосується тільки прокату (основного металу труби) без унікальних вимог, які стосуються тільки труби. В якості заготовки для виробництва труб в наведених стандартах розглянуто тільки гарячекатаний прокат з усіма можливими варіантами виробництва (безпосередньо гаряча прокатка без температурних

обмежень, нормалізувальна прокатка, термомеханічна прокатка, прокатка з подальшою термообробкою). В якості заготовки не розглядався холодний прокат, оцинкований прокат та гарячекатані безшовні труби.

Зазначені в роботі ДСТУ наведені тільки в якості порівнювальних.

## **1.3 Аналіз рівня устаткування вітчизняних та деяких закордонних станів гарячої прокатки**

### **1.3.1 Товстолистові стани гарячої прокатки**

#### ***1.3.1.1 Стан 3000 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»***

В Україні є два діючі товстолистові стани гарячої прокатки: стан 3000 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» та стан 3600 металургійного комбінату «МК «АЗОВСТАЛЬ». В якості альтернативного, розглянуто стан 3200 заводу Trameal, Італія.

Розглянемо окремо схему виробництва, основне устаткування та сортамент, що виробляють стани.

Стан 3000 виробляє товстолистовий прокат товщиною 6–50 мм, шириною 1500–2700 мм та довжиною до 25 000 мм.

В залежності від вимог замовників та/або стандартів, на стані 3000 виробляється продукція у стані гарячекатаному, після нормалізувальної прокатки, після термомеханічної прокатки. Наразі, устаткування для прискореного охолодження прокату після стану не працює, тому можливість виготовлення прокату способом термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням відсутня.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.7.

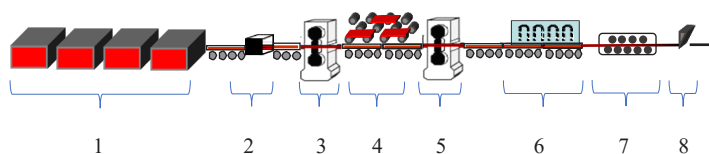
В якості заготовки для виробництва прокату використовуються безперервнолітні сляби, що виробляються в конвертерному цеху «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», також в невеликих об'ємах

використовуються сляби виробництва «МК «АЗОВСТАЛЬ» з розмірами 150–315 × 1100–1850 × 2300–2850 мм, або катані сляби власного виробництва з розмірами 120–250 × 1100–1850 × 2300–2850 мм, для виробництва більш тонкого сортаменту.

Основне технологічне устаткування стану 3000 включає (див. рис. 1.7) чотири методичні нагрівальні печі з крокуючими балками; камеру гидрозбиву для попереднього видалення окалини; двохкільтвовий реверсивний прокатний стан кварто; байпас для проміжного охолодження підкатів (дільниця з холодильників дискового типу, яка використовується з метою накопичування та природнього або прискореного, за допомогою промислових аераторів, охолодження підкатів перед чистовою кліттю); установку прискореного ламінарного охолодження металу після прокатки (наразі не діє); ролико-правильні машини (РПМ-1 для гарячої правки, та РПМ-2,3 для холодної правки); ножиці поперечної різки (ПН-1, ПН2,5,6,7); чотири холодильники дискового типу для охолодження після прокатки; здвоєні крайкообрізні ножиці (ЗКОН-3,4); два ультразвукові дефектоскопи для неруйнівного контролю якості прокату; машину гарячого маркування (МГМ № 2279); клеймувально-маркувальні машини (КММ № 2280, № 2281).

Стан обладнаний системою автоматичного керування технологічним процесом.

Все устаткування стану 3000 спроектоване на прокатування та обробку товстих листів з границею плинності  $\leq 736$  МПа та тимчасовим опором  $\leq 883$  МПа.



- |  |  |
|--|--|
| 1 – дільниця методичних печей                  | 5 – чистова реверсивна кліт            |
| 2 – камера гидрозбиву окалини                  | 6 – установка прискореного охолодження |
| 3 – чорнова реверсивна кліт                    | 7 – ролико-правильна машина            |
| 4 – байпас для проміжного охолодження підкатів | 8 – поперечні ножиці                   |

**Рисунок 1.7** – Схема розташування основного устаткування стану 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»

Зовнішній вигляд ділянки робочих клітей стану 3000 наведений на рис. 1.8.



**Рисунок 1.8** – Зовнішній вигляд ділянки робочих клітей стану 3000 з зображенням чорнової кліті, байпасу та чистової кліті

Відповідно до проекту, стан 3000 був призначений для виробництва товстостінового прокату для подальшого виготовлення електрозварних труб великого діаметру безпосередньо способом термомеханічної прокатки. Тому комплекс має відповідний набір та технічні характеристики основного устаткування.

Слід зазначити, що наразі, всім відома технологія протифлоєнної обробки прокату (ПФО), згідно з проектом стану 3000 не була передбачена. Обладнання спеціальної ділянки та впровадження технології ПФО було здійснено в стислих умовах діючого процесу виробництва, без необхідної інфраструктури (спеціальні столи для знімання прокату магнітними кранами, недостатньо місць для складання прокату, відсутність автоматичного контролю температури складання прокату). Наразі ділянка ПФО є вузьким

місцем стану 3000, так як вона здатна обробляти не більше ніж 27 тис. т прокату на місяць, що становить не більше ніж 20 % від загального виробництва.

Сортамент товстолистового прокату, що наразі виробляє стан 3000, наведений в табл. 1.3.

Серед основних характеристик, необхідних для виробництва якісної продукції та забезпечення термомеханічного процесу на стані 3000 є наступні:

– наявність печей з крокуючими балками, які дозволяють вести нагрівання без травмування нижньої частини слябів (як, наприклад у печах штовхального типу), а також повністю вивантажувати сляби з печей при технологічних або аварійних простоях устаткування. Цей момент є дуже важливим, так як відомо, що при термомеханічному процесі час нагрівання повинен бути обмежений. Порушення режиму нагрівання призводить до розчинення більшої кількості карбонітридів V та Nb та до збільшення розміру аустенітного зерна;

– висока потужність та сила прокатки обох прокатних клітей, що дозволяє вести термомеханічний процес з виконанням необхідних умов по обтисненню (не менш ніж 10 % за прохід, а для деяких марок сталі не менш ніж 20 %), а також здійснювати термомеханічну прокатку як з прискореним охолодженням, так і без нього, так звану низькотемпературну контрольовану прокатку, яка потребує підвищення сили, так як здійснюється в діапазоні температур аустенітна-феритного перетворення;

**Таблиця 1.3** – Основні групи сортаменту товстолистового прокату, що виробляє стан 3000

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
1	2	3
Прокат для подальшого виробництва електрозварних труб для транспортування нафти та газу <sup>а</sup>	ТУ 14-1-1921; ТУ 14-1-3636; ТУ 14-1-3978; ТУ 14-1-4034; ТУ 14-1-4083; ТУ 14-1-4627; ТУ 14-1-5293; ТУ 14-100-МКИ	13ГС, 13Г1СУ, 17ГС, 17Г1С, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ, Х70 та їх аналоги

<sup>а</sup> Вплив технічного рівня прокатного устаткування на рівень технології та якість продукції

Продовження таблиці 1.3

1	2	3
Прокат для суднобудування	ABS; DNV GL; LR; BV; RINA; ASTM A131/A131M; PC; ГОСТ 52927; ГОСТ 5521	A, B, D, E, AH27S, DH27S, EH27S, AH32, DH32, EH32, AH36, DH36, EH36, AH40, DH40, EH40
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A204/A204M; ASTM A285/A285M; ASTM A299/A299M; ASTM A515/A515M; ASTM A516/A516M; ASTM A662/A662M	A, B, C, D, 299, 55, 60, 65, 70
	EN 10028-2; EN 10207	P265 GH, P295 GH, P355 GH, P235S, P265S, P275SL та інші
	ГОСТ 5520	20K, 09Г2С та інші
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії	ASTM A36/A36M; ASME SA36/SA36M; ASTM A283/A283M; ASTM A572/A572M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A709/A709M;	A36, C, D, 42, 50, 55, 60 type 1-5, 58, 65, 70, A, B, C, K, 36 (250) та інші
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії	EN 10025-2; EN 10025-3; EN 10025-4; EN 10025-5; EN 10113-2; EN 10113-3; EN 10149-2; EN 10149-3; EN 10155	S235, S275, S355 всіх категорій, S355N, S355NL та інші, S355M, S355ML та інші, S235JOW, S235J2W, S355JOW та інші, S355MC, S420MC, S460MC та інші, S260NC, S315NC, S355NC, S420NC
	CSA G 40.21	300W, 350W та інші
	JIS G 3101; JIS G 3106	SS400, SS490 та інші

Продовження таблиці 1.3

1	2	3
	ГОСТ 19281; ГОСТ 14637; ГОСТ 1577; ГОСТ 27772	09Г2С, 10ХСНД, 17Г1С та інші, СтЗГсп, СтЗсп та інші, 20, 45, 65Г, С235, С245, С345

<sup>a</sup> наведені типові нормативні документи, що розроблені профільними інститутами, у тому числі під конкретні проекти. Для умов поставки на закордонні ринки між Замовником та Виробником розробляються окремі документи з відповідними вимогами Замовника, на підставі стандартів на трубу, вимог проекту, з урахуванням впливу процесу виробництва Замовника

– наявність байпасу забезпечує дотримання термомеханічного режиму без втрати продуктивності стану, за рахунок накопичування на ньому підкатів та їх охолодження перед чистовою прокаткою;

– наявність, згідно з проектом, установки прискореного охолодження для здійснення режиму термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням. Нажаль, наразі ця установка не є діючою, а термомеханічний процес на стані 3000 здійснюється без прискореного охолодження, що обмежує можливості стану;

– наявність автоматичної системи керування процесом прокатки, що є важливою складовою виробництва термомеханічного прокату, у тому числі для отримання ідентичності показників якості між розкатами;

– розкочувальні поля мають достатню довжину для розміщення цілих розкатів, що є перевагою цього стану та не потребує синхронізації з одночасним використанням декількох видів устаткування при здійсненні процесу прокатки.

Слід зазначити, що вузьким місцем для розвитку технології термомеханічної прокатки на стані 3000 є дільниця протифлокеної обробки без належної інфраструктури.

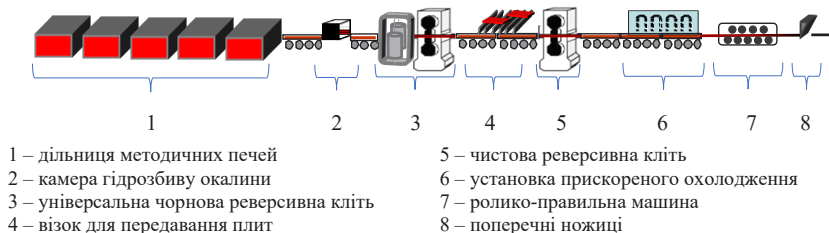
Відсутність устаткування для термічної обробки прокату обмежує гнучкість технологічного процесу та унеможливорює виправлення властивостей прокату, що отримані при виробництві на стані.

### 1.3.1.2 Стан 3600 металургійного комбінату «МК «АЗОВСТАЛЬ»

Стан виробляє товстолистовий прокат та плити товщиною 6–200 мм, шириною 1500–3200 мм та довжиною 6000–12 200 мм. По спеціальних замовленнях, переважно це стосується виробництва прокату для труб великого діаметру, товстий лист може виготовлятися шириною до 3300 мм. На стані 3600 плитою вважається прокат, товщина якого більша за 50,8 мм. Наразі, через технічний стан клітей кварту, прокат товщиною 6–7 мм не виробляється.

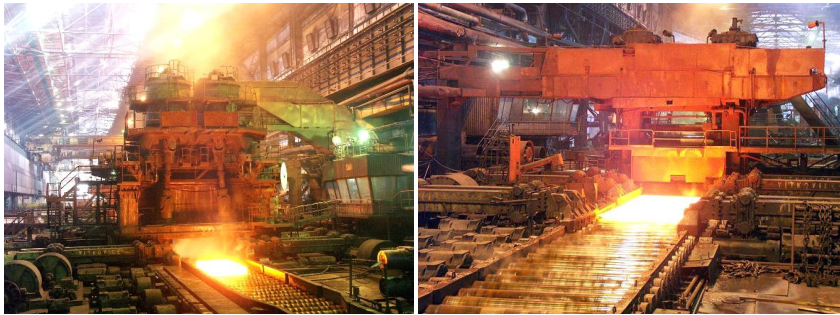
Згідно з вимогами стандартів на стані 3600 може бути вироблена продукція у стані після гарячої, нормалізувальної та термомеханічної прокатки, у тому числі з прискореним охолодженням. Також, зважаючи на наявність устаткування, стан може виробляти продукцію після термічної обробки нормалізацією, відпуск, загартування з відпуском.

Схема розташування основного устаткування стану 3600 наведена на рис. 1.9.



**Рисунок 1.9** – Схема розташування основного устаткування стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»

Заготовкою для виробництва продукції на стані 3600 є безперервнолиті сляби виробництва конвертерного цеху «МК «АЗОВСТАЛЬ» та катані сляби власного виробництва товщиною 130–350 мм, шириною 1100–1920 мм та довжиною 920–3420 мм. Зовнішній вигляд робочих клітей стану 3600 наведений на рис. 1.10.



**Рисунок 1.10** – Зовнішній вигляд універсальної чорнової кліті (ліворуч) та чистової кліті (праворуч) стану 3600

Основне технологічне устаткування стану 3600 включає (див. рис. 1.9) п'ять методичних нагрівальних печей штовхального типу; камеру гидрозбиву для попереднього видалення окалини; двохкільтвовий реверсивний прокатний стан кварто, з універсальною чорною кліткою; візок для передавання плит в інший проліт, на дільницю для їх подальшої обробки; установку прискореного ламінарного охолодження прокату після прокатки; ролико-правильні машини, РПМ-8 для гарячої правки та РПМ-1-7 для подальшої гарячої та холодної правки; ножиці поперечної різки з машиною гарячого маркування (ПН-1, ПН-2,5,6,7,8); чотири холодильники дискового типу для охолодження після прокатки та після термічної обробки; здвоєні крайкообрізні ножиці (ЗКОН-3,4); ультразвукові дефектоскопи для неруйнівного контролю якості прокату ДУЕТ 1,2; комплекс шлеперів та кантувачів для огляду прокату з двох сторін та передавання в інші проліти; печі з роликовим та висувним подом для термічної обробки товстих листів та плит; ролико-загартувальну машину та загартувальні машини ванного типу; прес для правки плит; клеймувально-маркувальні машини.

Стан обладнаний системою простеження для контролю технологічних параметрів. Все устаткування стану 3600 спроектоване на прокатку та обробку товстих листів та плит з тимчасовим опором  $\leq 1200$  МПа.

Відповідно до проекту, стан 3600 був призначений для виробництва товстолистового прокату широкого спектру призначення, у тому числі для конструкцій, котлів та посудин під тиском, суднобудування, для подальшого виготовлення магістральних труб великого діаметру, а також спеціального, у тому числі подвійного призначення. Ця велика різноманітність сортаменту передбачала більшу частину виробництва з термічною обробкою прокату, як то товстий лист, так і плиту. Але початок засвоєння термомеханічного процесу прокатки зі всього пострадянського простору відбувався безпосередньо на стані 3600. Сортамент товстолистового прокату, що зараз виробляє стан 3600 наведений в табл. 1.4.

**Таблиця 1.4** – Основні групи сортаменту товстолистового прокату, що виробляє стан 3600<sup>a</sup>

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
1	2	3
Прокат для подальшого виробництва електрозварних труб для транспортування нафти та газу <sup>b</sup>	ТУ 14-1-1921; ТУ 14-1-3636; ТУ 14-1-3978; ТУ 14-1-4034; ТУ 14-1-4627; ТУ 14-1-5293; ТУ 14-100-МКИ; ТУ 14-1-1950; ТУ 14-1-5346; ТУ 14-1-5351; ТУ 14-1-5364; ТУ 14-1-5382; ТУ 14-1-5383; ТУ 14-1-5384; ТУ 14-1-5385; ТУ 14-1-5443; ТУ 14-1-5514; ТУ 14-1-5515; ТУ 14-1-5523; ТУ 14-1-5535	13ГС, 13Г1СУ, 17ГС, 17Г1С, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ, Х46, Х52, Х56, Х60, Х65, Х70, 17Г1СУ-К52, К55, 08Г1Б, 07ГБФ-К48, К50, К52 та їх аналоги
	EN 10208-1; EN 10208-2;	L210GA-L360GA, L245NB-L485MB
Прокат для суднобудування	ABS; DNV GL; LR; BV; RINA; NKK; ASTMA131/A131M; PC; PCY; ГОСТ 52927; ГОСТ 5521	A, B, D, E, AH27S, DH27S, EH27S, AH32, DH32, EH32, AH36, DH36, EH36, AH40, DH40, EH40, FH40

Продовження таблиці 1.4

1	2	3
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A202/A202M; ASTM A285/A285M; ASTM A299/A299M; ASTM A515/A515M; ASTM A516/A516M; ASTM A662/A662M; ASTM A537/A537M; ASTM A517/A517M	A, B, C, D, 299, 55, 60, 65, 70, Class 1,2,3, B, F, Q
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	EN 10028-2; EN 10028-3	P265 GH, P295 GH, P355 GH, P275-355NH, P275-355NL1, P275-355NL2, P460NL1 та інші
	BS 1501.1	151-430A...224-490B
	ГОСТ 5520	15К, 20К, 22К, 09Г2С, 10Г2С1, 16ГС, 17ГС, 12Х1МФ, 12ХМ, 10Х2М
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	ASME SA36/SA36M; ASME SA283/SA283M; ASTM A514/A514M; ASTM A572/A572M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A633/A633M; ASTM A709/A709M; ASTM A830/A830M	A36, C, D, 42, 50, 55, 60 type 1-5, A514-B, F, H, Q, 58, 65, 70, A, B, C, K, 36 (250), 50 Type 1, 2, 3, 50 W Type A, B, C, 1045 та інші
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	EN 10025-2; EN 10025-3; EN 10025-5; EN 10113-2; EN 10155; EN 10083-2	S235, S275, S355 всіх категорій, S355N, S355NL та інші, S235JOW, S235J2W, S355JOW та інші, S260NC, S315NC, S355NC, S420NC, C45

Продовження таблиці 1.4

1	2	3
	CSA G 40.21	44W, 300W, 50W, 350W, 50WT, 350WT, 60W, 400W
	JIS G 3101; JIS G 3106; JIS G 3136	SS400, SS490, SM400F-SM490YB, SN490B
	API Specification 2H; API Specification 2Y	42, 50, 60
	SAE J403	1012, 1020, 1021, 1045
Прокат для кон- струкцій загаль- ного та спеціаль- ного призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	ГОСТ 19281; ГОСТ 14637; ГОСТ 1577; ГОСТ 27772; ГОСТ 6713	09Г2С, 10ХСНД, 17Г1С та інших марок сталі з класами міцності від 265 до 440, Ст3Гсп, Ст3сп та інші, 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 65Г, 20Х, 40Х, С245, С255, С345, 16Д, 10ХСНД, 15ХСНД

<sup>a</sup> на стані 3600 також виробляють прокат по окремих технічних вимогах Замовників; <sup>b</sup>наведені типові нормативні документи, що розроблені профільними інститутами, у тому числі під конкретні проекти. Для умов поставки на закордонні ринки між Замовником та Виробником розробляються окремі документи з відповідними вимогами Замовника, на підставі стандартів на трубу, вимог проекту, з урахуванням впливу процесу виробництва Замовника

Хоча комплекс устаткування був не пристосований для реалізації цього складного процесу, стан 3600 дав початок розвитку та впродовж декількох десятиліть був лідером по освоєнню технології термомеханічної прокатки та найскладнішого наукоємного сортаменту.

За час зміни кваліфікації стану з виробництва гарячекатаної та термообробленої продукції до виробника номер один з виробництва термомеханічного прокату в Україні та на пострадянському просторі (з 1973 року по 2008 рік) була зроблена велика кількість змін щодо існуючого устаткування та впровадження нових видів

обробки прокату. Серед яких слід відзначити технологію протифлокеної обробки прокату (ПФО), для впровадження якої було обладнано окрему спеціалізовану дільницю з необхідною інфраструктурою. Ця дільниця спроможна обробляти 100% прокату, що вироблений станом.

Останні кроки, що були зроблені у 2011–2012 роках – це реконструкція стану 3600 з встановленням установки прискореного охолодження прокату (УКО) та роликотправильної машини для гарячої правки прокату безпосередньо після термомеханічного охолодження.

На сьогодні, серед основних характеристик які необхідні для виробництва якісної продукції та забезпечення термомеханічного процесу прокатки на стані 3600 є наступні:

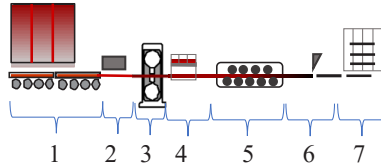
- розкочувальні поля між чорною та чистою кліткою мають достатню довжину для розміщення декількох підкатів для їх природнього охолодження з метою дотримання термомеханічного режиму;
- наявність установки прискореного охолодження для здійснення режиму термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням;
- наявність автоматичної системи контролю термомеханічних параметрів (система простежування), що є важливою частиною керування технологічним процесом;
- наявність дільниці для протифлокеної обробки прокату з відповідною інфраструктурою;
- наявність устаткування для термічної обробки прокату, яке дозволяє підвищити гнучкість технологічного процесу завдяки можливості часткового виправлення властивостей прокату.

### ***1.3.1.3 Стан 3200 заводу Trametel, Італія***

Стан 3200 виробляє товстолистовий прокат товщиною 4–150 мм, шириною 1400–3250 мм та довжиною 4000–36 000 мм. В залежності від вимог, устаткування стану 3200 дозволяє виробляти прокат у гарячекатаному стані, після нормалізувальної прокатки, після термомеханічної прокатки, а також після термообробки нормалізацією, нормалізацією з відпуском, відпалюванням.

В якості заготовки для виробництва прокату використовуються безперервнолиті сляби товщиною 150–220 мм виробництва «МК АЗОВСТАЛЬ» та «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» (сляб 150 мм).

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.11.



- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| 1 – штовхальна методична піч  | 5 – ролико-правильна машина     |
| 2 – камера гідрозбиву   | 6 – ножиці для поперечної різки |
| 3 – кліть кварто 3200   | 7 – холодильник                 |
| 4 – підйомний пристрій для природнього охолодження підкату на повітрі |                                 |

**Рисунок 1.11** – Схема розташування основного устаткування стану 3200 заводу Trametel

Основне технологічне устаткування стану 3200 включає (див. рис. 1.11) методичну шестизонну трирядну штовхальну піч; нагрівальну камерну піч; камеру гідрозбиву; одноклітьовий реверсивний стан кварто; пристрій для проміжного природнього охолодження підкату на повітрі перед чистою прокаткою для здійснення режимів нормалізувальної та термомеханічної прокатки; ролико-правильну машину для правки гарячого прокату; ножиці для поперечної різки розкатів комбіновані з машиною гарячого маркування; два холодильники рейкового типу для остаточного природнього або примусового охолодження прокату повітрям; прес для клеймування; машини кисневого та плазмового розрізання листа, та машина холодного розрізання; машину холодної правки прокату; дрібні-струменеву установку; дві роликові термічні печі.

Стан обладнаний системою автоматичного керування технологічним процесом виробництва.

Зовнішній вигляд робочої кліти та підйомного пристрою наведено на рис. 1.12.



**Рисунок 1.12** – Зовнішній вигляд робочої кліти стану 3200 (ліворуч) та підйомного пристрою для охолодження прокату перед чистовою прокаткою (праворуч)

Стан 3200 призначений для виробництва товстолистового прокату загального та спеціального конструкційного призначення, прокату для подальшого виготовлення труб, котлів та посудин, що працюють під тиском, прокату для суднобудування. Наявність устаткування для термічної обробки прокату дозволяє суттєво розширити сортамент та підвищити гнучкість технологічного процесу завдяки можливості часткового виправлення властивостей прокату цими засобами. Слід зазначити, що виробництво прокату способом термомеханічної прокатки здійснюється без прискореного охолодження. Відносно невисокі характеристики потужності стану обмежують можливості виробництва деяких категорій міцності прокату.

Серед характеристик, що забезпечують можливості стану виробляти продукцію термомеханічним способом прокатки, є наступні:

- наявність підйомного пристрою для дотримання термомеханічних режимів перед чистовою прокаткою;

- наявність автоматичної системи керування процесом виробництва;
- наявність спеціалізованої дільниці для проведення ПФО, з інфраструктурою;
- наявність устаткування для термічної обробки прокату дозволяє підвищити гнучкість технологічного процесу завдяки можливості часткового виправлення властивостей прокату цими засобами.

Сортамент товстостішового прокату, що зараз виробляє стан 3200, наведений в табл. 1.5.

Різноманітність устаткування для обробки прокату дозволяє виробляти продукцію з додатковою обробкою (індивідуальним перерізанням та поверхнею після дробе-струменевої обробки).

Таким чином, три товстостішові стани, що розглянуті в даному розділі, мають свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при розробці технології термомеханічної прокатки, табл. 1.6.

Порівняння наявного устаткування трьох досліджених станів щодо реалізації технології термомеханічної прокатки показало по кожному з них як переваги, так і напрямки для покращення.

Стан 3000, спеціалізований, має найкращі показники потужності, які на 30–70 % перевищують аналогічні показники у порівнянних станів, та систему контролю технологічного процесу. Суттєвим недоліком, що обмежує можливості стану, є наявність установки УКО, що не експлуатується, а також наявність дільниці ПФО, яка потребує збільшення об'єму та покращення логістичних можливостей. Покращення в цих двох напрямках допоможе суттєво розширити сортамент та покращити якість термомеханічного прокату.

Стан 3600 має діючу установку УКО, дільницю ПФО, яка може обробляти 100 % прокату. Слід зазначити нижчі показники потужності прокатних клітей та обмеження по проміжному охолодженню, які, проте, тільки частково обмежують сортамент та продуктивність. Основним напрямком для покращення повинна стати система простежування, яка окрім контролю повинна отримати функції керування технологічним процесом.

**Таблиця 1.5** – Основні групи сортаменту товстолистового прокату, що виробляє стан 3200

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
1	2	3
Прокат для подальшого виробництва електроварних труб для транспортування нафти та газу	API-5L	B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70
Прокат для суднобудування	ABS; DNV GL; LR; BV; RINA	A, B, D, E, AH27S, DH27S, EH27S, AH32, DH32, EH32, FH32, AH36, DH36, EH36, FH36
	ASTM A131/A131M	A, B, D, E, AH32, DH32, EH32, FH32, AH36, DH36, EH36, FH36
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A203/A203M; ASTM A204/A204M; ASTM A285/A285M; ASTM A299/A299M; ASTM A516/A516M; ASTM A662/A662M; ASTM A537/A537M; ASTM A387/A387M	A, B, C, D, E, 55, 60, 65, 70, Class 1, Grade 11, 12
	EN 10028-2; EN 10028-3; EN 10028-4	P235 GH, P265 GH, P295 GH, P355 GH, P275-355NH, P275-355NL1, P275-355NL2, P460NL1 та інші, 13MnNi 6-3, 12Ni14
	NF A36-215	P440HJ2, P440HJ4
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	ASME SA36/SA36M; ASME SA283/ SA283M; ASTM A572/A572M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A633/A633M; ASTM A709/A709M	A36, C, D, 42, 50, 55, 60 type 1-5, 58, 65, 70, A, B, C, K, 36 (250), 50 Type 1, 2, 3, 50W Type A, B, C, та інші

Продовження таблиці 1.5

1	2	3
	EN 10025-2; EN 10025-3; EN 10025-5; EN 10113-2; EN 10155; EN 10083-2; EN 10083-3; EN 10084; EN 10225	S235, S275, S355 всіх категорій, S355N, S355NL та інші, S235JOW, S235J2W, S355JOW та інші, S260NC, S315NC, S355NC, S420NC, C40-C50, 34CRO4-42CRMO4, 20MNB5-30MNB5, 16MNCR5-20MNCR5, S355G2, S355G3
	API Specification 2H	42, 50

**Таблиця 1.6** – Порівняння основних характеристик розглянутих прокатних станів

Найменування параметрів	Технічні дані		
	Стан 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»	Стан 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»	Стан 3200 заводу Trametal
1	2	3	4
Тип нагрівальних агрегатів	методичні з крокуючими балками	методичні штовхальні	методична штовхальна та камерна
Прокатний стан:			
Чорнова кліть – тип; – номінальна потужність головного приводу, кВт; – у тому числі питома потужність, кВт/мм <sup>2</sup> ; – максимальна сила прокатки, МН; – у тому числі питома сила прокатки, МН/мм <sup>2</sup>	кварто  2 × 8000  2 × 2,6  68,7  0,023	кварто  2 × 6920  1,92  46  0,013	–
Чистова кліть – тип; – номінальна потужність головного приводу, кВт; – у тому числі питома потужність, кВт/мм <sup>2</sup> ;	кварто  2 × 11200  2 × 3,73	кварто  2 × 8800  2 × 2,44	варто  2 × 3500  2 × 1,09

Продовження таблиці 1.6

1	2	3	4
– максимальна сила прокатки, МН; – у тому числі питома сила прокатки, МН/мм <sup>a</sup>	68,7  0,023	46  0,013	40  0,0125
Тип пристрою для проміжного охолодження прокату	байпас (дисккові холодильники з можливістю примусового повітряного охолодження до 8 розкатів одночасно)	діючий міжквіттьовий рольганг, природне охолодження до 2 розкатів одночасно	підйомний пристрій, природне охолодження 1 розкату
Установка для прискореного охолодження	УКО, ламінарна (не експлуатується)	УКО, ламінарна	–
Дільниця для проведення ПФО	обмежений об'єм обробки, не більше 20%	можливість обробки 100% прокату	можливість обробки 100% прокату
Наявність систем автоматизації	Система контролю технологічного процесу	Система контролю технологічних параметрів (система простежування)	Система контролю процесу виробництва (включає контроль технологічного процесу)

<sup>a</sup> питомих показників отримано шляхом розділення початкового показника на довжину бочки робочих валків

Стан 3200 має аналогічні питомі показники потужності зі станом 3600. Стан має найкращу, серед порівняних, систему автоматизації, яка повністю керує як технологією так і процесом виробництва загалом. Ускладнення технологічного процесу обумовлене наявністю однієї кліти та відсутністю установки УКО.

На підставі виконаного аналізу можна зробити висновок, що на всіх трьох станах реалізується технологія термомеханічної прокатки, яка в кожному окремому випадку має свої унікальні технологічні особливості.

Вказані особливості, в підсумку, і формують перелік сортаменту, що виробляється. Але кожен стан має резерви для подальшого вдосконалення технології, устаткування та засвоєння нового сортаменту.

## 1.3.2 Широкоштабові стани гарячої прокатки

### 1.3.2.1 Широкоштабовий стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

В Україні є два діючі широкоштабові стани гарячої прокатки. Стан 1700 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» та стан 1680 металургійного комбінату «Запоріжсталь».

Обидва стани мають схоже технологічне устаткування, але виробляють різній (як по переліку марок сталі, так і по якості) сортамент гарячекатаних рулонів.

Розглянемо схему виробництва, основне устаткування та сортамент, що виробляють ці стани.

Широкоштабовий безперервний стан 1700 призначений для виготовлення штаб з вуглецевих та низьколегованих марок сталі товщиною 1,5–9,0 мм, шириною 1000–1540 мм в залежності від сортаменту, в рулонах та з можливістю порізки на листи.

Наразі, стан може виробляти гарячекатані рулоні вагою до 9,0 т на існуючих моталках №№ 1, 2, та вагою до 27 т на новій моталці № 3. Моталка № 3 була встановлена у 2018 р. Слід зазначити, що зараз можливе виробництво рулонів, зі змотуванням на моталці № 3, вагою 10–15 т, в залежності від сортаменту. Подальше збільшення ваги наразі обмежене розкочувальними полями чорнової групи клітей.

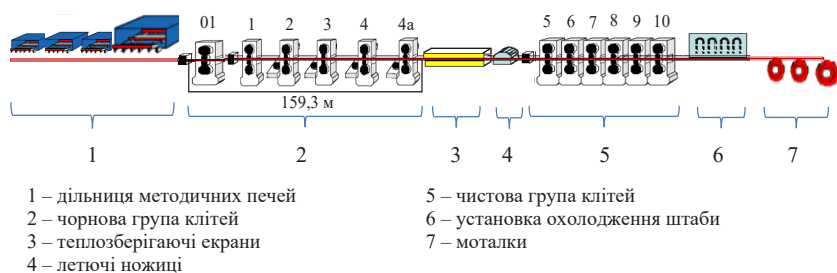
Поточний стан устаткування та технічних можливостей стану 1700 є тимчасовим, так як стан 1700 знаходиться в стадії модернізації. Наразі завершений тільки перший етап.

У залежності від вимог замовників та стандартів, стан 1700 виробляє продукцію в гарячекатаному стані та з додатковим прискореним охолодженням.

Заготовкою для стану є безперервнолиті сляби, виробництва конвертерного цеху «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», також в невеликих об'ємах використовуються сляби «МК «АЗОВСТАЛЬ», товщиною 150–250 мм, шириною 1000–1550 мм, довжиною 2800–6200 мм для нагрівання в печах 3, 4, 5, та довжиною 3800–10500 мм для нагрівання в печі № 1, з крокуючими балками. Слід зазначити, що з огляду на існуючі обмеження довжини розкочувальних полів

чорнової групи, максимальна довжина слябів не може перевищувати 8900 мм. Наразі технічної можливості переробляти сляби товщиною 250 мм стан не в змозі. Виробництво з таких слябів здійснюється за технологією «редукування». Сляб перекачують в кліті Слябінгу до необхідної товщини підкату, а потім віддають для подальшого виробництва на стан 1700 напряму, тобто транзитом, або через повторний нагрів.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.13.



**Рисунок 1.13** – Поточна схема розташування основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

Основне технологічне устаткування стану 1700 включає (див. рис. 1.13) чотири методичні печі, три з яких штовхального типу були модернізовані з метою нагрівання слябів розмірами до  $250 \times 1550 \times 6200$  мм. Одна піч виробництва фірми “Stein Heurtey”, Франція, крокуючого типу з можливістю нагрівання слябів розмірами до  $250 \times 1600 \times 10\,500$  мм. Сляб товщиною 250 мм застосовується для виробництва тільки в разі редукування на Слябінгу; чорнову групу клітей, яка включає одну кліть «дуо» № 01 (чорновий окалиноломатель) та 5 клітей «кварти» (1–4 та 4а), чотири з яких є універсальними (2–4 та 4а). Всі кліті чорнової групи приводяться до дії асинхронними двигунами з постійною швидкістю обертання; теплозберігаючі екрани, для збереження температури штаби перед чистовою прокаткою; летючі ножиці для обрізки переднього торця штаби перед задачею в чистову

групу; чистову групу, що складається з 6-х клітей «кварто» (5–10); 7 гідрозбивів окалини з тиском в межах 80–140 атм.; установку охолодження штаби, яка складається з 14 охолоджувальних секцій; три моталки, дві з яких (№ 1, 2) можуть змотувати рулони вагою до 9 т, одна (№ 3), остання по ходу прокатки, може змотувати рулони вагою до 27 т; дві установки для обв'язки рулонів після змотування; устаткування для обробки рулонів після прокатки (правка, порізка на листи, обрізка крайок, товарна обв'язка рулонів, листів).

Кліті 8, 9, 10 чистової групи обладнані системою автоматизації “Clesim”, системою гідравлічного регулювання противігину валків та системою зсуву валків.

Згідно з проектом, устаткування стану 1700 може виробляти продукцію з тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа.

Слід зазначити, що на початку 70-х років була проведена невдала реконструкція головних ліній клітей №№ 3, 4, 4а зі збільшенням діаметра валків з 650 до 880 мм. В результаті чого, через нераціональні кути нахилу шпинделів, співвідношення діаметрів шийки і бочки робочих валків, а також виведення подушок робочих валків на станини, обтискна здатність чорнової групи не тільки не збільшилася (не досягнула проектних параметрів), а й зменшилася. При цьому фактичні допустимі енергосилові параметри стали вдвічі нижче за проектні. Повернення до первинних характеристик головних ліній пов'язано з великим обсягом робіт і вважалось недоцільним.

Зовнішній вигляд дільниці стану наведено на рис. 1.14.

Стан 1700 призначений загалом для виробництва прокату у рулонах та листах загального та спеціального конструкційного призначення, способом гарячої прокатки, або гарячої прокатки з додатковим охолодженням перед змотуванням. Також стан виробляє рулони як заготовку для подальшої холодної прокатки.

Останні 5 років на стані активно засвоюється виробництво прокату для подальшого виготовлення труб, прокату для посудин, що працюють під тиском та конструкційного прокату способом термомеханічної прокатки. Наявність необхідного устаткування, а також початок реалізації етапів реконструкції дозволяють на сьогоднішній день надалі засвоювати технологію ТМСП.



**Рисунок 1.14** – Зовнішній вигляд деяких клітей чорнової групи (ліворуч) та клітей чистової групи (праворуч) стану 1700

Слід зазначити, що існуюча установка для охолодження прокату не призначена для контрольованого охолодження. Серед обмежень можна відмітити можливість установки охолоджувати тільки верхню частину прокату. Існуюча установка хоча і є ламінарною, однак її конструкція не відповідає класичним установкам УКО, що отримали поширення останні 20–30 років. Незважаючи на недоліки існуючої установки для охолодження прокату, вона працює та дає певний результат.

Таким чином, серед характеристик, що забезпечують можливість стану виробляти продукцію термомеханічним способом прокатки, є наступні:

- наявність печі з крокуючими балками та з можливістю точного керування температурою нагріву, низьким перепадом температур по перерізу слябів. Також піч забезпечує повну видачу слябів при технологічних та аварійних простоях, з метою запобігання їх перегріванню;
- наявність системи автоматизації клітей №№ 8–10, що частково забезпечує дотримання термомеханічних режимів;
- наявність системи контролю технологічних параметрів;
- обладнання стану теплозберігаючими екранами дозволяє керувати температурою розкату перед чистовою прокаткою;
- наявність установки охолодження дозволяє застосовувати її для прискореного охолодження штаби;
- система автоматизації чистової групи дозволяє отримувати необхідну різновтовщинність прокату.

Сортамент прокату, що наразі виробляє стан 1700, наведений в табл. 1.7.

**Таблиця 1.7** – Основні групи сортаменту прокату, що виробляє стан 1700

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення	ДСТУ 2834; ГОСТ 14637; ГОСТ 1577; ГОСТ 19281	Ст1сп, Ст2сп, Ст3сп, 08, 10, 15, 20, категорії 325-390 (09Г2С, 14Г2, 09Г2Д, 17Г1С, 10ХСНД та інші)
	EN 10025-2	S235-S355 всіх категорій
	ASTM A36/A36M	ASTM A36/A36M

Таким чином, стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» поширено виробляє невеликий перелік сортаменту який обмежений технологією гарячої прокатки та гарячої прокатки з додатковим охолодженням. Засвоєння та поширення технології ТМСП суттєво збільшить сортамент стану, що виробляється.

### **1.3.2.2 Широкоштабовий стан 1680 МК «Запоріжсталь»**

Широкоштабовий безперервний стан 1680 призначений для виготовлення штаб з вуглецевих та низьколегований марок сталі товщиною 1,8–8 мм, шириною 1000–1500 мм в залежності від сортаменту, в рулонах вагою до 16 т та в листах.

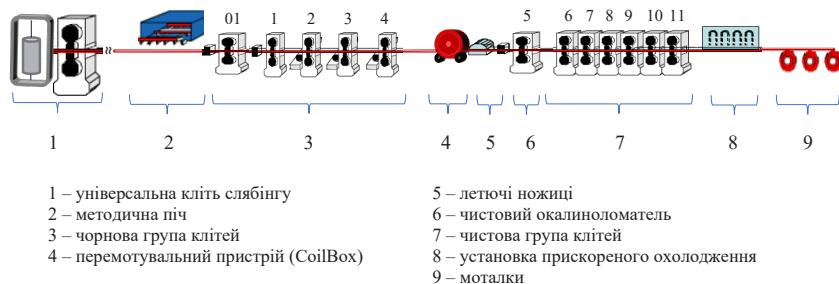
В залежності від вимог замовників та стандартів, стан 1680 виробляє продукцію в гарячекатаному стані та з додатковим прискореним охолодженням.

В якості заготовки на стані 1680 використовуються власні катані сляби, які вироблені зі злиwkів мартенівського виробництва та прокатані в сляби на слябінгу. 95 % слябів зі слябінгу передаються на стан 1680 транзитом, тобто без проміжного нагрівання, 5 % слябів йдуть на повторне нагрівання в методичну піч. З точки зору економії ресурсів існуюча концепція роботи стану 1680 є найефективнішою. Але з точки зору якості, поточного рівня технології

та сортаменту, що виробляє стан, існуюча схема є суттєво застарілою та має багато обмежень. Також слід зазначити, що більшість міжнародних стандартів забороняють використовувати мартенівську сталь, у тому числі для виробництва продукції способом термомеханічної прокатки.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.15.

Основне технологічне устаткування стану 1680 включає (див. рис. 1.15) одну методичну піч штовхального типу для нагріву катаних слябів; чорнову групу клітей включає одну кліть «дуо» № 01 (чорновий окалиноломатель) та 4 клітей «кварто» (1–4), три з яких є універсальними (2–4); перемотувальний пристрій (CoilBox) для збереження та усереднення температури штаби перед чистою прокаткою; летючі ножиці для обрізки переднього торця штаби перед задачею в чистову групу; чистовий окалиноломатель «дуо» (5); чистову групу, що складається з 6-х клітей «кварто» (6–11); установку охолодження штаби; моталки для змотування рулонів вагою до 16 т; устаткування для обробки рулонів після прокатки (правка, порізка на листи, обрізка крайок, товарна обв'язка рулонів, листів).



**Рисунок 1.15** – Поточна схема розташування основного устаткування стану 1680 МК «Запоріжсталь»

Зовнішній вигляд дільниці чорнових клітей та установки CoilBox наведено на рис. 1.16.



**Рисунок 1.16** – Зовнішній вигляд деяких клітей чорнової групи (ліворуч) та установки CoiIBox (праворуч) стану 1680

Стан 1680 був першим безперервним станом гарячої прокатки в Україні, а також на всьому пострадянському просторі. З метою покращення якості прокату у 2007 році на стані встановлено перемотувальний пристрій CoiIBox, що дозволило зменшити перепад температури по довжині штаби перед чистою прокаткою з 50 °С до 20 °С та знизити поздовжню різницю в товщині, по даних технічного звіту комбінату.

Переважну частину сортаменту стану складає продукція, що виробляється згідно з вимогами пострадянських стандартів, технічних умов розроблених комбінатом. Наразі на стані 1680 активно засвоюється виробництво прокату згідно з вимогами EN.

Основним обмеженням для подальшого засвоєння прокату по міжнародних стандартах та відповідного покращення його якості залишається застосування в якості заготовки зливків з властивим їм переліком відповідних дефектів, що переходять на прокат, технологія нагрівання в колодязях, що не забезпечує необхідного рівномірного нагріву по висоті та перерізу зливків та використання 95 % катаних слябів транзитом, який має наслідкувані на попередніх стадіях виробництва недоліки.

Такий стан речей не може бути покращений за допомогою прокатного устаткування, так як в чистовій групі відсутня система автоматизації з противигіном та зсувом валків, яка наприклад є на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Однак стан має устаткування CoiIBox та установку охолодження, що дозволяє розглядати його для дослідного засвоєння технології ТМСР.

Сортамент прокату, що наразі виробляє стан 1680, наведений в табл. 1.8.

**Таблиця 1.8** – Основні групи сортаменту прокату, що виробляє стан 1680

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення	ДСТУ 2834; ТУ У 14-4-426; ГОСТ 14637; ТУ У 14-16-56; ГОСТ 1577; ГОСТ 19281	Ст1-4кп, пс, сп, 08-20кп, пс, 10-20, 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д
	ТУ У 27.1-23365425-621	S235JR, S275JR

Таким чином, стан 1680 МК «Запоріжсталь» виробляє невеликий перелік сортаменту, який обмежений технологією виплавки сталі, технологією гарячої прокатки та гарячої прокатки с додатковим охолодженням. Засвоєння та поширення технології ТМСР суттєво збільшить сортамент стану, що виробляється, при умовах використання безперервнолитої заготовки стороннього виробництва.

### 1.3.3 Стан Стеккеля

Стан Стеккеля являє собою стан, обладнаний з обох боків пічними моталками, що дозволяють утримувати необхідну температуру в процесі прокатки. Такі стани мають в рази меншу довжину, в порівнянні з безперервними широкоштабовими станами, завдяки проміжному змотуванню розкату під час прокатки. Керування температурою підкату в пічних моталках дозволяє отримувати необхідний комплекс властивостей готового прокату в широкому діапазоні, що дозволяє виробляти великий перелік сортаменту, в тому числі прокат спеціального призначення (важкодеформовані електротехнічні та вуглецеві сталі, високоміцні та корозійностійкі мікролеговані сталі) [50, 51, 148, 149, 153, 154].

В Україні станів Стеккеля немає, при цьому в Канаді, Америці, Південній Кореї, Китаї такі стани є поширеними.

Надалі буде розглянуто стан Стеккеля заводу “Ferreira Valsider”, Італія, який входить в компанію METINVEST.

Стан Стеккеля заводу “Ferreira Valsider” призначений для виготовлення:

– товстолистого прокату товщиною 8–200 мм, шириною 1500–3000 мм та довжиною 4000–24 000 мм, з максимальною вагою 30 т;

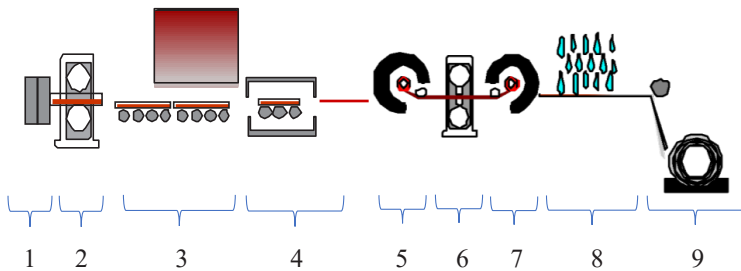
– рулонного прокату товщиною 1,8–25 мм, шириною  $\leq 1500$  мм, з максимальною вагою 30 т.

Товстолистий прокат виробляється в чорновій кліті, в якій також виробляється заготовка – катані підкати для безпосередньої прокатки на стані Стеккеля. Далі буде розглянуто лише сортамент, що виробляється в рулонах як кінцева продукція стану Стеккеля.

Заготовкою для стану є безперервноліті сляби, виробництва «МК «АЗОВСТАЛЬ» та ММК «ІМЕНІ ІЛТЧА», товщиною 150–250 мм, шириною 1000–1500 мм, довжиною до 10 000 мм.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.17.

Основне технологічне устаткування стану Стеккеля включає (див. рис. 1.17) штовхальну піч, що має шість зон для нагрівання



- 1 – кліть з вертикальними валками
- 2 – чорнова кліть 3170
- 3 – методична штовхальна піч
- 4 – прохідна роликівна піч

- 5, 7 – пічні моталки стану Стеккеля
- 6 – кліть «кварто» 1780 стану Стеккеля
- 8 – установка ламінарного охолодження
- 9 – моталка

**Рисунок 1.17** – Поточна схема розташування основного устаткування стану Стеккеля заводу Ferreira Valsider

слябів, виробництва фірми Bendotti, яка опалюється природним газом, продуктивністю 120 т/год; стан 3170 для прокатування плит (товстолістового прокату) та підкату для стану Стеккеля, і включає реверсивну кліть дуо з силою прокатки до 25МН, та кліть з вертикальними валками; прохідну семизонну роликову піч для проміжного підігріву та вирівнювання температури по перерізу підкату, яка опалюється природним газом; стан Стеккеля включає реверсивну кліть кварто 1780 з силою прокатки до 24 МН та печі камерного типу з барабаними моталками, які опалюються природним газом та розташовані з обох боків прокатної кліті; установку для ламінарного охолодження полоси після прокатки довжиною 41 м, яка дозволяє охолодити метал зі швидкістю до 40 °С/с; моталки для змотування полоси товщиною до 25 мм; устаткування для подальшої обробки прокату (порізка, маркування, ультразвуковий контроль (для товстого листа) та інше).

Стан обладнаний системою автоматичного керування технологічним процесом.

Зовнішній вигляд дільниці стану Стеккеля та установки прискореного охолодження наведено на рис. 1.18.



**Рисунок 1.18** – Зовнішній вигляд дільниці стану Стеккеля (ліворуч) та установки прискореного охолодження (праворуч)

Основним сортаментом стану Стеккеля є товстолістовий та рулонний прокат конструкційного призначення, у тому числі стійкого до атмосферної корозії, прокат для суднобудування, вироблення деталей для машинобудування та прокат для виготовлення електрозварних труб великого діаметру. Продукція виробляється у стані гарячої прокатки, нормалізувальної прокатки та термомеханічної прокатки.

Сортамент прокату, що зараз виробляє стан Стеккеля заводу Ferriera Valsider, наведений у табл. 1.9.

**Таблиця 1.9** – Основні групи сортаменту прокату, що виробляє стан 3200

<b>Призначення прокату</b>	<b>Стандарт</b>	<b>Марки сталі</b>
Прокат для подальшого виробництва електрозварних труб для транспортування нафти та газу	API-5L (PSL1, 2)	B, X42, X46, X52, BM, BN, X42R, X42M X42N, X43M, X46N, X52M
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A285/A285M; ASTM A516/A516M	A, B, C, 55, 60, 65
	EN 10028-2; EN 10028-3	P235 GH, P265 GH, P275 всіх категорій
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії	ASME A36/A36M; ASTM A242/A242M; ASME SA283/SA283M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A709/A709M	A36, A242, C, D, 58, 65, A, B, K, 50W, Type A, B
	EN 10025-2; EN 10025-4; EN 10025-5; EN 10083-2; EN 10083-3, EN 10149-2	S235, S275, S355 всіх категорій, S275M-S355ML, S355JOW та інші, C35-C45, 28MN6, 27MNCRB5, 33MNCRB5, 33CRMO4, S355MC, S420MC

Таким чином, можливість стану виробляти продукцію високої якості способом термомеханічної прокатки забезпечує наявність наступного устаткування:

– прохідна піч, яка забезпечує вирівнювання температури по довжині та перерізу підкату, що дозволяє керувати розподілом властивостей прокату по довжині;

– пічні моталки, які дозволяють забезпечити дотримання необхідної температури впродовж всього процесу прокатки (ця можливість на стани наразі не використовується в повній мірі, що обмежує сортамент);

– установка прискореного охолодження, яка забезпечує дотримання необхідних термомеханічних температур прокату;

– система автоматизації технологічного процесу, яка дозволяє керувати необхідними термомеханічними параметрами процесу прокатки.

Слід зазначити, що технічні характеристики та унікальність комплексу устаткування стану дозволяють виробляти і більш різноманітний та міцний сортамент ніж той, що обмежений категоріями міцності типу S420 та X52.

### **1.3.4 Порівняння характеристик станів щодо впровадження технології термомеханічної прокатки**

Таким чином, три стани, які виробляють гарячекатані рулони, що розглянуті в даному розділі мають свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при розробці технології термомеханічної прокатки, табл. 1.10.

Слід зазначити, що на станах для виробництва штаб, на відміну від товстолистових станів, при термомеханічній прокатці технологічна операція з витримки підкатів перед чистою прокаткою для зниження температури приймає протилежне значення. Тобто, замість зниження температури за допомогою, наприклад, повітряного охолодження на байпасі, рольгангу або за допомогою іншого пристрою, на безперервних станах встановлюють устаткування для збереження температури. Таким устаткуванням можуть бути теплозберігаючі панелі, панелі з підігрівом, установки CoilBox, або їх сумісна комбінація. Винятком є стани Стеккеля, в яких утримання температури здійснюється за допомогою пічних моталок.

**Таблиця 1.10** – Порівняння основних характеристик розглянутих прокатних станів

Найменування параметрів	Технічні дані		
	Стан 1700 «ММК ІМЕНІ ЛЛПЧА»	Стан 1680 МК «Запоріж-сталь»	Стан Стекеля заводу «Ferriera Valsider»
1	2	3	4
Тип нагрівальних пристроїв	методичні штовхальні та з крокуючими балками	методична штовхальна	методична штовхальна
Прокатний стан:			
Чорнова група:			
– кількість клітей;	5+дуо	4+дуо	1
– тип;	кварто	кварто	дуо
– середня довжина бочки робочих валків, мм;	1700	1832	3170
– сумарна потужність головного приводу, кВт;	24 000	20 300	4474,2
– середня потужність кліті в групі, кВт <sup>а</sup> ;	4000	4060	4474,2
– питома потужність групи клітей, кВт/мм <sup>б</sup> ;	14,12	11,08	1,41
– середня питома потужність кліті в групі, кВт/мм <sup>б</sup> ;	2,35	2,22	1,41
– сумарна сила прокатки, МН;	118	93	25
– середня між клітями сила прокатки, МН <sup>в</sup> ;	19,67	18,6	25
– питома сила прокатки групи, МН/мм <sup>б</sup> ;	0,069	0,051	0,008
– середня питома сила прокатки, МН/мм <sup>в</sup>	0,012	0,010	0,008
Чистова група:			
– кількість клітей;	6	6+дуо	
– тип;	кварто	кварто	кварто
– сумарна потужність головного приводу, кВт;	45 000	30 003,65	8948,4
– середня потужність кліті в групі, кВт <sup>а</sup> ;	7500	4286	8948,4
– питома потужність групи клітей, кВт/мм <sup>б</sup> ;	26,47	17,86	5,027
– середня питома потужність кліті в групі, кВт/мм <sup>б</sup> ;	4,41	2,55	5,027
– сумарна сила прокатки, МН;	118	–	24
– середня між клітями сила прокатки, МН <sup>в</sup> ;	19,67	–	24

Продовження таблиці 1.10

1	2	3	4
– питома сила прокатки групи, МН/мм <sup>6</sup> ; – середня питома сила прокатки, МН/мм <sup>8</sup>	0,069 0,012	– –	0,013 0,013
Тип пристрою для проміжного утримання температури прокату	теплозберігаючі панелі	перемотувальний пристрій CoilBox	пічні моталки
Установка для прискореного охолодження	охолоджувальна установка ванного типу	охолоджувальна установка ванного типу	УКО, ламінарна
Наявність систем автоматизації	Система контролю технологічним процесом клітей 8–10	–	Система контролю технологічним процесом

<sup>a</sup> показник отримано шляхом розділення суми початкового показника на кількість клітей в групі; <sup>6</sup> показник отримано шляхом розділення суми початкового показника на середню довжину бочки робочих валків; <sup>8</sup> показник отримано шляхом розділення середнього значення початкового показника на середню довжину бочки робочих валків

Порівняння існуючого устаткування трьох досліджених станів щодо реалізації технології термомеханічної прокатки виявило по кожному з них як переваги, так і напрямки для покращення.

В цілому, питомі показники потужності головних двигунів та сили прокатки трьох станів для виробництва рулонів, що були розглянуті можна порівняти.

Стан Стеккеля має найкращі позиції для подальшого вдосконалення технології ТМСП та засвоєння нового сортаменту завдяки унікальним технічним можливостям.

Стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» зараз в повній мірі може виготовляти продукцію у стані ТМСП, з деякими обмеженнями по категорії міцності сортаменту.

Головним обмеженням є використання існуючої установки для охолодження, яка не дозволяє керувати температурним режимом, а також має можливість охолоджувати тільки одну поверхню прокату.

Стан 1680 МК «Запоріжсталь» безпосередньо може виготовляти продукцію у стані ТМСП з обмеженнями, властивими стану 1700,

та з деякими змінення митехнології, з огляду на наявність установки CoilBox. Головним обмеженням є використання гарячекатаних слябів зі зливків, а також переважне використання транзитної прокатки.

На підставі виконаного аналізу можна зробити висновок, що безпосередньо на стані 1700 та стані Стеккеля використовується технологія термомеханічної прокатки, яка в кожному окремому випадку має свої унікальні технічні та технологічні особливості. На стані 1680 впровадження технології ТМСР потенційно можливе. Особливості устаткування станів, в підсумку, і формують перелік сортаменту, що виробляється. Кожен стан має резерви для засвоєння сортаменту ТМСР, подальшого вдосконалення технології та устаткування.

#### **1.4 Аналіз сучасних тенденцій вдосконалення устаткування прокатних станів, що виробляють продукцію способом термомеханічної прокатки**

Розглянемо сучасні напрямки вдосконалення устаткування по типах прокатних станів:

*Товстолістові прокатні стани*

- підвищення потужності робочих клітей [178];
- встановлення систем осьового зсуву валків [178];
- обладнання системами ламінарного охолодження, які в залежності від виробника мають назви “Laminar cooling system” компанії “SMS” або “MULPIC”, компанії “Primetals” з максимальною швидкістю охолодження до 45 °C/c (вказані два найвідоміших виробника прокатного устаткування та їх запатентовані продукти) [179];
- встановлення додаткових секцій підвищеного тиску для збільшення швидкості охолодження до 100 °C/c, які застосовуються при виробництві високоміцного сортаменту типу X80 та вище та дозволяють здійснювати загортання з прокатного нагріву [178];
- розширення систем автоматизації станів з метою контролю профіля прокату, площинності, контролю структурних перетворень в процесі прокатки, та якості поверхні [178, 180].

Безперервні *стани* гарячої прокатки:

– встановлення проміжних перемотувальних пристроїв, або CoilBox з додатковим екрануванням бокових крайок між чорною та чистою групами клітей, що дозволяє мінімізувати падіння температури, зменшити перепад температури між внутрішніми та зовнішніми вітками, значно скорочує відстань між групами клітей при проектуванні нового стану [181, 182];

– встановлення калібрувального пресу для зменшення ширини слябів перед прокаткою, що дозволяє підвищити універсальність слябів, які використовуються, по ширині [182];

– підвищення потужності робочих клітей [183], встановлення пристрою стабілізації кліті для усунення зазору між подушками та станиною [184], встановлення систем осьового зсуву валків та кліті з перехрещенням валків в горизонтальній площині, що дозволяє контролювати профіль поперечного перерізу штаби [182];

– обладнання системами ламінарного охолодження [179];

– встановлення систем посиленого охолодження для виробництва високоміцних марок сталі типу X80 та вище, двофазних або багатофазних марок сталі, мартенситних марок сталі [181]. Система може бути встановлена між чорною та чистою групами, між клітями чистої групи та як додаткова секція до системи ламінарного охолодження. Система дозволяє охолоджувати штабу зі швидкістю до 233 °C/с для товщини 25,4 мм [182];

– розширення систем автоматизації станів з метою контролю профіля прокату, площинності, контролю структурних перетворень в процесі прокатки [185–191], контролю якості поверхні штаби при її виробництві [180].

Комплексним проектним рішенням, яке дозволяє серед інших можливостей поширено використовувати технологію ТМСР, є будівництво ливарно-прокатних модулів, або так званих комплексів ESP (endless strip production), тобто комплексів для виробництва нескінченних штаб [186, 192, 193].

Поміж іншого, сучасна тенденція вдосконалення устаткування для виробництва штабового гарячого прокату спрямована на часткову заміну сортаменту холодного прокату – гарячим. Комплекси сучасного устаткування дозволяють виробляти гарячекатані штаби

товщиною від 0,8 мм до 25 мм з толерансом по товщині не більшим, ніж 1 %, що не в змозі забезпечити навіть деякі стани холодної прокатки [181, 192].

Окремо розглянемо дослідження напрямків модернізації широкоштабових станів гарячої прокатки.

Суттєвими недоліками гарячекатаних рулонів, що виробляються в нашій країні, в порівнянні зі світовими виробниками, є мала вага та вузький марочний сортамент.

Частковим вирішенням проблеми з вагою може бути синхронізація роботи клітей стану. У всьому світові широко застосовуються системи синхронізації розливки та гарячої прокатки, які розроблені для досягнення різноманітних цілей [119, 186, 194, 195]. Комплексні системи синхронізації, запропоновані авторами робіт [194, 195], спрямовані на зменшення собівартості прокату, зниження додаткових витрат, підвищення продуктивності виробництва. Локальні системи синхронізації спрямовані на зниження витрат на паливо, наприклад на 20 %, як запропоновано в роботі [186], автоматичне планування виробництва та інше.

Особливу цікавість становить робота [119], в якій автори запропонували рішення по керуванню (комплексна синхронізація роботи прокатного стану) устаткуванням задля здійснення технології безперервної гарячекатаної прокатки рулонів. Також окрему цікавість становить робота [196], в якій запропоновані рішення по синхронізації роботи двигунів, у тому числі на безперервних станах. Ці рекомендації безумовно мають місце при їх впровадженні на відповідному устаткуванні. Застосувати ці рекомендації до існуючого устаткування, наприклад, стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛПЧА» з наявністю двигунів із різною постійною швидкістю обертання неможливо, тож синхронізацію потрібно впроваджувати іншими способами.

Таким чином, різноманітні розробки авторів по синхронізації комплексів ливарно-прокатного виробництва чи окремого устаткування прокатних ліній мають унікальні особливості, які не завжди можуть бути застосовані до існуючого устаткування інших виробників.

Для комплексного вирішення проблеми збільшення ваги та розширення сортаменту необхідно виконати оцінку поточного стану

технології та устаткування, та розробити поетапну стратегію модернізації виробництв. Кожен етап модернізації проводиться з метою поступового забезпечення цільових умов для виробництва продукції. Так, в роботі [120] автори пишуть про поетапний розвиток та модернізацію ШСГП з заміною реверсивної чорнової кліті на безперервну групу клітей, встановленням CoilBox, пристрою проміжного охолодження полоси. Автором запропоновано використання прохідної індукційної печі, яка забезпечує рівномірність температури на кінцях розкату. Окремо, автором роботи [52], розглянуто становлення етапу модернізації в якому ще вироблялись рулони з малою вагою. Автор роботи [51] наводить в деталях всі етапи розвитку широкоштабових прокатних станів, останнього покоління яких мають одну або дві чорнові реверсивні кліті та установку CoilBox, або без неї. Слід зазначити циклічність процесів модернізації широкоштабових станів від реверсивних чорнових клітей до неревверсивних чорнових груп та повернення знову до реверсивних чорнових клітей, але вже з сучасними технічними характеристиками.

Так, сучасні комплекси ШСГП виробляють рулони товщиною до 1,2 мм з вагою до 35 т, а стани «безперервної прокатки» останнього покоління можуть виробляти гарячекатані безперервні штаби товщиною до 0,8 мм [51], що відповідає сучасним потребам переробників прокату.

Окремим питанням є розрахунки проектів модернізації. Відомо багато математичних моделей [53–56, 121–125], які автори рекомендують використовувати для проектування технології. Однак інформація про можливості їх використання для модернізації устаткування відсутня, так як більшість моделей жорстко прив'язана до конкретного прокатного комплексу та не враховує можливість використання у розрахунках додаткового устаткування. Але гнучкі моделі, завдяки яким можливо проектувати як технологію, так і розраховувати будь який комплекс устаткування, є в інжинірингових компанія, та вони мають обмежений доступ.

Таким чином, сучасні широкоштабові стани мають значно ширший, в порівнянні з вітчизняними станами, сортамент та відповідний набір устаткування.

### *Стани Стеккеля:*

– підвищення потужності робочих клітей, встановлення пристрою стабілізації кліті для усунення зазору між подушками та станиною, встановлення систем осьового зсуву валків та кліті з перехрещенням валків в горизонтальній площині, що дозволяє контролювати профіль поперечного перерізу штаби [197];

– встановлення додаткової чистової групи з двох або трьох клітей [197];

– обладнання системами ламінарного охолодження [197];

– встановлення систем посиленого охолодження для виробництва високоміцних марок сталі типу X80 та вище, двофазних або багатофазних марок сталі, мартенситних марок сталі. Система може бути встановлена між чорною та чистою групами, між клітями чистової групи та як додаткова секція до системи ламінарного охолодження. Система дозволяє охолоджувати штабу зі швидкістю до 233 °C/с для товщини 25,4 мм [197];

– розширення систем автоматизації станів з метою контролю товщини в тому числі в головній та хвостовій частинах, контролю профіля прокату, площинності, контролю структурних перетворень в процесі прокатки, та контролю якості поверхні штаби при виробництві [180, 197].

Вищим рівнем автоматизації для всіх типів прокатних станів є встановлення оптимізаційних систем планування, контролю виробництва та керування технологією [198, 199].

Вказаний перелік устаткування частково стосується загального покращення якості продукції, що виробляється, та не обмежений технологією ТМСП.

Значення та характеристики устаткування, що вказані, є орієнтовними та розробляються індивідуально в залежності від переліку вимог замовників, з урахуванням сортаменту, місця встановлення, характеристик іншого устаткування, задіяного в технологічному процесі.

## 1.5 Аналіз етапів розробки технології термомеханічної прокатки

При розробці технології ТМСП, для вибору варіанту процесу, який буде прийнятним та забезпечить питомий результат в технічних умовах конкретного прокатного стану необхідно виконати детальний аналіз кожного з технологічних етапів.

Процес розробки хімічного складу для термомеханічного прокату є початковим процесом розробки технології, який водночас повинен враховувати вплив кожного з наступних технологічних етапів та устаткування на формування кінцевих властивостей прокату.

Хімічний склад сталей для виготовлення термомеханічного прокату відрізняється мікролегуванням елементами, кожен з яких має свій унікальний або комплексний вплив на властивостей готового прокату. Основні елементи, що містяться в сталі для виробництва термомеханічного прокату, наступні: С, Мn, Nb, V, Ti. Для отримання підвищених категорій міцності додатково використовується Mo. Останнім часом поширено досліджується додаткове використання Cu, Ni, Cr, B [79, 82, 85, 87].

Вплив вуглецю – сучасні тенденції з виробництва сталей для ТМСП спрямовані на зниження вмісту вуглецю. Для цього є декілька причин: по-перше, зниження вуглецю призводить до підвищення пластичності, ударної в'язкості, опору крихкому руйнуванню, по-друге, зниження вуглецю покращує зварюваність прокату [200, 201]. До того ж вимоги до зварюваності регламентовано стандартами на виробництво продукції та розраховуються згідно з встановленими залежностями  $CE$  та  $CEP_{cm}$  [165–169]. Додатковим ефектом від зниження вмісту вуглецю є підвищення розчинності нітридів та карбонітридів ніобію і ванадію в аустеніті при нагріванні. Завдяки цьому частина ніобію та ванадію може бути переведена в твердий розчин при температурі нагрівання під прокатку, що призведе до подальшого його виділення та запуску іншого механізму впливу на мікроструктуру та зміцнення в процесі прокатки [201].

Вплив ніобію – ніобій гальмує процеси рекристалізації деформованого аустеніту. Основною причиною гальмування рекристалізації аустеніту ніобієм є в тому, що рух дислокацій та границь зерен

гальмується розчиненими атомами, а також дисперсною фазою, яка утворюється в інтервалі температур термомеханічної прокатки. Різниця в атомних радіусах ніобію та заліза призводить до спотворення кристалічної решітки твердого розчину та відповідним гальмуванням процесів дифузії. Таким чином ніобій дозволяє подрібнити зерна аустеніту, знизити температуру  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення та дисперсійно, зміцнити прокат [79, 200, 201].

Вплив ванадію спостерігається при температурах, нижчих за 850 °С, коли відбувається інтенсивне виділення карбонітридів ванадію. При температурах вищих за 900 °С ванадій суттєво не впливає на швидкість рекристалізації аустеніту. При цьому ванадій створює багато часток в процесі  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, які забезпечують дисперсійне твердіння [79, 200]. Керування співвідношенням у сталі Nb/V дозволяє керувати таким параметром готового прокату, як співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ .

Вплив титану – титан формує нітриди, які є стабільними при високих температурах в аустенітній області та дозволяють контролювати розмір зерна аустеніту при температурі нагрівання перед прокаткою [200].

Таким чином гальмування рекристалізації аустеніту дозволяє подрібнити кінцеву структуру металу. Це пов'язано з тим, що нерекристалізований аустеніт, який має велику кількість потенційних центрів для зародження нової фази, забезпечує високі швидкості її зародження при  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворенні [201].

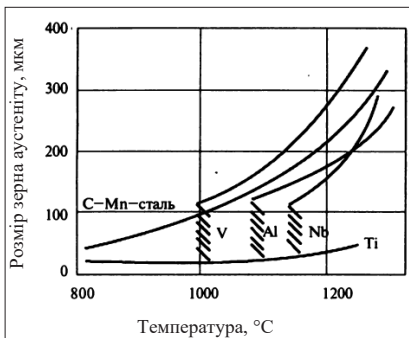
Хімічні елементи, які входять до складу аустеніту, такі як вуглець, марганець, мідь, хром, нікель та молібден, знижують температуру початку розпаду аустеніту [201].

Процес виплавки, додаткові технологічні операції обробки сталі такі, як обробка в печі-ковші, вакуумування та безперервна розливка, спрямовані на забезпечення необхідного хімічного складу, його усереднення в об'ємі, мінімізацію вмісту шкідливих домішок (сірки, фосфору, азоту, водню) та їх сегрегації в центральну частину заготовки для запобігання крихкості металу.

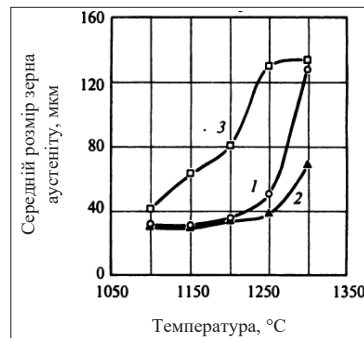
Охолодження слябів після розливки – наразі поширено використовується уповільнене охолодження слябів в стопці тривалістю від 48 до 96 годин для видалення водню.

Прокатка слябів без охолодження здебільшого використовується в ливарно-прокатних модулях з проміжним підігрівом крайок заготовки, або для організації гарячого посаду в печі слябів з метою економії енергоресурсів. Вплив такої технології на формування необхідної мікроструктури та властивості прокату, за рахунок виключення стадії нагрівання заготовки, наразі є дискусійним.

Нагрівання слябів перед прокаткою має декілька напрямків реалізації, один з яких – нагрівання до температури аустенізації 1180–1220 °С, здебільшого застосовується на штабових станах, через збільшені втрати температури при виробництві тонкого сортаменту, другий напрямок – нагрівання до температури аустенізації 1100–1150 °С, який застосовується на товстолистових станах. Температура та тривалість нагрівання слябів є одним з інструментів керування розміром зерна аустеніту та кількістю мікролегуючих елементів, які перейдуть в твердий розчин для впливу на формування мікроструктури в процесі ТМСП. Приклад впливу окремих та комплексу мікролегуючих елементів на зростання зерна аустеніту в сталях при нагріванні наведено на рис. 1.19, 1.20 [200].



**Рисунок 1.19** – Характер зростання зерна аустеніту в сталях при нагріванні з різними мікролегуючими добавками [200]



**Рисунок 1.20** – Вплив температури нагрівання на розмір аустенітного зерна в сталі мікролегованій малим додаванням Ti ( $Ti/N=3.24$ ) (1), додаванням 0,02% Nb та Ti ( $Ti/N=3.33$ ) (2), сталь з підвищеним вмістом Ti ( $Ti/N=4.55$ ) (3) [200]

Чорнова прокатка при виробництві продукції способами ТМСП є не тільки технологічною стадією для формозмінення, але і має великий набір можливостей для формування мікроструктури та механічних властивостей, які будуть наслідуватися, рис. 1.21 [200]. Завдяки вмісту мікролегуючих елементів, виділенням їх карбонітридних фаз та регулюванню обтиснення на етапі чорнової термомеханічної прокатки відбувається контрольоване гальмування рекристалізації та зменшення розміру зерен аустеніту.



**Рисунок 1.21** – Співвідношення між діаметром феритного та аустенітного зерен у залежності від технології прокатки: а – двократна товщина; б – трикратна товщина; в – чотирикратна товщина чистового підкату при деформації нижче температури рекристалізації аустеніту [200]

Відомі дослідження мікролегованих марок сталі свідчать, що для отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту, ступінь деформації по проходах повинен бути не меншим за 10% [200]. Ці дослідження зроблені більш ніж 20 років тому, та потребують уточнення з врахування хімічного складу, що отримав змін за цей період. Одним з напрямків розвитку технології чорнової термомеханічної прокатки стало використання двостадійної прокатки [17],

суть якої полягає на першій стадії в виконанні деформації в температурному діапазоні до початку гальмування рекристалізації.

Друга стадія розраховується таким чином, щоб деформацію в чорновій кліті було здійснено з отриманням температури та товщини, необхідних для початку чистої прокатки без додаткових пауз. Така технологія запобігає протіканню збиральної рекристалізації за рахунок зміщення природнього охолодження підкату в зону, коли рекристалізація не відбувається. Цей спосіб доцільно застосовувати, коли необхідно підвищити долю в'язкої складової.

Природнє охолодження після чорнової прокатки спрямоване на досягнення прокатом необхідної температури перед чистою прокаткою, яка розраховується в залежності від температури початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення для кожного хімічного складу сталі, тривалості чистої прокатки, варіанту вибору технології термомеханічної прокатки (з прискореним, або без прискореного охолодження).

Прискорене охолодження після чорнової прокатки – ця технологія набула розвитку останнім часом. Вона використовується для досягнення початкової температури чистої прокатки шляхом прискореного охолодження для зменшення часу протікання збиральної рекристалізації. Цю технологію, при наявності відповідного устаткування, застосовують для охолодження підкатів в товщинах 60–180 мм для отримання кінцевого прокату підвищених категорій міцності [108, 109].

У залежності від наявного устаткування та сортаменту вибирається технологія двостадійної чорнової прокатки, природнього охолодження, або прискореного охолодження підкату, або їх комбінація.

Збереження або вирівнювання температури прокату використовується на штабових станах, або станах Стеккеля для збереження температури відносно довгого підкату (в порівнянні з підкатом для товстостістового прокату) перед чистою прокаткою. Якщо завданням при виробництві товстостістового прокату було якомога швидке зниження температури для початку чистої прокатки, для запобігання протікання збиральної рекристалізації, то при виробництві штаб актуальним є збереження температури підкату, який

здебільшого має порівняльно меншу товщину та, відповідно, більший час охолодження на рольгангу. Для цієї технологічної операції використовуються теплозберігаючі панелі, установки CoilBox, різноманітної конструкції, прохідні печі, на станах Стеккеля – пічні моталки, або комбінація вказаного устаткування.

Чистова прокатка з закінченням прокату при температурі, яка відповідає початку феритного перетворення, здійснюється для отримання відносно-низьких категорій міцності прокату, або більш високої категорії міцності з додатковим використанням мікролегуючих елементів, в умовах відсутності установки прискореного охолодження. Така технологія в більшості застосовується на товстолистових станах та комбінується з проміжним повітряним охолодженням для досягнення підкатом необхідної температури закінчення прокатки.

Чистова одностадійна прокатка на товстолистових та штабових станах повинна закінчуватися на 25–30 °С вище температури початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, для здійснення подальшого прискореного охолодження. Температура початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення розраховується для кожного хімічного складу згідно з залежністю, уточненою автором роботи [28]. За для забезпечення умов термомеханічного процесу, прокат перед прискореним охолодженням повинен мати розподіл температури по довжині та ширині в межах 25–30 °С.

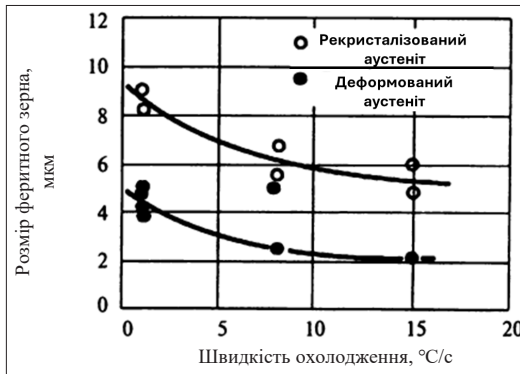
Чистова одностадійна прокатка з проміжним прискореним охолодженням у більшості використовується на широкоштабових станах для досягнення необхідної температури закінчення чистової прокатки, перед прискореним охолодженням. Проміжне прискорене охолодження здійснюється в процесі прокатки між клітьми безперервної групи.

Прискорене охолодження після чистової прокатки здійснюється для отримання ферито-бейнітної структури, яка має більш високу щільність дислокацій в порівнянні з ферито-перлітною, яка утворюється при охолодження на повітрі, що забезпечує більш високу міцність та в'язкість одночасно з механізмом дисперсійного твердіння. Співвідношення впливу подрібнення зерна та дисперсійного твердіння на приріст границі плинності наведено на рис. 1.22 [200].

Температура закінчення прискореного охолодження, зазвичай, знаходиться в межах 580–500 °С. Швидкість охолодження також є одним з механізмів керування властивостями прокату, рис. 1.23 [200, 202].



**Рисунок 1.22** – Співвідношення ефектів подрібнення зерна та дисперсійного твердіння при мікролегуванні сталі Nb, V та Ti [200]



**Рисунок 1.23** – Вплив швидкості охолодження на розмір феритного зерна [200, 202]

Прискорене повітряне охолодження застосовується для зменшення шару окалини та покращення якості поверхні в межах температур між закінченням прискореного охолодження та початком уповільненого охолодження прокату.

Уповільнене охолодження здійснюється для видалення водню зі сталі для запобігання появи таких дефектів як «флокени». Дифузія водню відбувається в межах температур 450–100 °С.

Таким чином, при виборі та розробці варіанту технології термомеханічної прокатки необхідно враховувати вплив кожного з її етапів та конструктивно-структурний склад основного технологічного устаткування.

## Висновки до розділу 1

1. Технологія термомеханічної прокатки на сьогодні є однією з найбільш ефективних, наукоємних та тих, що постійно вдосконалюються. Перелік переваг дозволяє використовувати технологію ТМСР для виробництва майже всіх видів прокату, що призначений для конструювання, будівництва, суднобудування, вироблення посудів під тиском, для виробництва трубопроводів та іншого призначення.

2. Порівнянням технології гарячої та нормалізувальної прокатки з термомеханічною прокаткою встановлено, що технологія ТМСР дозволяє виробляти значно ширший асортимент прокату з більш вищим рівнем механічних характеристик, при інших рівних умовах, при цьому отримувати збалансований, між параметрами пластичності та параметрами міцності, комплекс механічних властивостей. Серед додаткових параметрів властивостей, які характеризують властиві суто технології ТМСР, є вуглецевий еквівалент,  $SE$  та  $SE_{Pcm}$ , співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , випробування падаючим вантажем DWT, та досягнення високого рівня енергії удару, KV.

3. Дослідження, що стосуються процесів термомеханічної прокатки, мають значну кількість. Актуальними є проблеми вивчення змінення розподілу температури по ширині прокату, встановлення закономірностей змінення температури прокатки при використанні такого устаткування, як CoilBox та пічні моталки на стані Стеккеля, дослідження впливу деформаційних процесів при чорновій прокатці на формування вихідної структури термомеханічного прокату.

4. Набули розвитку та поширення дослідження процесів прокатки методами математичного моделювання за допомогою

комп'ютерних технологій. Дослідження напружено-деформаційних процесів термомеханічної прокатки методами скінченних елементів має особливу актуальність в умовах вузьких температурно-деформаційних діапазонів застосування цієї технології.

5. Багато досліджень присвячено лабораторному вивченню процесів ТМСП, в тому числі з використанням сучасного лабораторного устаткування, що підтверджує їх поточну актуальність.

6. У результаті аналізу устаткування вітчизняних та деяких закордонних станів для виробництва товстолистового та рулонного прокату визначено як переваги так і напрямки для покращення, які дозволять підвищити ефективність виробництва та суттєво розширити сортамент прокату, що виробляється за технологією ТМСП. Серед основних переваг прокатних станів є обладнання їх установками УКО, системами автоматизації технологічних процесів.

7. Визначено, що незважаючи на технічний стан, відсутність деякого устаткування на вітчизняних та деяких закордонних станах застосовується технологія термомеханічної прокатки, яка в кожному окремому випадку має свої унікальні технічні та технологічні особливості. Ці особливості, в підсумку, і формують перелік сортаменту, що виробляється. Встановлено, що кожен з перерахованих станів має резерви для засвоєння сортаменту ТМСП, подальшого вдосконалення технології та устаткування.

8. На підставі даних світових інжинірингових кампаній встановлені сучасні тенденції вдосконалення прокатного устаткування, які спрямовані на підвищення потужності прокатних клітей, обладнання установками прискореного охолодження з підвищеною швидкістю, встановлення додаткових охолоджувальних секцій для багатостадійного охолодження, підвищення рівнів автоматизації, що спрямовано на забезпечення перспективних вимог до продукції, а також на подальше вдосконалення технології ТМСП.

9. Встановлено, що при виборі та розробці варіанту технології термомеханічної прокатки необхідно враховувати вплив кожного з її етапів та конструктивно-структурний склад основного технологічного устаткування на формування механічних властивостей готової продукції.

---

## ВИБІР НАПРЯМКІВ І МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

---

### **2.1 Систематизація технологічних етапів процесів термомеханічної обробки плоского металопрокату**

Для визначення перспективних напрямків і методів досліджень необхідно узагальнити технологічні етапи процесу термомеханічної прокатки, враховуючи конструктивні особливості та структурний склад основного технологічного устаткування.

Основою систематизації технологічних етапів процесів ТМСП можуть служити різні нормативні документи та узагальнені наукові праці, які дозволяють охопити широкий перелік можливих варіантів в залежності від сортаменту та конструктивно-структурного складу устаткування для його виробництва [3, 50, 76, 152, 163–166, 200].

Запропоновану систематизацію розроблено, виходячи з принципу від початку виплавки сталі з певним хімічним складом, закінчуючи остаточним охолодженням готового прокату, табл. 2.1, на підставі результатів досліджень процесу термомеханічної прокатки з урахуванням перспективних напрямків його розвитку [3, 5–7, 18–30, 39, 76, 77, 79–82, 85, 86, 88, 89, 93, 94, 96, 107, 108–118]. Систематизацію розроблено наступним чином: для кожного виду прокатної продукції (товстий лист та рулон) у міру збільшення категорії міцності прокату наведені варіанти технологічних операцій в загальному термомеханічному процесі, які підібрані на підставі літературних джерел та власних досліджень.

Вибір з таблиці найбільш прийнятної комбінації технологічних операцій (процесів) з одного боку полегшує задачу, так як перелік може бути вибрано на підставі переліку устаткування, який є, з іншого боку становить складну задачу через багату кількість комбінацій сортаменту (розмірна частина, хімічний склад, категорія міцності прокату) та устаткування з різними технічними характеристиками.

**Таблиця 2.1 – Систематизація технологічних етапів процесів**

ТМСР Етап / Процес	Варіант технології по видах прокату														
	товстий лист							рулон							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6
Категорія міцності прокату	B							X120							X70
Виплавка сталі (розробка хімічного складу)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Безперервна розливка	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Охолодження слябів	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Прокатка слябів без охолодження (гарячий посад / транзит / підігрів / ливарно-прокатний модуль)	X												X		
Нагрівання-аустенізація слябів	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Чорнова прокатки															
Природне охолодження після чорнової прокатки	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Прискорене охолодження після чорнової прокатки															
Збереження-вирівнювання температури підкату															
Чистова прокатка	X														
			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	X														
Прискорене охолодження															
Прискорене повітряне охолодження															
Уповільнене охолодження	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

## 2.2 Вибір та описання методів теоретичних досліджень

Для вирішення основного завдання дослідження щодо розширення сортаменту плоскої металопродукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, яка виробляється способом термомеханічної прокатки, велике значення має отримання рівномірності розподілу механічних властивостей як по площі прокату, так і по товщині.

При термомеханічній прокатці, при заданому хімічному складі, основними технологічними параметрами, які контролюються, а відповідно, і впливають на формування комплексу кінцевих механічних властивостей, є температура та тривалість нагрівання заготовки перед прокаткою, температура початку та закінчення чорнової прокатки, ступінь деформації по проходах, температура початку та закінчення чистової прокатки, відношення товщини чистової заготовки до кінцевої товщини прокату, температура початку та закінчення прискороного охолодження, швидкість прискороного охолодження, тривалість уповільненого охолодження.

Для забезпечення рівномірності розподілу механічних властивостей по площі термомеханічного прокату необхідно розуміння відповідного розподілу температури. При розробці технології термомеханічної прокатки, розрахунок розподілу температури по площі прокату неможливо виконати за допомогою відомих інженерних методів, таких як, наприклад, метод В. Тринкса, В. А. Тягунова, М. А. Зайкова, Ю. Д. Железнова, Б. Л. Цифриновича [58, 129]. Розрахунки даними методами дозволяють встановити тільки середньомасову температуру прокату та не враховують змінення впливу процесів теплообміну на різних його ділянках. При термомеханічній прокатці вирішення цієї проблеми ускладнене врахуванням спільного впливу конвекційного та променевого теплообміну та оцінки співвідношення цього впливу на змінення розподілу температури на різних ділянках прокату.

Для вирішення задачі з оцінки розподілу температури по ширині прокату ефективним є метод елементарних теплових балансів

(метод скінченних різниць). Метод застосовується у разі завдання складних граничних умов, наприклад циклу нагрівання – охолодження або інших [203]. Суть методу полягає в розділенні дослідного матеріалу, в нашому випадку це підкат, на елементарні шари вздовж ширини, а час охолодження – на елементарні відрізки часу, по яких і виконуються розрахунки з урахуванням тепло-фізичних властивостей матеріалу по кожному шару.

Одним з механізмів, який забезпечує спадкову рівномірність розподілу механічних властивостей по товщині термомеханічного прокату, є керування процесом рекристалізації через забезпечення відповідних температурно-деформаційних умов чорнової стадії прокатки. Встановити такі умови можливо експериментальним методом шляхом засвердлювання в заготовку зразків металу, та дослідженням змінення їх стану (форми) після кожного проходу, здійсненого при певних температурно-деформаційних умовах. Цей спосіб є витратним та потребує велику кількість експериментів та макродосліджень після їх проведення. Інший спосіб – це здійснення деформації в широкому діапазоні температурно-деформаційних умов, та подальше загартування зразків, яке можна зробити за допомогою, наприклад, лабораторного комплексу типу Gleeble [204], що також потребує проведення додаткових мікро- та макродосліджень.

Вирішити поставлену проблеми можливо за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) [205, 206]. Метод МСЕ застосовується як інструмент дослідження та проектування у різних сферах науки та техніки, процеси обробки металів тиском не є виключенням. Метод МСЕ дозволяє дослідити процеси пластичного деформування металів без проведення натурних експериментів. Поширення застосування цього методу набуло розвитку з розширенням можливостей комп'ютерної техніки та розробкою спеціалізованих програмних продуктів які дозволяють виконувати проектування на базі методу скінченних елементів серед яких ANSYS, LSDYNA, Abacus та інші.

Суть методу скінченних елементів полягає в моделюванні об'єкту шляхом його розбиття на окремі ділянки, тобто скінченні елементи. В кожному скінченному елементі поведінка об'єкту

описується за окремим набором вибраних функцій, які являють собою напруження та переміщення (деформацію) у вказаному елементі. Ці набори функцій задаються у такій формі, щоб задовільнити умовам безперервності характеристик, які вони описують, у всьому об'єкті. Перевагами методу є зручність формування рівнянь і можливість представлення складних умов напруження [205, 206].

При створенні математичної моделі прийняті наступні умови: в якості інструменту валка було обрано аналітично тверде тіло; симетрична збірка, яка включала верхній валок та половину розкату, обрано з метою скорочення часу розрахунку; в якості закону тертя обрано закон сухого тертя, коефіцієнт тертя розраховано згідно з залежністю, отриманою в роботі [207]; температура металу по проходах розрахована аналітичним способом.

Метод математичної фізики застосовано для дослідження рекристалізаційних процесів, які відбуваються при термомеханічній прокатці, на підставі наявної інформації по розміру зерна аустеніту та відповідних температурно-деформаційних умов. Так для дослідження фізичних процесів рекристалізації застосовано наступні математичні методи інтерполяції [208–211]: лінійна інтерполяція, яка полягала в отриманні рівняння прямої для кожного з відрізків, що поєднує дві точки між собою; квадратична інтерполяція, яка описується функцією з квадратичного тричлена. Інтерполяція проводиться по трьох найближчих точках; інтерполяція кубічними сплайнами, в основі якої є парабола; глобальна інтерполяція вирішенням якої є вирішення системи поліноміальних рівнянь. Методи інтерполяції даних по розміру зерна аустеніту, які використано в роботі, запропоновані авторами робіт [135, 208].

Важливим елементом дослідження силових процесів прокатки залишається метод фізичного моделювання при прокатці свинцевих зразків в лабораторних умовах. Подальшим розвитком цього методу досліджень може бути поєднання його в комплексі з методом подоби та методом аналогій для дослідження сучасних марок сталі, в тому числі тих, що виробляються способом термомеханічної прокатки.

Таким чином, комплексне дослідження силових процесів прокатки на свинцевих зразках з встановленням переліку марок

сталей-аналогів та температурно-деформаційних умов їх застосування можна скласти з наступних етапів.

Метод аналогій використано для визначення переліку марок сталей, які є аналогами зі свинцем, на підставі порівняння їх реологічних властивостей та умов обробки (температура деформації, швидкість та ступінь обтиснення).

Для встановлення зв'язку між реологічними властивостями марок сталі-аналогів та свинцем, з урахуванням умов обробки, використано метод подоби. В якості критерію подоби використано подобу коефіцієнтів регресії поліноміальних залежностей 4-го рівня визначення істинного опору деформації кожної марки сталі-аналога та свинцю.

Метод фізичного моделювання застосовано для вивчення силових характеристик процесу прокатки марок сталі-аналогів на підставі отримання результатів прокатки свинцю в лабораторних умовах.

### **2.3 Методика проведення експериментальних лабораторних та промислових досліджень**

Експериментальні дослідження спрямовано на дослідження реологічних властивостей свинцю, порівняння даних промислових експериментів з результатами моделювання, перевірку розроблених та застосованих теоретичних підходів при розробці та впровадженні технології, отримання необхідного рівня механічних властивостей прокату.

Дослідження реологічних властивостей свинцю проводились в умовах лабораторії кафедри ОМТ ДВНЗ «ПДТУ». Дослідження проводилося через стиснення свинцевих зразків (свинець марки ССу по ГОСТ 1292) на гідравлічній універсальній випробувальній машині моделі Р-20, максимальною силою 0,2 МН, швидкістю ходу штоку 2 мм/с, рис. 2.1.

При випробуваннях на стиснення використовувались 9 зразків циліндричної форми. Розміри зразків наведено в табл. 2.2.



**Рисунок 2.1** – Зовнішній вигляд гідравлічної універсальної випробувальної машини моделі Р-20

**Таблиця 2.2** – Розміри дослідних зразків

Параметр зразка	Номер дослідного зразка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Діаметр, $D_0$ , мм	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Висота, $H_0$ , мм	21,3	23	25	28	31	34,9	38	40	42

Виконуючи по черзі осаджування зразків, за 5 підходів, до кінцевої висоти  $H_k = 19,5$  мм, контактні поверхні яких були попередньо змащені індустріальною оливою марки І-20А, фіксували силу стиснення  $P$ , Н. Температура випробувань  $20$  °С, швидкість деформації  $u = 1c^{-1}$ .

Для визначення коефіцієнту тертя  $f$  між контактними поверхнями, два циліндричних свинцевих зразка з діаметром  $D_0 = 19,5$  мм та висотою  $H_0 = 20,3$  мм додатково осаджували до кінцевої висоти  $H_k = 14,5$  мм, також фіксувалася сила стиснення  $P$ , Н.

Середню силу стиснення для кожного зразку визначали наступним чином:

$$P_{\bar{x}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{5}, \quad (2.1)$$

де  $P_{1...5}$  – сила стиснення за кожне осаджування зразку, Н.

Допуски на відхилення сили стиснення визначали з залежності:

$$\Delta P = \frac{(P_1 - P_{\bar{x}})^2 + (P_2 - P_{\bar{x}})^2 + (P_3 - P_{\bar{x}})^2 + (P_4 - P_{\bar{x}})^2 + (P_5 - P_{\bar{x}})^2}{5}, \quad (2.2)$$

для умов:

$$P_{\bar{x}} - \Delta P \leq P_{\bar{x}} \leq P_{\bar{x}} + \Delta P. \quad (2.3)$$

Обробку результатів експерименту виконано по методиці [212, 213].

Експериментальні промислові дослідження проводилися в умовах діючого прокатного виробництва на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», «МК «АЗОВСТАЛЬ», заводі Trametal та Ferriera Valsider, Італія на наступних станах:

- Стан 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»;
- Стан 3200 заводу Trametal, Італія;
- Стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»;
- Стан Стеккеля заводу Ferriera Valsider, Італія.

Дослідження механічних властивостей прокату та металографічні дослідження виконано стандартизованими методами в умовах атестованих випробувальних та дослідних лабораторій «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», «МК «АЗОВСТАЛЬ» та заводу Ferriera Valsider.

В роботі використано стандартні методи математичної статистики та теорій вірогідності для обробки експериментальної інформації, що наведені в спеціальній літературі [214–216]: для отримання аналітичних залежностей, встановлення зв'язку між технологічними факторами, хімічним складом та механічними властивостями, по результатах експериментів, використано регресійний аналіз та кореляційний аналіз. Для опису отриманих рівнянь використовували лінійну модель, експоненціальну модель, квадратичну модель, степеневу модель та кубічну модель; оцінку впливу технологічних факторів на параметри якості прокату виконувалась на підставі закону Парето та критерія згоди Пірсона; стабільність технологічного процесу оцінювалась за допомогою розподілу Пуассона, визначення середніх значень, стандартного відхилення, правила 3-х сигм. Обробку статистичної інформації виконували в пакетах прикладних програм Statistika та MS Excel.

## Висновки до розділу 2

1.3 метою вибору варіанту реалізації технології ТМСП, в залежності від сортаменту, технологічних підходів та конструктивно-структурного складу основного технологічного устаткування систематизовано технологічні етапи процесів термомеханічної прокатки для виробництва товстолистового та рулонного прокату. Встановлено можливість генерування нових технологічних схем.

2. Для вирішення поставлених завдань з розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей доцільне використання комплексного підходу, що передбачає проведення попередніх експериментів, розробку уточнених моделей оцінки розподілу температури по ширині штаби, напружено-деформаційного стану підкатів, рекристалізаційних процесів, механічні та металографічні випробування готової продукції.

3. Для теоретичних досліджень обрано наступні методи: метод елементарних теплових балансів може дозволити виконати уточнення математичної моделі розподілу температури по ширині штаби, оцінити можливі відхилення температури від допустимих границь впровадження технології ТМСП, а також прогнозувати змінення розподілу температури по проходах; метод скінченних елементів, за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням спеціалізованого програмного забезпечення може дозволити провести імітаційний експеримент з встановлення умов зменшення нерівномірності деформації по товщині підкату при чорновій та чистовій прокатці, що є одним з елементів керування властивостями прокату в процесах ТМСП; поєднання методів подоби, фізичного моделювання та аналогій дозволить встановити перелік марок сталі які є аналогами зі свинцем, температурно-деформаційні умови їх аналогії та отримати можливість прогнозувати силові характеристики їх прокатки в тому числі при термомеханічних режимах, для реальних умов виробництва; методи математичної фізики дозволять виконати інтерполяцію даних по розміру зерна аустеніту при певних температурно-деформаційних умовах та отримати інструмент для керування процесом термомеханічної прокатки на чорновій стадії.

4. Для дослідження механічних властивостей прокату виробленого термомеханічним способом прокатки обрано метод аналізу мікроструктури, метод аналізу неметалевих включень, метод визначення розміру зерна фериту, метод випробувань на розрив, метод випробувань на холодний вигін, метод випробувань на ударну в'язкість, роботу удару, метод випробування на розтягнення при підвищених температурах, метод випробувань на розтягнення у Z напрямку по товщині.

5. Методи математичної статистики та теорії вірогідності застосовано для обробки результатів експериментів, визначення вагомих технологічних факторів та встановлення достовірності отриманих результатів.

---

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШТАБИ ТА ПРОЦЕСІВ РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЛЯ УМОВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ

---

### **3.1 Вдосконалення математичної моделі змінення температурного поля нерівномірно нагрітої штаби, що охолоджується, для умов термомеханічної прокатки**

#### **3.1.1 Отримання вдосконалених залежностей для розрахунку необхідної форми нерівномірного температурного поля методами математичного моделювання**

Метою цього дослідження є пошук такої форми температурного поля, яке повинен мати підкат по ширині після нагрівання, щоб безпосередньо перед прокаткою, яку проводять в кліті стану Стеккеля (рис. 1.17), він мав необхідний градієнт розподілу температур.

Шляхом математичного моделювання зміни температурного поля нерівномірно нагрітої штаби, що охолоджується, розподіл температур по ширині підкату при нагріванні в пічній моталці має бути отримано з урахуванням часу, що проходить від кінця нагріву штаби до початку її деформування на стані Стеккеля.

Для розробки математичної моделі зміни температурного поля в часі був обраний метод елементарних теплових балансів. Обраний метод вимагає умовної дискретизації обсягу штаби і часового проміжку від закінчення нагрівання до початку деформування. Розглядали одновимірну модель, тобто щільність теплового

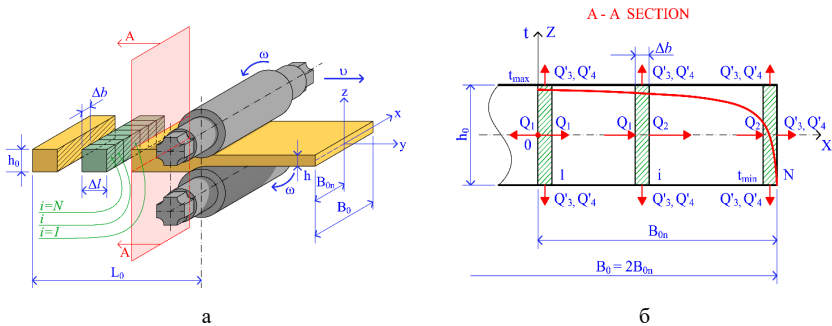
поток  $q$  є функцією тільки координати  $x$  по горизонтальній осі штаби і часу  $\tau$ . Перепадами температури по товщині нехтували у зв'язку з тим, що підкат є термічно тонким тілом, тобто число Біо  $Bi < 0,25$  [217, 218].

Полосу, що нагрівалася, рис. 3.1 [135], умовно розбивали на елементарні об'єми (шари) призматичної форми довжиною  $\Delta x$  та площею  $F = h_0 \times l$ .

При умові симетричної відносно осі  $y$  форми температурного поля, рис. 3.1, половина ширини штаби становить  $B_0 = 2B_{0n}$ , де  $B_{0n}$  – відстань між середнім поперечним перерізом і зниженням з мінімальної (на крайці підкату) температури. Розміри  $\Delta x$  вибираємо невеликими в порівнянні з шириною заготовки  $B_{0n}$  [135].

Приймаємо наступні допущення [135]:

- ізотермічні поверхні в межах одного призматичного елемента є паралельні площині, рівновіддалені один від одного;
- середній тепловий потік, що проходить за елементарний проміжок часу через будь-яку поверхню, пропорційний початковому значенню градієнта температур за цей час;
- тепломісткість елемента зростає (убуває) пропорційно збільшенню (зниженню) температури в середній точці його обсягу, тепловий потік поширюється від більш нагрітих елементів до менш нагрітих елементів.



**Рисунок 3.1** – Розрахункова схема до моделювання температурного поля в підкаті, розбивка на шари (а) та еюра розподілу теплових потоків за шириною (б) [135]

Кількість елементарних об'ємів при розгляді половини ширини підкату [135]:

$$N = \frac{B_{0n}}{\Delta x}, \quad (3.1)$$

тоді порядковий номер кожного елемента  $\Delta x$  позначали як  $i = 1; 2; \dots; N$ . Тобто елемент по середині ширини полоси має порядковий номер 1, а елементу на кромці підкату відповідає порядковий номер  $N$ .

Час від закінчення нагрівання заготовки до початку її деформування позначали через  $\tau$  та розбивали на  $M$  елементарних проміжків  $\Delta\tau$  [135]:

$$M = \frac{\tau}{\Delta\tau}, \quad (3.2)$$

при цьому кожному елементарному проміжку часу  $\Delta\tau$  надавали свій порядковий номер  $j = 1; 2; \dots; M$ . Враховуючи, що специфікою задачі, яка розглядається є «зворотній розрахунок», то  $M$  – індекс розрахованого першого (початкового), а 1 – індекс розрахованого останнього (шуканого) проміжку часу з якого починається охолодження. Величина  $\tau_{(j)} = \sum_{j=1}^{j=1;2;\dots;M} j \cdot \Delta\tau$  підлягає визначенню.

Введемо позначення для температур (тут та всюди в градусах Цельсія, °C):  $t_{ij}$  – температура довільного шару в будь-якому проміжку часу, де  $i$  – номер довільного шару,  $j$  – номер проміжку часу. При заданій формі температурного поля, яку необхідно мати підкату перед деформуванням, рішення задачі буде полягати в пошуку залежності температури  $i$ -го шару  $t_{ij}$  (в проміжку часу  $j-1$ ) від значення температури цього та сусіднього шару в попередній розрахунковий проміжок часу  $j$ .

Елементарна кількість теплоти  $\partial Q$ , яка проходить по нормалі через елементарну ділянку, згідно з основним законом теплопровідності (закону Фур'є) в диференціальній формі [135]:

$$\partial Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \partial F \cdot \partial \tau, \quad (3.3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності для матеріалу полоси при заданих умовах, Вт/м·град;  $\partial F$  – елементарна площа перерізу,

нормально до якій проходить тепловий потік;  $\frac{\partial t}{\partial x}$  – градієнт температур у напрямку осі  $x$ ;  $\partial\tau$  – елементарний проміжок часу.

Тепловий потік, який виходить із поверхні крайки підкату в доквілля при температурах термомеханічної прокатки (ТМСП) складається з променевого та конвекційного.

Променевий тепловий потік підпорядковується закону Стефана – Больцмана [135]:

$$\partial Q = \sigma \left[ (t + 273)^4 - (t_{o.c.} + 273)^4 \right] \cdot \partial F \cdot \partial\tau, \quad (3.4)$$

де  $\sigma = \varepsilon_{ст} \sigma_0$  – коефіцієнт випромінювання чорного тіла, тут  $\varepsilon_{ст} = 0,8$  – ступінь чорноти тіла (полоси), за умов, що випромінювання здійснюється у простір, який значно перевищує розмір полоси,  $\sigma_0 = 5,77 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · град<sup>4</sup>) – постійна Стефана – Больцмана для абсолютно чорного тіла;  $t_{o.c.}$  – температура доквілля (в розрахунках прийнято  $t_{o.c.} = 20$  °С).

Конвекційний тепловий потік підпорядковується закону Ньютона – Рихмана:

$$\partial Q = \infty (t - t_{o.c.}) \cdot \partial F \cdot \partial\tau, \quad (3.5)$$

де  $\infty$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Відповідно до сучасного уявлення теорії теплопереносу, передача тепла від тіл нагрітих вище температури червоного світіння відбувається головним чином випромінюванням. Вплив конвекційного механізму теплопередачі зі зниженням температури поверхні заготовки збільшується. Особливістю стану Стеккіля є те, що впродовж процесу прокатки температуру можна утримувати на необхідному рівні завдяки наявності двох пічних моталок, тобто на рівні необхідному для здійснення термомеханічного процесу. Тому, при постановці завдання враховували теплопередачу випромінюванням та конвекцією.

Складемо рівняння теплового балансу в кінцево-різничній формі для довільного елементарного об'єму  $i$  в момент часу  $j$ , використовуючи рівняння (3.3)–(3.5) [135]:

– кількість тепла, яке входить в ліву грань елемента:

$$Q_1 = \lambda \frac{t_{i-1;j} - t_{i;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0; \quad (3.6)$$

– кількість тепла, яке виходить через праву грань елемента:

$$Q_2 = \lambda \frac{t_{i;j} - t_{i+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0; \quad (3.7)$$

– кількість тепла, яке виходить випромінюванням через бокову (вільну прямокутну) поверхню довільного елемента [135]:

$$Q_3' = \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x; \quad (3.8)$$

– кількість тепла, яке виходить конвекцією через бокову (вільну прямокутну) поверхню довільного елемента:

$$Q_4' = \alpha (t_{i;j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot \Delta x; \quad (3.9)$$

– кількість тепла, яке випромінюється через крайку підкату [135]:

$$\begin{aligned} Q_3'' &= \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x + \\ &+ \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot B_0 = \\ &= \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot (h_0 \cdot \Delta x + h_0 \cdot B_0); \end{aligned} \quad (3.10)$$

– кількість тепла, яке передається конвекцією через крайку підкату:

$$\begin{aligned} Q_4'' &= \left[ \alpha (t_{i;j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot \Delta x \right] + \left[ \alpha (t_{i;j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot B_0 \right] = \\ &= \left[ \alpha (t_{i;j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot (\Delta x + B_0) \right]. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Якщо прийняти змінення питомої ентальпії [135]:

$$\Delta h = \rho_s \times c \times \Delta t, \quad (3.12)$$

тоді змінення ентальпії шару (елементарного об'єму) [135]:

$$\Delta H = \rho_s \cdot c \cdot (t_{i;j-1} - t_{i;j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x, \quad (3.13)$$

де у формулах (3.12), (3.13):

$\Delta h$ , Дж/м<sup>3</sup> і  $\Delta H$ , Дж – змінення питомої ентальпії и ентальпії елементарного об'єму відповідно;

$\rho_3$  – щільність матеріалу заготовки при заданій температурі, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – теплоємність матеріалу заготовки при заданій температурі, Дж/(кг · град).

Початкові умови [135]:

$$t_{i;M} = t(x;0) = t(x). \quad (3.14)$$

Граничні умови [135]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial t(0; \tau_{(j)})}{\partial x} = 0; t_{1;M} = t(0;0) = t_{max}; \\ t_{1;1} = t(0; \tau_{(M)}) \leq t_{max(km)}; t_{N;M} = t(L_{0n}; 0) = t'_{min} \end{array} \right\}. \quad (3.15)$$

Для забезпечення умов теплового балансу сусідніх шарів заготовки, значення коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$  слід брати при середній температурі сусідніх елементарних об'ємів в момент часу  $j$ , а щільність  $\rho_3$  і теплоємність  $c$  – при температурі шару, який розглядається в момент часу  $j$ .

Враховуючи розміри елементарної ділянки, виконуємо заміну  $\Delta x \rightarrow \Delta b$ ,  $B_0 \rightarrow h_0$ .

Тепловий баланс довільного елементарного шару заготовки:

$$(Q_1 - Q_2 - Q'_3 - Q'_4) \cdot \Delta \tau = \Delta H, \quad (3.16)$$

або, з врахуванням (3.6)–(3.9):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{t_{i-1;j} - t_{i;j}}{\Delta b} \cdot h_0^2 - \lambda \frac{t_{i;j} - t_{i+1;j}}{\Delta b} \cdot h_0^2 - \\ - \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta b - \alpha (t_{i;j} - 20) \cdot h_0 \cdot \Delta b \end{array} \right\} \cdot \Delta \tau = \quad (3.17)$$

$$= \rho_3 \cdot c \cdot (t_{i;j-1} - t_{i;j}) \cdot h_0^2 \cdot \Delta b.$$

З рівняння (3.17) не складно отримати наступне:

$$t_{i;j-1} - t_{i;j} = \frac{\Delta\tau}{\rho_s \times c \times h_0^2 \times \Delta b} \times \left\{ \begin{aligned} &\lambda \frac{t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}}{\Delta b} \times h_0^2 - \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \times \\ &\times h_0 \times \Delta b - \infty (t_{i;j} - 20) \times h_0 \times \Delta b \end{aligned} \right\}. \quad (3.18)$$

Враховуючи, що коефіцієнт температуропровідності  $a_m$ , м<sup>2</sup>/с, матеріалу визначається як [135]:

$$a_m = \lambda / \rho_s \cdot c, \quad (3.19)$$

то рівняння (3.18) можна переписати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} t_{i;j-1} = t_{i;j} + \frac{a_m \cdot \Delta\tau}{\Delta b^2} (t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}) - \\ - \frac{a_m \cdot \Delta\tau}{\lambda h_0} \cdot \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - \\ - \frac{a_m \cdot \Delta\tau}{\lambda h_0} \cdot \infty (t_{i;j} - 20). \end{aligned} \quad (3.20)$$

Тоді отримаємо кінцеву розрахункову формулу для довільного проміжного ( $i$ -го) шару заготовки:

$$\begin{aligned} t_{i;j-1} = t_{i;j} + Fo_{\Delta b} (t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}) - \\ - Fo_{\Delta b} \cdot \frac{\sigma \cdot \Delta b^2}{\lambda \cdot h_0} \cdot \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - \\ - Fo_{\Delta b} \cdot \frac{\infty \Delta b^2}{\lambda \cdot h_0} (t_{i;j} - 20) \end{aligned} \quad (3.21)$$

де  $Fo_{\Delta b} = a_m \cdot \Delta\tau / \Delta b^2$  – критерій Фур'є для елементарного об'єму шириною  $\Delta b$ .

Рівняння теплового балансу шару з максимальною теплоємністю ( $i = 1$ ) складаємо аналогічно формулам (3.17)–(3.18), з врахуванням того, що тепло у даного елементарного об'єму виходить

з двох кромок (правої та лівої). Приймаємо для симетричної скінченно-різницевої форми записи  $i - 1 = i + 1 = 2$ , тоді:

$$\left\{ \begin{aligned} & 2 \cdot \lambda \frac{t_{2;j} - t_{1;j}}{\Delta b} \cdot h_0^2 - \sigma \left[ (t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \times \\ & \times h_0 \cdot \Delta b - \infty (t_{1;j} - 20) \cdot h_0 \cdot \Delta b \end{aligned} \right\} \cdot \Delta \tau = \quad (3.22)$$

$$= \rho_s \cdot c \cdot (t_{1;j-1} - t_{1;j}) \cdot h_0^2 \cdot \Delta b;$$

тоді, температура шару з максимальною теплоємністю:

$$t_{1;j-1} = t_{1;j} + 2 \cdot \lambda \frac{t_{2;j} - t_{1;j}}{\Delta b^2 \rho_s c h_0^2} \cdot h_0^2 \Delta \tau - \sigma \frac{\left[ (t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]}{\Delta b \rho_s c h_0^2} \cdot h_0 \cdot \Delta b \Delta \tau \quad (3.23)$$

$$- \infty \frac{(t_{1;j} - 20)}{\Delta b c h_0^2} \cdot h_0 \cdot \Delta b \cdot \Delta \tau.$$

Після проведення простих перетворень рівняння (3.23), з врахуванням формули (3.19), можна записати кінцеву розрахункову формулу для елементарного об'єму з порядковим номером  $i = 1$ :

$$t_{1;j-1} = t_{1;j} + 2 \cdot Fo_{\Delta b} (t_{2;j} - t_{1;j}) -$$

$$- \sigma \cdot Fo_{\Delta b} \cdot \Delta b^2 \frac{\left[ (t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]}{\lambda h_0} - \quad (3.24)$$

$$- Fo_{\Delta b} \cdot \Delta b^2 \cdot \infty \frac{(t_{1;j} - 20)}{\lambda h_0}.$$

Тепловий баланс шару на кромці з порядковим номером  $i = N$ , враховуючи, що тут тепло додатково виходить випромінюванням та конвекцією через поверхню торця:

$$(Q_2 - Q_3'' - Q_4'') \cdot \Delta \tau = \Delta H. \quad (3.25)$$

Тоді, з врахуванням залежностей (3.7), (3.10), (3.11) і (3.13) можна записати:

$$\left\{ \lambda \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta b} \cdot h_0^2 - \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 (\Delta b + h_0) - \right. \\ \left. - \left[ \infty (t_{i;j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot (\Delta b + h_0) \right] \right\} \times (3.26) \\ \times \Delta \tau = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{N;j-1} - t_{N;j}) \cdot h_0^2 \cdot \Delta b.$$

Після перетворень, аналогічних (3.15)–(3.21), отримаєм наступну формулу для шару на кромці с порядковим номером  $i = N$ :

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + \lambda \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta b^2 \rho_3 \cdot c \cdot h_0^2} \cdot h_0^2 \cdot \Delta \tau - \\ - \sigma \frac{\left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]}{\Delta b \cdot \rho_3 \cdot c \cdot h_0^2} \cdot h_0 (\Delta b + h_0) \cdot \Delta \tau - \\ - \left[ \infty \frac{(t_{i;j} - t_{o.c})}{\Delta b \cdot \rho_3 \cdot c \cdot h_0^2} \cdot h_0 \cdot (\Delta b + h_0) \cdot \Delta \tau \right]; \quad (3.27)$$

після деяких спрощень:

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + \lambda \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta b^2 \rho_3 \cdot c} \cdot \Delta \tau - \sigma \frac{\left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]}{\Delta b \cdot \rho_3 \cdot c \cdot h_0} \times \\ \times (\Delta b + h_0) \cdot \Delta \tau - \left[ \infty \frac{(t_{N;j} - t_{o.c})}{\Delta b \cdot \rho_3 \cdot c \cdot h_0} \cdot (\Delta b + h_0) \cdot \Delta \tau \right]; \quad (3.28)$$

об'єднань параметрів:

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + a_m \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta b^2} \cdot \Delta \tau - \sigma \cdot a_m \frac{\left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]}{\lambda \cdot \Delta b \cdot h_0} \times \\ \times (\Delta b + h_0) \cdot \Delta \tau - \left[ \infty \cdot a_m \frac{(t_{N;j} - t_{o.c})}{\lambda \cdot \Delta b \cdot h_0} \cdot (\Delta b + h_0) \cdot \Delta \tau \right]; \quad (3.29)$$

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + Fo_{\Delta b} \cdot (t_{N;j} - t_{N+1;j}) - \sigma \cdot Fo_{\Delta b} \cdot \Delta b \cdot \frac{\left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]}{\lambda \cdot h_0} \times \quad (3.30)$$

$$\times (\Delta b + h_0) - \left[ \infty \cdot Fo_{\Delta b} \cdot \Delta b \cdot \frac{(t_{N;j} - 20)}{\lambda \cdot h_0} \cdot (\Delta b + h_0) \right];$$

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + \left\{ \begin{aligned} & (t_{N;j} - t_{N+1;j}) - \sigma \cdot \Delta b \cdot \frac{\left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]}{\lambda \cdot h_0} \cdot (\Delta b + h_0) - \\ & - \left[ \infty \cdot \Delta b \cdot \frac{(t_{N;j} - 20)}{\lambda \cdot h_0} \cdot (\Delta b + h_0) \right] \end{aligned} \right\}; \quad (3.31)$$

або у наступному вигляді:

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + Fo_{\Delta b} \left\{ \begin{aligned} & (t_{N;j} - t_{N+1;j}) - \frac{\Delta b \cdot (\Delta b + h_0)}{\lambda \cdot h_0} \times \\ & \times \left( \sigma \cdot \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - \infty \cdot (t_{N;j} - 20) \right) \end{aligned} \right\}. \quad (3.32)$$

Рекурентні залежності (3.2), (3.21), (3.24), (3.32) складають основу розрахунку необхідної форми нерівномірного температурного поля методами математичного моделювання.

### 3.1.2 Отримання залежностей для безперервного розрахунку фізичних та теплофізичних властивостей матеріалу

Величина температур штаби  $t_{i;j-1}$ ,  $t_{1;j-1}$ , та  $t_{N;j-1}$  може коливатися в широких межах в залежності від обраного варіанту нагрівання для реалізації технології гарячої, нормалізувальної або термомеханічної прокатки. При цьому, фізичні і теплофізичні властивості матеріалу є функцією температури. В більшості джерел залежності  $\rho_s$ ,  $\lambda$ ,  $c$  від температури  $t$  задані таблицями, тобто є дискретними, однак для автоматизованих розрахунків температурних полів необхідно мати їх безперервні характеристики.

Сталь, що досліджується в даній роботі є низьковуглецевою, тому надалі розрахунки фізичних та теплофізичні властивості будуть виконуватись для сталей такого типу або їх існуючих аналогів у дослідженнях авторів.

Залежність для безперервного розрахунку щільності сталі  $\rho_s$ ,  $\text{кг/м}^3$ , що прокатується отримана на підставі наступного рівняння [217]:

$$\rho_s = \frac{\rho_o}{1 + 3\beta t}, \quad (3.33)$$

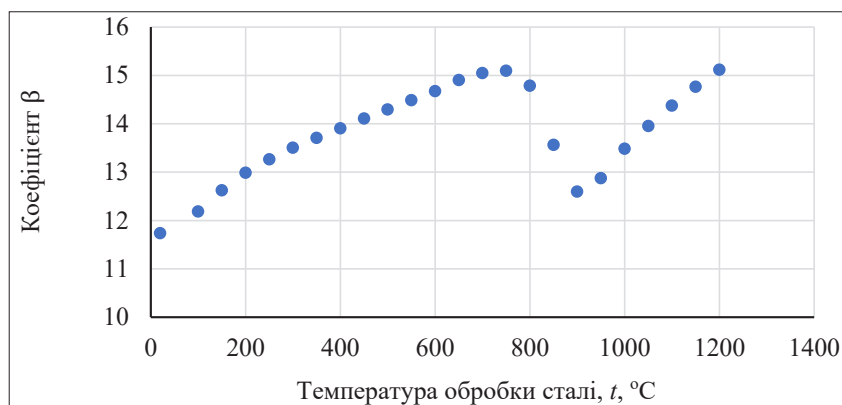
де  $\rho_o$  – щільність сталі при кімнатній температурі,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\beta$  – коефіцієнт лінійного розширення.

Щільність сталі при температурі  $t=0^\circ\text{C}$  розраховуємо на підставі залежності [217]:

$$\rho_o = 7876 - 40C - 16Mn - 73Si - 164S - 117P + \\ + 11Cu + 4Ni + Cr + 95W - 120Al + 100As, \quad (3.34)$$

де  $C, Mn, Si \dots$  – вміст вуглецю, марганцю, кремнію та інших елементів в сталі, %.

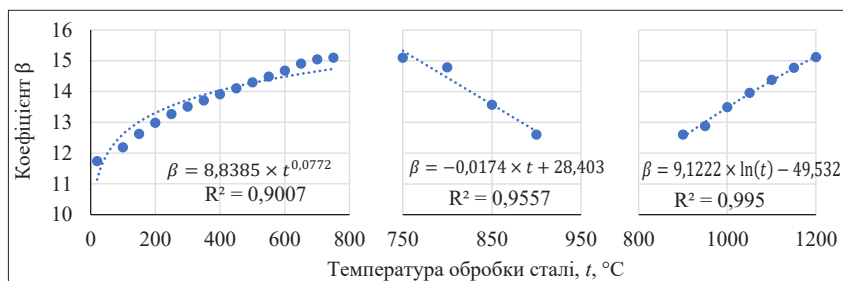
Для визначення залежності коефіцієнта лінійного розширення  $\beta$  від температури  $t$ , виконано обробку дискретних даних по вуглецевій сталі, типу 08 [219], результати якої наведено на рис. 3.2.



**Рисунок 3.2** – Результати обробки дискретних даних по визначенню залежності коефіцієнта лінійного розширення  $\beta$  від температури  $t$

Згідно з рис. 3.2, залежність коефіцієнту  $\beta$  можна розділити на 3 діапазони змінення. Першій діапазон – це збільшення  $\beta$  при зростанні температури від 50 °С до 750 °С, другий діапазон – це зменшення  $\beta$  при зростанні температури вище 750 °С до 900 °С, третій діапазон – це збільшення  $\beta$  при зростанні температури вище 900 °С до 1200 °С.

Відповідно до змінення кожної межі, встановлені залежності для визначення коефіцієнту лінійного розширення по трьох діапазонах температур, рис. 3.3.



**Рисунок 3.3** – Визначення залежності коефіцієнта лінійного розширення  $\beta$  від температури  $t$  по трьох діапазонах температур

Встановлення трьох залежностей замість одної не є проблемою для автоматичного обчислення, до того ж, такий розподіл дозволяє отримати коефіцієнт вірогідності апроксимації  $R^2$  більший за 0,90. Таким чином, коефіцієнт лінійного розширення  $\beta$  визначаємо за допомогою наступних залежностей:

– при температурі обробки сталі від 50 °С до 750 °С

$$\beta = 8,8385 \times t^{0,0772}, \quad (3.35)$$

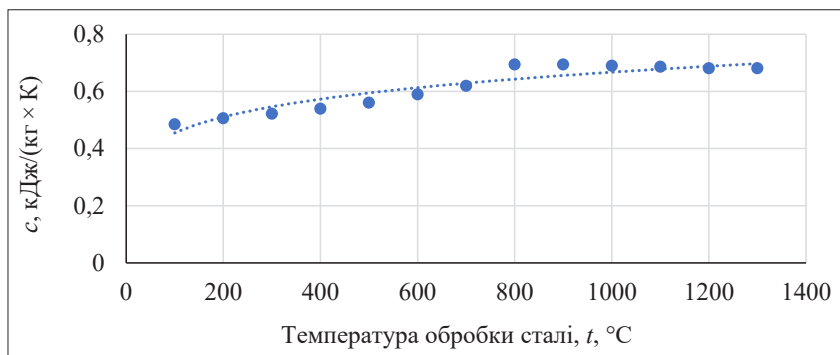
– при температурі обробки сталі >750 °С до 900 °С

$$\beta = -0,0174 \times t + 28,403, \quad (3.36)$$

– при температурі обробки сталі >900 °С до 1200 °С

$$\beta = 9,1222 \times \ln(t) - 49,532. \quad (3.37)$$

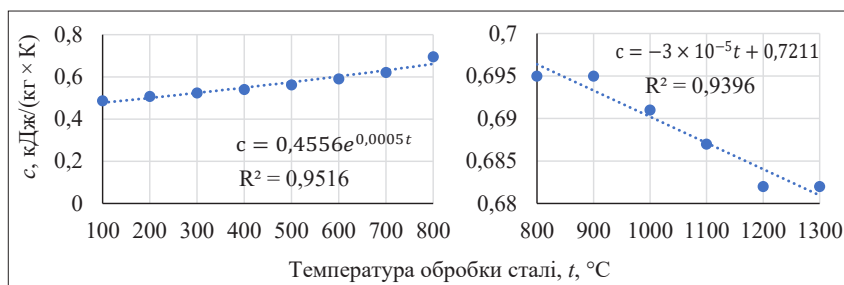
Для встановлення залежності безперервного змінення середньої теплоємності вуглецевої сталі  $c$ , кДж/(кг × К) виконано обробку даних [218], результати якої наведені на рис. 3.4.



**Рисунок 3.4** – Результати обробки даних по змінненню середньої теплоємності вуглецевої сталі  $c$  в залежності від температури  $t$

По аналогії з результатами обробки щільності, змінення теплоємності також можна розділити на діапазони з метою збільшення коефіцієнту вірогідності апроксимації  $R^2$ .

Перший діапазон змінення  $c$  при температурі від 100 °C до 800 °C, другий – при температурі більшим за 800 °C до 1300 °C. Результати обробки наведено на рис. 3.5.



**Рисунок 3.5** – Визначення залежності теплоємності  $c$  від температури  $t$

Середню теплоємність вуглецевої сталі  $c$  визначаємо наступним чином:

– при температурі обробки сталі від 100 °С до 800 °С:

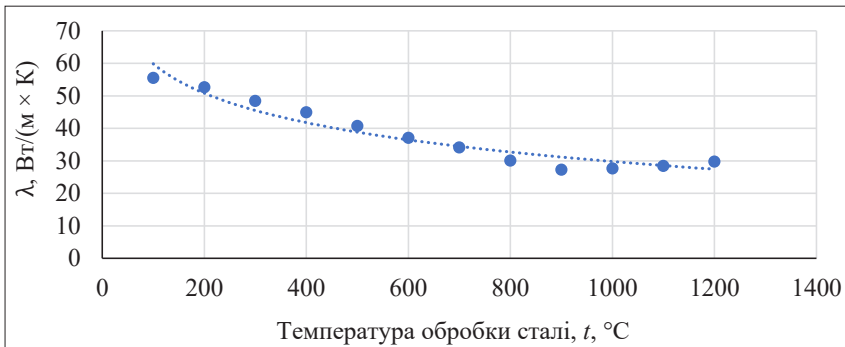
$$c = 0,4556e^{0,0005t}, \quad (3.38)$$

– при температурі обробки сталі >800 °С до 1300 °С:

$$c = -3 \times 10^{-5}t + 0,7211. \quad (3.39)$$

Отримання залежності для розрахунку коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м×К) для маловуглецевих сталей виконувалося по аналогічних методиках.

Результати обробки даних по встановленню залежності коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  від температури сталі  $t$  наведено на рис. 3.6.



**Рисунок 3.6** – Результати обробки даних по змінненню коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  від температури сталі  $t$

При розділенні даних, рис. 3.6, на два температурні діапазони, від 100 °С до 900 °С, та від 900 °С до 1200 °С, отримаємо наступні залежності, рис. 3.7.

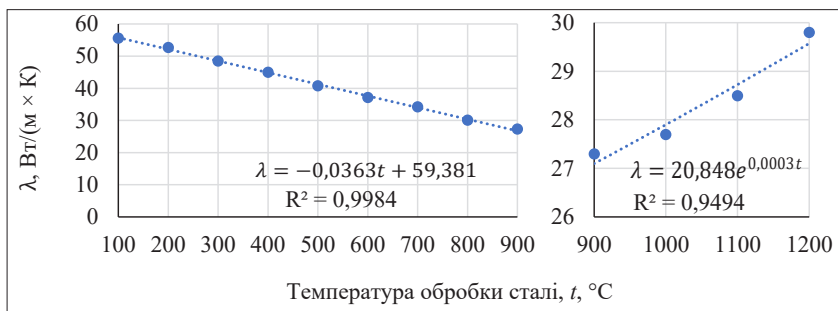
Коефіцієнт теплопровідності по діапазнам температур визначаємо наступним чином:

– при температурі обробки сталі від 100 °С до 900 °С:

$$\lambda = -0,0363t + 59,381, \quad (3.40)$$

– при температурі обробки сталі >900 °С до 1200 °С:

$$\lambda = 20,848e^{0,0003t}. \quad (3.41)$$



**Рисунок 3.7** – Визначення залежності теплопровідності  $\lambda$  від температури  $t$ , по діапазонах

Розрахунок завершують при досягненні часу входження штаби до осередку деформації.

Для забезпечення стійкого розрахунку по формулах (3.21), (3.24), (3.32) та мінімізації і накопичення похибки, слід задовільнити умови критерія Фурьє [135]:

$$Fo_{\Delta b} < \frac{1}{2}. \quad (3.42)$$

Розмір  $\Delta b$  вибирають довільно, однак бажано, щоб  $N$  було не менше ніж 10–15. Тоді для значення  $\Delta t$  повинна виконуватись вимога [135]:

$$\Delta t < \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta b^2}{a_m}. \quad (3.43)$$

Розрахунки температур по формулах (3.21), (3.24), (3.32) здійснюють при вибраному з умов (3.43) значенні  $\Delta t$ . З метою оптимізації

виконують такі ж самі розрахунки при значенні  $\Delta\tau' = \Delta\tau / 2$  і виконують порівняння отриманих температур по всіх шарах з попередніми результатами. Якщо значення  $t_{ij-1}$ ,  $t_{1;j-1}$ , та  $t_{N;j-1}$ , які розраховані при  $\Delta\tau$  та при  $\Delta\tau'$ , відрізняються менше ніж на 1 %, то розрахунки ведуть при останньому значенні  $\Delta\tau'$ ; якщо різниця більша ніж 1 % – розрахунки повторюють при новому значенні  $\Delta\tau'' = \Delta\tau' / 2$ , потім проводять таке ж саме порівняння і так далі.

### 3.1.3 Реалізація моделі, оцінка впливу на результати розрахунку вдосконалення математичної моделі

При термомеханічній прокатці важливо мати розподіл температур, який не повинен перевищувати 25 °С по ширині, що на кінцевій стадії обробці сталі забезпечить мінімальну анізотропію механічних властивостей по ширині прокату.

Апробація розробленої математичної моделі з метою оцінки розподілу температур по ширині підкату після нагрівання, перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля, виконана при наступних умовах:

- матеріал штаби – сталь категорії X65 відповідно до вимог стандарту API-5L;
- розміри штаби: товщина –  $h_0 = 40$  мм, ширина –  $B_0 = 2B_{0n} = 1510$  мм;
- температура нагрівання штаби в пічній моталці  $t = 825$  °С;
- час між виходом штаби з пічної моталки до початку її прокатування становить 8 с.

Хімічний склад сталі, що використовувалась в дослідженні наведений в табл. 3.1.

**Таблиця 3.1** – Хімічний склад сталі, що використовувалась у дослідженні

Марка сталі	Хімічний склад, %														
	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N	B
X65	0,09	1,4	0,23	0,002	0,011	0,036	0,03	0,066	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,007	0,0005

Результати моделювання відповідають умовам рівняння (3.42).

Розмір  $\Delta t$  який використовується в моделі становить 0,00028 час, що задовольняє вимогам формули (3.43), по якій  $\Delta t$  повинно бути менше за 0,047 час.

Базовий розподіл температури штаби на половині ширини, після нагрівання в пічній моталці, який буде використовуватися для подальшого математичного моделювання, наведений в табл. 3.2.

**Таблиця 3.2** – Базовий розподіл температури штаби на половині ширини після нагрівання в пічній моталці для термомеханічних режимів

Відстань від крайки до середини штаби, мм	75,5	151	226,5	302	377,5	453	528,5	604	679,5	755	792,75
Температура, °C	825	825	826	827	827	829	830	830	831	832	833

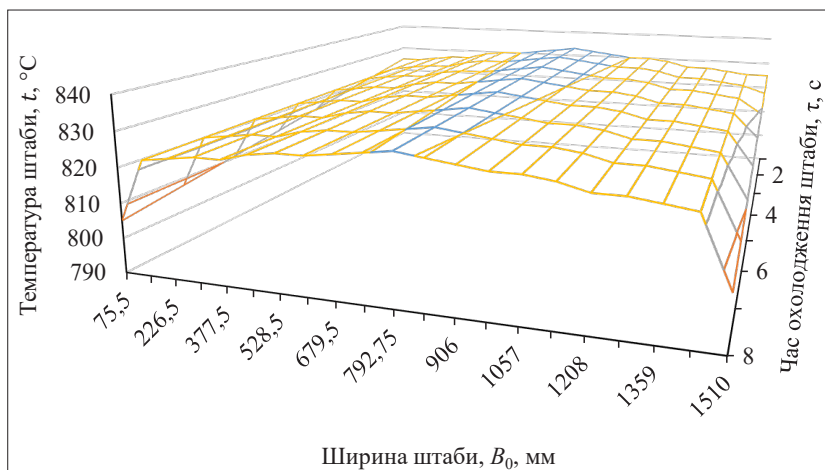
Результати моделювання наведені на рис. 3.8. Згідно з початковими умовами, розрахунок проводили для половини ширини штаби. Для візуалізації, результати розрахунку симетрично спроектовані на другу половину ширини.

По результатах моделювання видно (див. рис. 3.8), що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових крайках штаби.

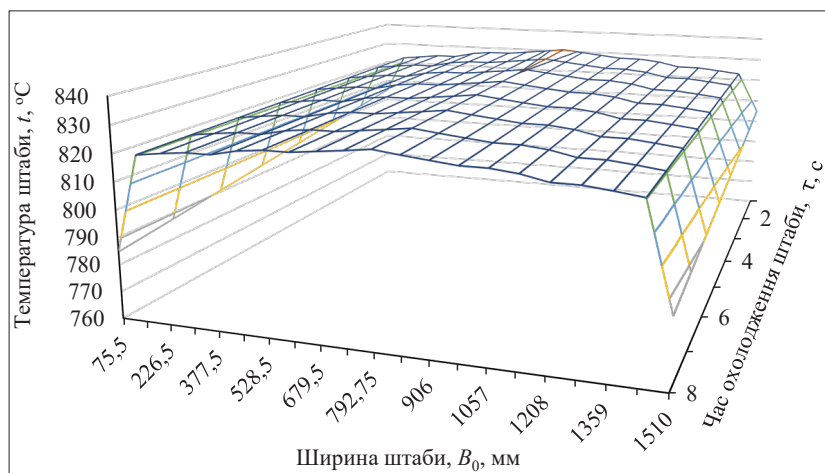
Згідно з початковими умовами, після виходу штаби з пічної моталки, різниця між температурою в середині ширини штаби та на крайці становить 8 °C. Після моделювання змінення розподілу температур перед другим проходом (змінення температури за проміжок часу між виходом з пічної моталки та входом в кліть для здійснення другого проходу), різниця між температурою в середині ширини штаби та на кромці збільшилась до 25,7 °C, що вже межує з допустимим рівнем у 25 °C.

Якщо продовжити моделювання змінення розподілу температури перед третім проходом, без врахування впливу змінення розподілу температур в пічній моталці, різниця між температурою

в середині ширини штаби та на кромці ще збільшиться і складе  $43,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що перевищує умови виконання термомеханічної прокатки, рис. 3.9.



**Рисунок 3.8** – Результати моделювання змінення температури штаби по режимах ТМСП



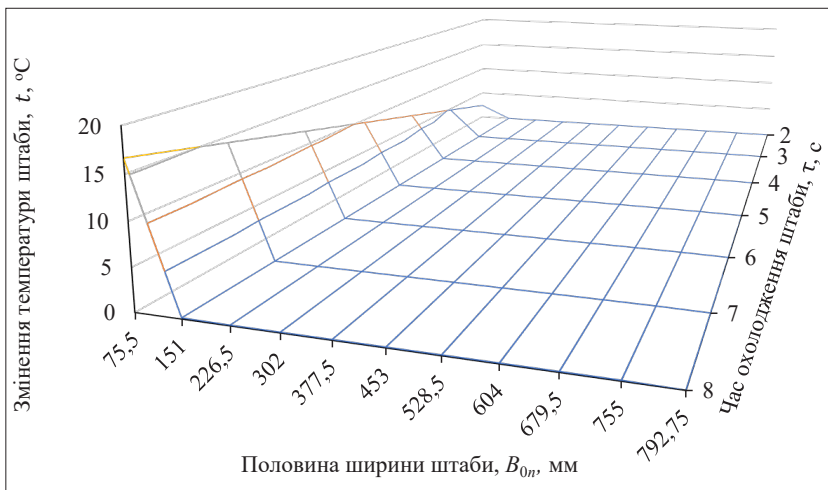
**Рисунок 3.9** – Результати моделювання розподілу температури по ширині штаби перед третім проходом у стані Стеккла

Слід зазначити, що поточний технологічний регламент пічних моталок стану Стеккеля спрямований на забезпечення встановленого температурного режиму, без змінення розподілу температур по ширині. Також необхідно відмітити, що в процесі безпосередньої прокатки, через додатковий вплив охолодження валків та при контакті з валками збільшиться і без того велика різниця розподілу температури по ширині штаби.

Розподіл температур, який буде мати полоса перед третім проходом наведено на рис. 3.9.

Для мінімізації впливу на механічні властивості штаби більш охолоджених бокових кромek, необхідно скорегувати режим нагрівання зі змінням розподілу температур по перерізу пічної моталки, або встановити екранування бокових кромek між пічною моталкою та станом.

З метою окремої оцінки врахування конвекції виконано математичне моделювання температури штаби по ширині в проміжок часу між виходом з печі та началом прокатування в стані Стеккеля. Результати моделювання наведені на рис. 3.10.



**Рисунок 3.10** – Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби по режимах ТМСР

Таким чином, у діапазоні температур, що досліджується (790–830 °С) та відповідають режимам чистової прокатки при ТМСР, втрати тепла конвекцією на крайці штаби, шириною 151 мм, становлять 83 %, тобто з загального зниження температури на крайці, яке становить 19,98 °С, зниження за рахунок конвекції становить 16,66 °С. Ближче до центру штаби вплив конвекції суттєво зменшується та становить від 5,6 % до 0,14 %.

Для порівняння впливу конвекції при гарячій прокатці в діапазоні температур 1050 °С -1100 °С виконане моделювання при наступних первинних умовах:

- матеріал штаби – сталь категорії X65 відповідно до вимог стандарту API-5L;
- розміри штаби: товщина –  $h_0 = 40$  мм, ширина –  $B_0 = 2B_{0n} = 1400$  мм;
- температура нагрівання штаби в пічній моталці  $t = 1100$  °С;
- час між виходом штаби з пічної моталки до початку її прокатування становить 140 с.

Хімічний склад сталі, що використовувалась в дослідженні наведений в табл. 3.1.

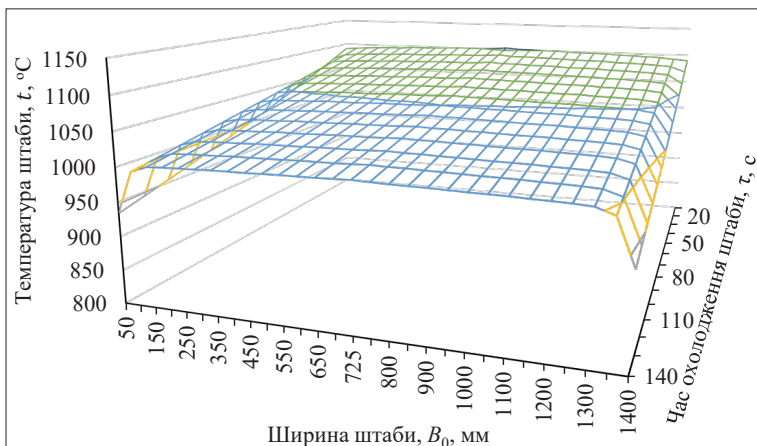
Розмір  $\Delta t$  який використовується в моделі становить 0,039 час, що задовольняє вимогам формули (3.43), по якій  $\Delta t$  повинно бути менше за 0,13 час.

Базовий розподіл температури штаби на половині ширини після нагрівання в пічній моталці, який буде використовуватися для подальшого математичного моделювання, наведений в табл. 3.3.

**Таблиця 3.3** – Базовий розподіл температури штаби на половині ширини після нагрівання в пічній моталці для режимів гарячої прокатки

Відстань від крайки до середини штаби, мм	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	725
Температура, °С	1090	1092	1094	1095	1096	1096	1098	1098	1098	1099	1100	1100	1100	1101	1103

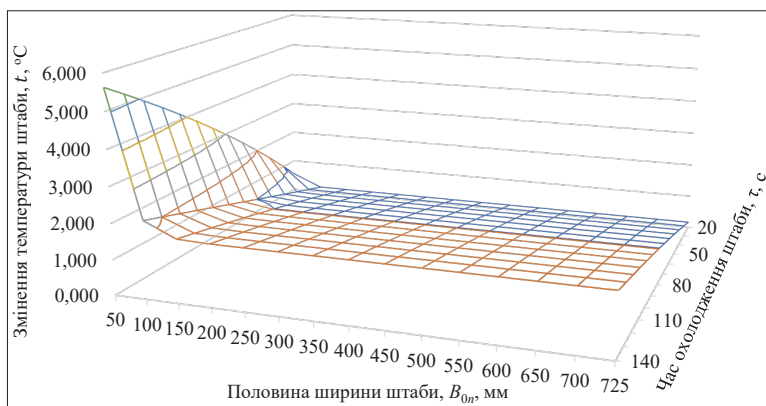
Результати моделювання наведені на рис. 3.11.



**Рисунок 3.11** – Результати моделювання змінення температури штаби по гарячекатаних режимах

За результатами моделювання видно, що так само як і при моделюванні по режимах ТМСР, при гарячекатаних режимах більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових краях штаби.

Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби за режимами гарячої прокатки наведені на рис. 3.12.



**Рисунок 3.12** – Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби по гарячекатаних режимах

Таким чином, у діапазоні температур, що досліджується (1050–1100 °С), які відповідають гарячекатаним режимам, втрати тепла конвекцією на крайці штаби шириною 100 мм становлять лише 3,6 %, тобто з загального зниження температури на крайці, яке становить 156 °С, зниження за рахунок конвекції становить лише 5,6 °С. Відповідно до цього підтверджено необхідність враховувати вплив втрат тепла конвекцією при зниженні температури з 1100 °С до 800 °С.

Для режимів ТМСР, при порівнянні температур на крайці штабі після третього проходу, розрахованих з врахування конвекції та без неї, які становлять 785 °С та 821 °С відповідно, різниця складає 4 %, що є похибкою між двома методами розрахунку температур та вказує на зниження похибки при розрахунку запропонованим методом.

За результатами виконаного дослідження, вдосконалено математичну модель зміни розподілу температурного поля штаби по ширині за рахунок врахування конвекційного теплового потоку.

Виконано оцінку впливу конвекції при моделюванні зміни розподілу температури штаби по ширині за режимами ТМСР, який на крайці шириною від 0 до 151 мм становить від 83 % до 5,6 %, тоді як за режимами гарячої прокатки, вплив конвекції становить лише 3,6 %.

Встановлено, що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових крайках штаби.

Запропоновано рішення для вирівнювання температури бокових крайок через корегування режиму нагріву в пічній моталці, шляхом регулювання роботи пічних пальників, що розташовані біля вхідного/вихідного вікна, або екранування прокату на рольгангах при прокатці.

Вдосконалену модель можливо використовувати для розрахунків зміни розподілу температури плоского прокату, який виробляється по режимах гарячої прокатки, термомеханічної прокатки та її різноманітних варіантів реалізації (високо температурної та низько температурної), а також нормалізувальної прокатки.

## 3.2 Апроксимація діаграм рекристалізації для прогнозування механічних властивостей у залежності від температурно-деформаційних умов прокатки

### 3.2.1 Використання програмного забезпечення для розробки технології термомеханічної прокатки

Рекристалізація є розповсюдженим процесом, який формує структуру металів та сплавів, а, відповідно, і їх структурно чутливі механічні та фізичні властивості [220]. Керування процесом рекристалізації дозволяє отримувати необхідний розмір аустенітного зерна та, відповідно, успадкованого зерна фериту, необхідні механічні властивості.

Для прогнозування механічних властивостей прокату в залежності від розміру зерна поширено використовуються залежності Холла – Петча. Відомо, що середня площа зерна  $S$  залежить від температури  $t$  та ступеню деформації  $e$ , тобто:  $S=f(t, e)$  [208]. Знаючи площу  $S$  зерна, можна розрахувати його діаметр:  $D = \sqrt{4 \cdot S / \pi}$ . Співвідношення Холла – Петча для розрахунку опору деформації  $\sigma_T$  та твердості по Віккерсу  $HV$  мають наступний вигляд [135, 208]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k / \sqrt{D}; \quad (3.44)$$

$$HV = HV_0 + K / \sqrt{D}, \quad (3.45)$$

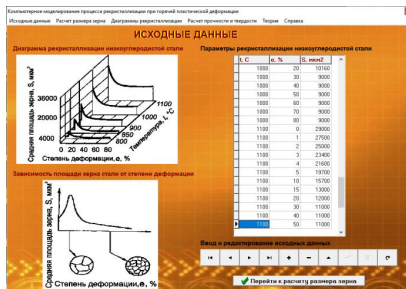
де  $\sigma_0$  – напруження, яке характеризує опір пластичної деформації з боку кристалічної решітки, МПа;  $k$  – коефіцієнт, який характеризує внесок у зміцнення з боку границь зерен;  $HV_0$  – твердість монокристалу по Віккерсу;  $K$  – коефіцієнт, який характеризує твердість монокристалу.

На підставі запропонованих методів інтерполяції, автором роботи [135, 208] розроблено програмне забезпечення в пакеті Borland C ++ Builder 4 (програма “Recrystallization”), для розрахунку та визначення необхідного ступеня деформації при чорновій прокатці низьковуглецевих марок сталі, яке використано при розробці технології ТМСР. По-кроковий розрахунок та визначення ступеня деформації за допомогою програмного забезпечення наведено нижче [135, 208].

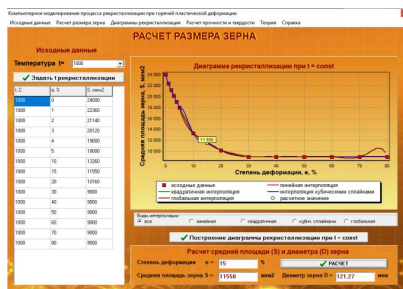
При натисканні на заставку програми відкривається вкладка «Вихідні дані», рис. 3.13 [135, 208]. У лівій частині вікна наведено приклад типової діаграми рекристалізації низьковуглецевої сталі, а в правій частині вікна – таблиця даних діаграми.

Для введення і редагування вихідних даних використовують панель навігації, розташовану в правому нижньому кутку вікна. Для розрахунку розміру зерна натискають кнопку «Перейти до розрахунку розміру зерна», яка розташована під таблицею вихідних даних [135, 208].

Вкладка «Розрахунок розміру зерна» представлена на рис. 3.14 [135, 208]. Як приклад задаємо дані діаграми рекристалізації по рис. 3.13 і виконуємо їх аналіз для температури рекристалізації 1000 °С. Користувач може вибрати один або всі види інтерполяції. При температурі 1000 °С діаграму рекристалізації, рис. 3.14, можна умовно розбити на 4 ділянки: 1) при ступені деформації від 0 до 10% – лінійна ділянка, що характеризується інтенсивним пропорційним зменшенням площі зерна; 2) при ступені деформації від 10 до 20% – ділянка з менш інтенсивним зменшенням площі зерна; 3) при ступені деформації від 20 до 70% – майже лінійна ділянка яка характеризується постійною площею зерна; 4) при ступеня деформації від 70 до 80% – ділянка з логарифмічною залежністю.



**Рисунок 3.13** – Вкладка «Вихідні дані» [135, 208]



**Рисунок 3.14** – Вкладка «Розрахунок розміру зерна», побудова діаграми рекристалізації при  $t = 1000$  °С та розрахунок розміру зерна при  $\epsilon = 15$  %

Найбільш точною, в нашому випадку, є лінійна та квадратична інтерполяція, тому, що при заданій кількості ділянок розбиття заміна відрізків кривої прямолінійними сполученими ділянками та квадратичною функцією дає ламану, близьку до передбачуваної кривої. При ступені деформації  $\varepsilon = 10\text{--}20\%$  спостерігається менш інтенсивне зменшення площі зерна, після чого, при подальшому підвищенні ступеня деформації, зерно залишається майже однако-вим, тому спостерігається невелика осциляція при інтерполяції кубічними сплайнами в межах  $\varepsilon = 8\text{--}20\%$ , а при глобальній інтер-поляції – на ділянці  $\varepsilon = 70\text{--}80\%$ .

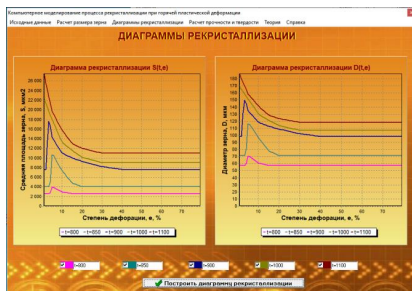
У результаті розрахунків при  $t = 1000\text{ }^\circ\text{C}$  та  $\varepsilon = 15\%$  маємо: середню площу зерна  $S = 11\,550\text{ мкм}^2$ , діаметр зерна  $D = 121,27\text{ мкм}$ , рис. 3.14. Аналогічний аналіз можна провести для будь якої тем-ператури та ступеня деформації, в межах, позначених діаграмою. Наприклад, при  $\varepsilon = 15\%$  розраховували площу та діаметр зерна для інших температур:

- при  $t = 800\text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 2600\text{ мкм}^2$ ,  $D = 7,54\text{ мкм}$ ;
- при  $t = 850\text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 4800\text{ мкм}^2$ ,  $D = 78,18\text{ мкм}$ ;
- при  $t = 900\text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 10\,000\text{ мкм}^2$ ,  $D = 112,84\text{ мкм}$ ;
- при  $t = 1100\text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 13\,000\text{ мкм}^2$ ,  $D = 128,66\text{ мкм}$ .

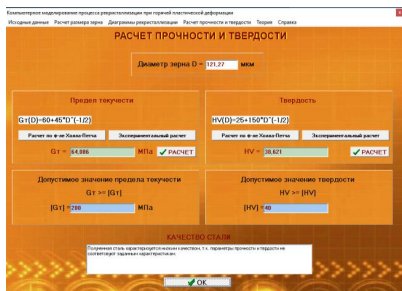
Таким чином, при ступені деформації  $\varepsilon = 15\%$  зі збільшенням температури збільшуються розміри зерна аустеніту. Також дефор-мація у  $15\%$  при температурі  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  забезпечує наближення роз-міру зерна до мінімального, яке можна отримати при деформації у  $20\%$ . При користуванні отриманими даними, для розробки техно-логії, слід враховувати змінення виду діаграм рекристалізації при різних температурах, щоб уникнути меж обтиснення з інтенсивним збільшенням площі зерна.

Вкладка «Діаграми рекристалізації», рис. 3.15, містить побудо-вані діаграми рекристалізації для визначення середнього розміру ( $S$ ) та діаметру зерна ( $D$ ) при різноманітних температурах ( $t$ ) і сту-пенях деформації ( $\varepsilon$ ) [135, 208]. Користувач може відобразити криві на вибір та оцінювати діапазон змінення розмірів зерна [135, 208].

Вкладка «Розрахунок міцності та твердості», рис. 3.16, містить розрахунок границі плинності ( $G_T = \sigma_T$ ) та твердості по Віккерсу ( $HV$ ) при заданому діаметрі зерна ( $D$ ).



**Рисунок 3.15 –**  
Вкладка  
«Діаграми  
рекристалізації»  
[135, 208]



**Рисунок 3.16 –** Вкладка  
«Розрахунок міцності  
та твердості», розрахунок  
 $G_T$  і  $H_V$  при діаметрі зерна  
 $D = 121,27$  мкм з використанням  
формули Холла – Петча

На вкладці відображується діаметр зерна, попередньо розрахований при заданих  $t$  та  $\epsilon$  на вкладці «Розрахунок розміру зерна», рис. 3.14. Для розрахунку границі плинності (в нашому випадку це опір деформації)  $G_T$  по формулі Холла – Петча необхідно натиснути на кнопку «Розрахунок по формулі Холла – Петча». У формі, що з'явилась задають константи:  $G_0 = \sigma_0$  та  $K = k$ , після того натискають кнопку «Перейти до розрахунку». Для розрахунку твердості ( $H_V$ ) по формулі Холла – Петча задають константи:  $HV_0 = HV_0$  та  $K$ , після того натискають кнопку «Перейти до розрахунку» [135, 208].

При діаметрі зерна  $D = 121,27$  мкм ( $t = 1000$  °C та  $e = 15$  %) і константах, опір деформації дорівнює  $G_T = 64,086$  МПа, а твердість по Віккерсу –  $HV = 38$ , рис. 3.16.

Порівняння отриманих значень з мінімальними допустимими ( $[G_T] = 200$  МПа і  $[H_V] = 40$ ) для низьковуглецевих марок сталі та виконанням співвідношення:  $G_T \geq [G_T]$  і  $HV \geq [H_V]$ , в даному випадку, користуватися не треба, так як отримані параметри стосуються тільки проміжного етапу чорнової стадії термомеханічної прокатки.

При наявності дослідних даних по діаметру зерна та механічних властивостях прокату, їх можна обробити скориставшись кнопкою «Експериментальний розрахунок». Користувач може самостійно вибирати тип апроксимуючої залежності для експериментальних даних, а може, натисненням кнопки «Найкраща апроксимація», вибрати апроксимуючу залежність, для якої величина середньоквадратичної помилки  $\Delta$  є мінімальною [135, 208].

Як приклад, проведено апроксимацію дослідних даних [204, 221] для мікрولهгованої сталі категорії міцності X65 при температурі 1050 °С, та отримали наступні залежності, за допомогою розробленого програмного забезпечення [135, 208]:

– лінійна апроксимація:

$$G_T = -0,593D + 113,559; \Delta = 0,7282; \quad (3.46)$$

– квадратична апроксимація:

$$G_T = 0,008D^2 - 1,203D + 124,448; \Delta = 0,4956; \quad (3.47)$$

– кубічна апроксимація:

$$G_T = 0,001D^3 - 0,12D^2 + 3,404D + 70,846; \Delta = 0,3893; \quad (3.48)$$

– експоненціальна апроксимація:

$$G_T = 1,575 \cdot \exp(0,121D); \Delta = 258,8828; \quad (3.49)$$

– ступенева апроксимація:

$$G_T = 1,061D^{1,312}; \Delta = 52,7802; \quad (3.50)$$

Таким чином, в результаті проведених розрахунків отримано, що найкращою апроксимуючою моделлю, для вказаного прикладу, є кубічна залежність, так як для неї величина середньоквадратичної помилки мінімальна та становить  $\Delta = 0,3893$ .

Для економії часу можна скористатися кнопкою «Найкраща апроксимація» і програма автоматично вибере найкращу апроксимуючу залежність з переліку запропонованих [135, 208].

Розроблене [135, 208] програмне забезпечення успішно використано для обробки та аналізу даних при розробці режимів термомеханічної прокатки.

### 3.2.2 Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки низьколегованих маловуглецевих марок сталі

Низьколеговані, або мікрولهговані маловуглецеві марки сталі широко використовуються в технології термомеханічної прокатки завдяки тому, що мають в своєму складі особливий набір хімічних елементів. Сучасний комплекс мікрولهгуючих елементів складають такі як Nb, V, Ti, Mo, Cu, Ni, Cr, B. Мікрولهговані елементи, що додаються, мають комплексний вплив на властивості сталей починаючи з процесу аустенізації, тобто нагрівання перед прокаткою, деформації та впродовж всього процесу прокатки, а також після її завершення, коли остаточно формуються механічні властивості готового продукту.

Для використання всіх можливостей мікрولهгованих сталей у процесі прокатки дуже важливими є дослідження процесу їх рекристалізації до початку її гальмування. Збільшена деформація в період між процесом аустенізації та початком гальмування рекристалізації забезпечує отримання більш дрібного зерна аустеніту, та відповідно, успадкованого зерна фериту. Таке технічне рішення дозволяє мати необхідний комплекс властивостей міцності та пластичності, а особливо частку в'язкої складової при ударних випробуваннях на рівні не менш ніж 95 %, в залежності від категорії міцності сталі.

Визначення температури початку гальмування рекристалізації здійснюється по відомій залежності автора [222]:

$$T_{95\%} (\text{°C}) = 887 + 464C - 357Si + 363Al + 890Ti + (6645Nb - 664\sqrt{Nb}) + (732V - 230\sqrt{V}). \quad (3.51)$$

У даному розділі виконали обробку результатів досліджень автора роботи [204] по визначенню розміру зерна аустеніту в процесі рекристалізації сталі марки 06Г2БД (Х65), що були проведені на зразках товщиною 20–29 мм.

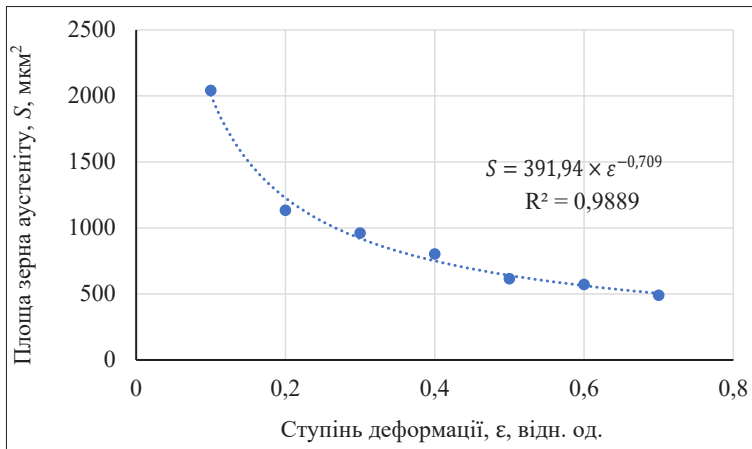
Хімічний склад дослідної марки сталі [204] та результати розрахунку температури початку гальмування рекристалізації наведені в табл. 3.4.

**Таблиця 3.4** – Хімічний склад сталі, яка використовувалась у дослідженні [204]

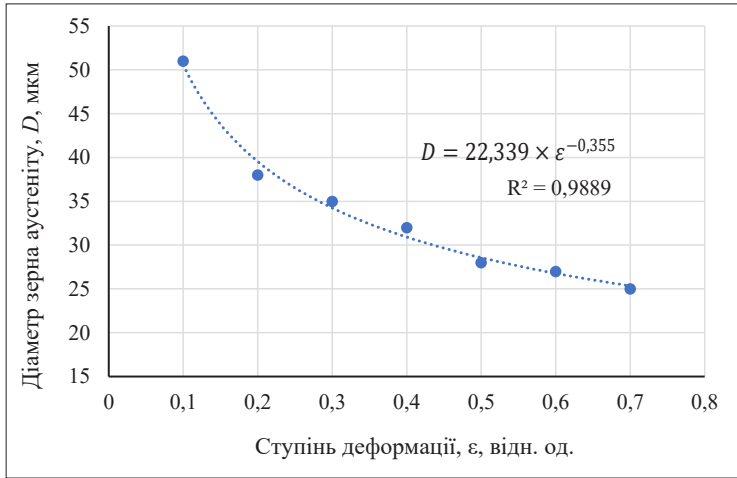
Марка сталі	Хімічний склад, %										T <sub>95%</sub> , °C
	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	Cu	Mo	N	
06Г2ДБ (Х65)	0,055	1,50	0,35	0,002	0,01	0,026	0,034	0,21	0,010	0,0057	900,5

Температура нагрівання перед прокаткою таких марок сталі становить в межах від 1150 °C до 1180 °C. Тобто в інтервалі температур від 900 °C, табл. 3.4, до 1150 °C, при прокатці повинна відбуватися інтенсивна деформація, з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту. Щоб встановити нижню межу деформації, яка забезпечує зменшення аустенітного зерна, необхідно отримати залежність на підставі відповідних дослідних даних.

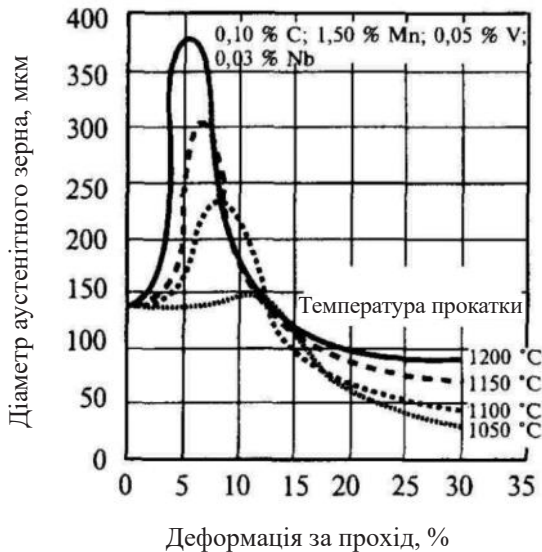
У результаті обробки даних, отриманих автором роботи [204] по розміру зерна аустеніту при температурі 1050 °C, з різними ступенями деформації, рис. 3.17, отримана залежність площі зерна аустеніту від ступеня деформації (3.67) та діаметру зерна аустеніту від ступеня деформації, рис. 3.18, залежність (3.68).



**Рисунок 3.17** – Залежність площі зерна аустеніту від ступеня деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65)



**Рисунок 3.18** – Залежність діаметра зерна аустеніту від ступеня деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65)



**Рисунок 3.19** – Розмір рекристалізованого зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованої сталі [200]

Для порівняння результатів обробки даних [204] (див. рис. 3.17), наведений відомий графік авторів роботи [200], рис. 3.19.

$$S = 391,94 \times \varepsilon^{-0,709}, \quad (3.52)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь деформації, відн. од.

$$D = 22,339 \times \varepsilon^{-0,355}. \quad (3.53)$$

Слід зазначити схожість динаміки змінення діаметру зерна аустеніту на обох рисунках при порівняних температурах (рис. 3.18 та рис. 3.19). Різниця у розмірі зерна при однакових деформаціях може бути пов'язана з різним хімічним складом сталі та різними температурами аустенізації.

Для встановлення залежності опору деформації від діаметру зерна аустеніту необхідні дані по відповідним механічним випробуванням. На жаль, автор роботи [204] такі дослідження не проводив. Замість цього, використані дані роботи [223, 224], по результатах високотемпературних пластометричних досліджень сталі категорії міцності X70, що є найбільш наближеною до марки 06Г2ДБ (Х65). Хімічний склад сталі категорії міцності X70, що була досліджена, наведений в табл. 3.5.

**Таблиця 3.5** – Хімічний склад сталі категорії міцності X70, що досліджена пластометричним методом

Марка сталі	Хімічний склад, %											
	C	Mn	Si	S	P	Al	Ti	Mo	Nb	V	N	B
X70	0,1	1,68	0,25	0,005	0,011	0,036	0,02	0,01	0,048	0,078	0,005	0,001

Для розрахунку опору деформації, на підставі дослідних даних [223], була отримана наступна залежність [224]:

$$\sigma_{t(x70)} = 3661,2 \exp(-0,0047t) \times (0,1126 \ln(\varepsilon) + 0,9543) \times (2,1583u^{0,126}) \times (0,1344 \exp^{0,0021t}), \quad (3.54)$$

де  $t$  – температура деформації, °C;  $\varepsilon$  – ступінь деформації, %;  $u$  – швидкість деформації,  $s^{-1}$ .

Залежність (3.69) вдосконалена в порівнянні з попередньою формулою уточнення впливу властивостей, що успадковані з попередніх процесів обробки металу (аустенізація, природне та примусове охолодження перед прокаткою), як фактор спадковості  $K_n$ , що виражений в формулі як множник  $(0,1344 \exp^{0,0021t})$ . Використання цієї формули в порівнянні з [223] дозволяє знизити похибку при розрахунку опору деформації з 9% до 7,4%.

Відповідно до умов, при яких було отримано розміри зерна аустеніту [204], рис. 3.17, на підставі залежності (3.69), виконано розрахунок опору деформації, результати наведені в табл. 3.6.

Показники в формулі Холла – Петча (3.44) [225, 226]  $\sigma_o$  та  $k$ , звичайним методом визначаються з залежності між показником механічних випробувань, у нашому випадку це опір деформації  $\sigma_t = \sigma_T$ , та розміром зерна  $\frac{1}{\sqrt{D}}$ . При чому,  $\sigma_o$  визначається з екстраполяції прямолінійної залежності  $\sigma_t$  до значення  $\frac{1}{\sqrt{D}} = 0$ , що відповідає нескінченно великому розміру зерна. Коефіцієнт  $k$  визначається як тангенс кута нахилу лінійної залежності між  $\sigma_t$  та  $\frac{1}{\sqrt{D}}$  [225, 226].

**Таблиця 3.6** – Дослідні дані та розрахунок опору деформації

$t, ^\circ\text{C}$	$\epsilon$ , відн. од.	$D$ , мкм	$\frac{1}{\sqrt{D}}$	$S$ , мкм <sup>2</sup>	$u$ , с <sup>-1</sup>	$\sigma_o$ , МПа
1050	0,1	51	0,14	2042,825	1	84,06
1050	0,2	38	0,16	1134,118	1	89,46
1050	0,3	35	0,17	962,115	1	92,63
1050	0,4	32	0,18	804,250	1	94,87
1050	0,5	28	0,19	615,754	1	96,61
1050	0,6	27	0,19	572,557	1	98,03
1050	0,7	25	0,20	490,875	1	99,23

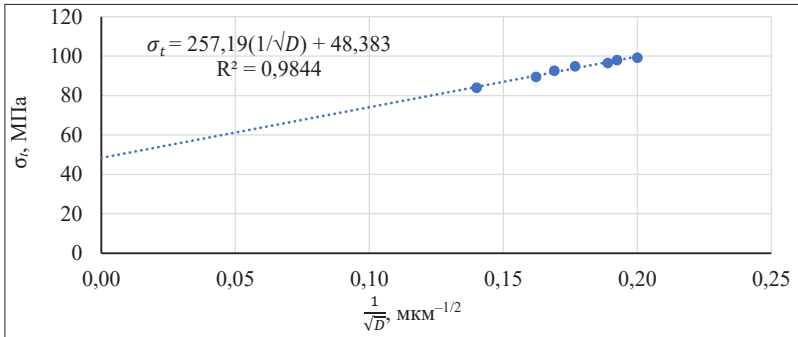
Для розрахунку показників  $\sigma_o$  та  $k$  для дослідної сталі марки 06Г2ДБ (Х65), виконано обробку даних, табл. 3.6, результати якої наведені на рис. 3.20.

Таким чином, показник  $\sigma_o$  становить 48,383 МПа, показник  $k$  становить 257,19 МПа  $\times$  мкм<sup>-1/2</sup>.

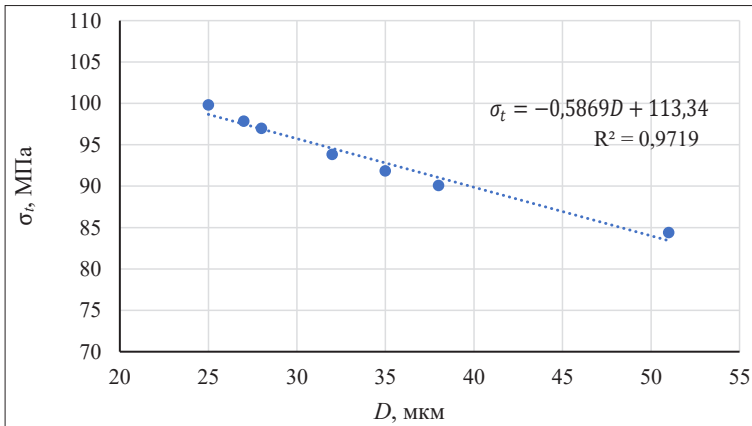
На підставі отриманих показників виконано розрахунок опору деформації по формулі Холла – Петча по всьому діапазону досліджених даних. Результати наведені на рис. 3.21.

Залежність опору деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65), розрахованої по формулі Холла – Петча від діаметру зерна аустеніту має наступний вигляд:

$$\sigma_t = -0,5869D + 113,34. \quad (3.55)$$



**Рисунок 3.20** – Залежність  $\sigma_t$  від  $\frac{1}{\sqrt{D}}$  для розрахунку показників  $\sigma_o$  та  $k$ , які використовуються в формулі Холла – Петча



**Рисунок 3.21** – Залежність  $\sigma_t$ , розрахована за формулою Холла – Петча, від діаметра зерна аустеніту

Таким чином, для розрахунку опору деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65) може бути використане співвідношення Холла – Петча (3.44) з відповідними отриманими показниками  $\sigma_0$  та  $k$ , або залежність (3.70).

На підставі отриманих результатів можна зазначити, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту, при чорновій прокатці, відбувається при деформації від 10 % до 20 %, тобто з 51 мкм до 38 мкм, що становить 50 %. При подальшому збільшенні деформації інтенсивність зменшення зерна знижується. Деформація від 20 % до 70 % зменшує зерно аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм, що сумарно також становить 50 %.

З метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованих марок сталі, зокрема сталі марки 06Г2ДБ (Х65), ступінь деформації за прохід повинен бути близьким до 20 %, або більшим. У більш ранніх дослідженнях [200] вважалося, що при схожих умовах (температура деформації 1050 °С) для зменшення зерна аустеніту достатньо деформації у 10 %.

Підвищена деформація повинна здійснюватися від початку чорнової прокатки до температури гальмування рекристалізації, для сталі марки 06Г2ДБ (Х65) ця температура становить 900,5 °С, що забезпечує ефективне зменшення розміру зерна. Виключенням є стадія прокатки з розбивкою ширини або довжини, при яких обмеженням може бути максимальний кут захоплення, потужність та обертаючий момент головного двигуна прокатного стану.

Слід зазначити, що в залежності від розмірів заготовки та марки сталі, при чорновій прокатці, товстолистовий стан 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» забезпечує ступінь деформації до 30 %, а стан 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛІПЧА» до 40 %. Широкоштабовий стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІПЧА» та стан 1680 МК «Запоріжсталь» дозволяють виконувати деформацію до 20–30 %. Таким чином, технічні можливості вітчизняних станів забезпечують дотримання підвищених умов деформації, що дозволяє розробляти технологію та виробляти продукцію, яка відповідає сучасним технологічним тенденціям та вимогам з якості.

## Висновки до розділу 3

1. Урахування впливу конвекційного теплового потоку дозволяє визначати нерівномірність розподілу температур, яке отримує штаба при проміжному охолодженні на рольгангу в умовах термомеханічного процесу прокатки. Результати розрахунків є основою для проектування технології підтримання температури смуги в пічних моталках станів Стеккеля для умов ТМСП процесу.

2. Встановлено, що для умов здійснення чистової термомеханічної прокатки, вплив конвекції на змінення температурного поля на крайці штаби шириною до 151 мм становить від 5,6 % до 83 %. Ближче до центру штаби вплив конвекції на змінення температури суттєво зменшується та становить від 5,6 % до 0,14 %. Для режимів гарячої прокатки вплив конвекції на змінення температурного поля на крайці становить лише 3,6 %.

3. Встановлено, що після охолодження штаби на рольгангу впродовж трьох чистових проходів, в температурному діапазоні процесу ТМСП, різниця між температурою центральної частини штаби та крайкою збільшується з початкових 8 °С до 43,7 °С, що перевищують прийняті для ТМСП початкові умови перепаду в 25 °С перед прискореним охолодженням. Запропоновано, для вирівнювання температури бокових крайок, корегування режиму нагрівання в пічній моталці стану Стеккеля шляхом регулювання роботи пічних пальників, що розташовані біля вхідного/вихідного вікна

4. Встановлено, що ступінь деформацій при чорновій прокатці має суттєвий вплив на розмір зерна аустеніту, що визначає такі успадковані механічні властивості як межа плинності, тимчасовий опір, енергія удару, доля в'язкої складової. Зокрема встановлено, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту сталей категорії міцності Х65 при температурі 1050 °С, яка передуює температурі початку гальмування рекристалізації, відбувається при деформації від 10 % до 20 %, тобто з 51 мкм до 38 мкм, що становить 50 % в загальнодослідженому діапазоні. Подальше збільшення деформації з 20 % до 70 % є менш ефективним так як зменшує зерно

аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм, що сумарно також становить 50 % в загальнодослідженому діапазоні.

5. Встановлено, що з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту, при чорновій прокатці мікролегованих марок сталі категорії міцності Х65 та подальшого успадкованого зерна фериту, ступінь деформації за прохід повинен бути  $\geq 20\%$ , раніше вважалося, що достатнім є ступінь деформації у 10 %.

---

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРОКАТКИ МЕТОДАМИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

---

### 4.1 Проведення експерименту, обробка експериментальних даних

Фізичне моделювання, як один із способів дослідження процесів прокатки, дозволяє в лабораторних умовах отримати дані по процесах, які в реальних умовах поточного виробництва є неможливими або потребують суттєвих витрат.

Серед таких трудомістких досліджень можна розглядати процеси, які відбуваються при чорновій гарячій прокатці сталі. Важливим етапом, який супроводжує фізичне моделювання є дослідження, пов'язані з пошуком матеріалу-аналога, властивості якого повинні відображувати властивості дослідної сталі.

Метою даного дослідження є пошук умов та марок сталі, властивостям яких відповідає свинець, як матеріал-аналог, для використання його в подальшому фізичному моделюванні. Характеристики лабораторного устаткування для дослідження реологічних властивостей свинцю, умови експерименту, розміри та кількість зразків наведено в пункті 2.3.

Результати розрахунку середньої сили стиснення для кожного із зразків наведено в табл. 4.1.

Обробку результатів експерименту виконано по методиці [212, 213].

Результати розрахунку допусків по зразках наведено в табл. 4.2.

Результати обробки експерименту та відповідні розрахунки по зразках зведені в табл. 4.3.

Результатом обробки експериментальних даних є отримання істинного опору деформації, який виконували по п'яти

різних методиках [212, 213], у тому числі по методиці С. І. Губкіна, Е. Зибеля; по методиці А. Ф. Головіна; по методиці Е. Л. Унксова; по методиці К. Рейшетера та по методиці Липмана, для встановлення задовільненого результату розрахунків.

**Таблиця 4.1** – Сила стиснення по підходах та результати розрахунку середньої сили стиснення зразків

Номер зразка	Сила стиснення, Н					
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>ср</sub>
1	6410	6390	6380	6420	6400	6400
2	7190	7210	7180	7200	7220	7200
3	7600	7580	7620	7610	7590	7600
4	7700	7690	7680	7670	7660	7680
5	8460	8470	8500	8480	8490	8480
6	9304	9294	9284	9264	9274	9284
7	9890	9870	9860	9900	9880	9880
8	10 740	10 700	10 710	10 720	10 730	10 720
9	11 540	11 560	11 570	11 580	11 550	11 560

**Таблиця 4.2** – Результати розрахунку допусків по зразках

Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta P$	200	200	200	200	200	200	200	200	200

**Таблиця 4.3** – Результати розрахунків по експерименту зі стиснення зразків свинцю

Найменування параметра	№ зразку / результати розрахунків								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Початковий діаметр зразків, D <sub>0</sub> , мм	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Початкова висота зразків, H <sub>0</sub> , мм	21,3	23	25	28	31	34,9	38	40	42
Кінцева висота, H <sub>к</sub> , мм	19,5	19,5	19,2	19,2	19,3	19,4	19,9	19,5	19
Ступінь деформації, $\epsilon$ , відн. од.	0,0845	0,1521	0,232	0,3142	0,3774	0,4441	0,4763	0,5125	0,54

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ступінь деформації $ln$ , $e$ , відн. од.	0,0882	0,1650	0,2639	0,3772	0,4738	0,5872	0,6468	0,7184	0,79
Середня сила стиснення, $P_{\text{ср}}$ , Н	6400	7200	7600	7680	8480	9284	9880	10720	11560
Коефіцієнт тертя, $f$	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Середній тиск: $q_1$ , МПа, $q_2$ , МПа	21,441 19,629	24,121 20,450	25,461 19,554	25,729 17,643	28,409 17,687	31,103 17,289	43,150 22,597	45,964 22,407	48,770 22,060
Величина осаджування, $\Delta h$ , мм	1,8	3,5	5,8	8,8	11,7	15,5	18,1	20,5	23,0
Діаметр на контактній поверхні бочки, $F_k$ , мм	20,0	21,0	22,0	22,5	23,5	25,3	25,5	26,0	27,2
Ідеальний діаметр, $D_{\text{ід}}$ , мм	20,380	21,178	22,251	23,548	24,714	26,155	26,946	27,928	28,992
Начальний переріз зразка, $F_0$ , мм <sup>2</sup>	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49
Максимальний переріз в місці випучення, $F_{\text{max}}$ , мм <sup>2</sup>	326,68	362,86	411,66	471,19	530,66	593,65	637,61	687,78	754,38
Радіус максимального перерізу зразка, $r_{\text{max}}$ , мм	10,2	10,75	11,45	12,25	13,0	13,75	14,25	14,8	15,5
Радіус контактної поверхні зразка з бойками, $r$ , мм	10,0	10,5	11,0	11,25	11,75	12,65	12,75	13,0	13,6
Радіус кривизни бочки зразка, $r$ , мм	237,6	190,1	102,4	46,0	37,2	42,7	33,0	26,4	23,7
Середній діаметр, $d_{\text{ср}}$ , мм	20,404	21,203	22,278	23,576	24,743	26,185	26,978	27,962	29,027
Ідеальна площа перерізу, $F_{\text{ід}}$ , мм <sup>2</sup>	326,04	352,07	388,66	435,30	479,44	536,98	569,99	612,3	659,83

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Об'єм зразка, $V, \text{мм}^3$	6358,0	6865,4	7462,4	8357,9	9253,4	10417,5	11342,8	11939,8	12536,8
Істинний опір деформації по формулі (Є.21) $\sigma$ , МПа	17,22	18,22	17,78	17,28	17,61	18,56	20,44	21,0	20,83
Істинний опір деформації по формулі (Є.22) $\sigma$ , МПа	18,28	18,94	18,5	17,94	18,22	19,17	21,0	21,56	21,44
Істинний опір деформації по формулі (Є.23) $\sigma$ , МПа	14,72	16,11	16,61	15,39	15,5	16,06	16,89	18,01	18,56
Істинний опір деформації по формулі (Є.24) $\sigma$ , МПа	19,28	19,61	19,39	19,26	19,6	20,27	22,10	22,49	22,59
Істинний опір деформації по формулі (Є.26) $\sigma$ , МПа	16	17	17,17	16	16,44	17,11	18,89	19,33	19,61

Результати розрахунків по формулах (Є.21) та (Є.22) є близькими, а умови їх використання відповідають (ступінь деформації не перевищує 0,6–0,8 відн. од.) умовам проведення експерименту. Розрахунок по формулі (Є.24) дав трохи вищі результати, а її використання рекомендовано у випадках великого обтиснення із значним утворенням бочки. У використаній формулі (Є.26) закладено коефіцієнт тертя 0,5, який перевищує розрахований в межах експерименту та дорівнює 0,18.

Розрахунки по формулах (Є.23) та (Є.26) мають порівняльно нижчі результати.

Таким чином, для подальшого дослідження будемо використовувати результати розрахунків істинного опору деформації по формулі (Є.21).

## 4.2 Аналіз результатів експерименту, рекомендації по маркам сталі-аналогам

По отриманих результатах експерименту, побудуємо графік залежності сили стиснення від ступеня деформації із розрахованими відхиленнями, рис. 4.1. Для визначення переліку сталей та умов, при яких вони є аналогами свинцю та можуть бути використані для фізичного моделювання процесів пластичного формозмінення, побудовано криві зміцнення, рис. 4.2.

Для порівняння аналогів вибрані марки сталі, що є більш наближеними по своїх властивостях, при відповідних умовах (температура деформації 1200 °С, швидкість деформації  $u = 1c^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.), до властивостей свинцю. Дані умови є наближеними до режимів, які є на перших проходах чорнової прокатки.

Розрахунок істинного опору деформації для марок сталі (сплаву) – аналогів виконували по наступних методиках, табл. 4.4.

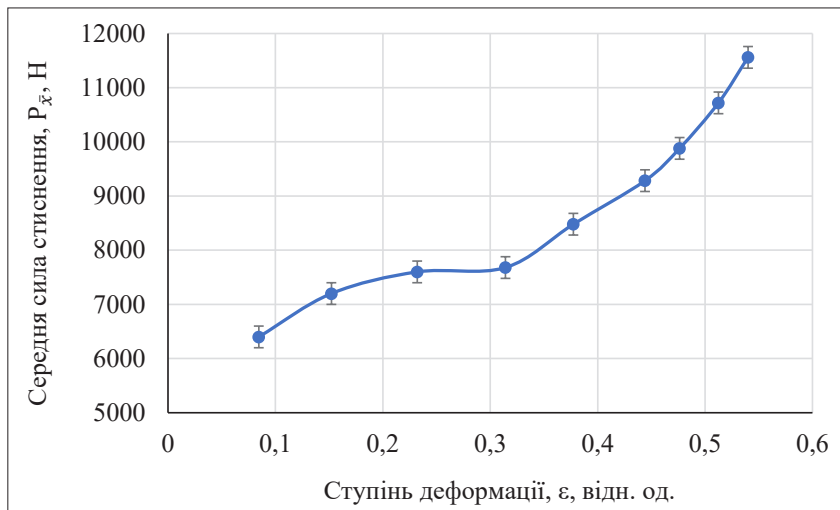
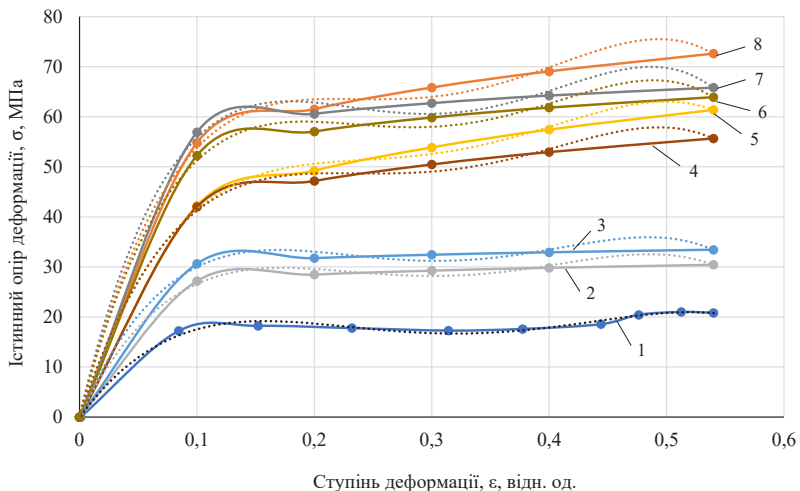


Рисунок 4.1 – Залежності сили стиснення від ступеня деформації



**Рисунок 4.2** – Порівняння кривих зміцнення свинцю при температурі 20 °С (1) та марок сталі (сплавів) – аналогів 0X18МФТ (2), 15X25Т (3), DD11 (4), 65Г (5), X80 (6), X70 (7), Ст3сп (8) при температурі 1200 °С, пунктиром вказані лінії тренду

**Таблиця 4.4** – Перелік марок сталі (сплаву) – аналогів та методик, за якими виконували розрахунки істинного опору деформації

Марка сталі (сплаву) – аналога	Нормативний документ	Метод розрахунку істинного опору деформації	Посилання
Ст3сп	ДСТУ 2651	Л. В. Андреюка, Г. Г. Тюленева	[129]
0X18МФТ	спецсплав		[129]
15X25Т	ГОСТ 5632		[129]
65Г	ГОСТ 14959		[129]
DD11	EN10111	Л. В. Андреюка, Г. Г. Тюленева (по хімічному складу)	[129]
X70	API-5L	дослідна залежність	[224]
X80	API-5L	дослідна залежність	[57, 223]

На підставі рис. 4.2 отримано поліноміальні залежності істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю, а також для марок сталі (сплаву) – аналогів з відповідною величиною вірогідності апроксимації  $R^2$ , (4.2)–(4.9) [227].

У загальному вигляді поліноміальна залежність 4-го рівня має наступний вигляд:

$$\sigma = a_0x^4 + a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4, \quad (4.1)$$

де  $a_0 \dots a_4$  – коефіцієнти поліному.

Залежність істинного опору деформації свинцю від ступеня деформації:

$$\begin{aligned} \sigma_{pb} &= -3059,9x^4 + 4073,8x^3 - 1832x^2 + 321,82x - 0,1057; \\ R^2 &= 0,992. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Залежність істинного опору деформації сплаву 0X18MФТ від ступеня деформації:

$$\begin{aligned} \sigma_{X18MФТ} &= -4696x^4 + 6004,8x^3 - 2647,8x^2 + 474,28x + 0,1175; \\ R^2 &= 0,996. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки 15X25Т від ступеня деформації:

$$\begin{aligned} \sigma_{15X25T} &= -5378,2x^4 + 6870,1x^3 - 3022,6x^2 + 537,27x + 0,1351; \\ R^2 &= 0,996. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки DD11 від ступеня деформації:

$$\begin{aligned} \sigma_{DD11} &= -6445,7x^4 + 8308,4x^3 - 3722,3x^2 + 706,37x + 0,1572; \\ R^2 &= 0,998. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки 65Г від ступеня деформації:

$$\begin{aligned} \sigma_{65Г} &= -6026x^4 + 7796,2x^3 - 3529,2x^2 + 694,54x + 0,1448; \\ R^2 &= 0,998. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки (категорії міцності) X80 від ступеня деформації:

$$\sigma_{X80} = -8385x^4 + 10783x^3 - 4811,5x^2 + 891,99x + 0,2053; \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0,997.$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки (категорії міцності) X70 від ступеня деформації:

$$\sigma_{X70} = -9558,6x^4 + 12251x^3 - 5427,5x^2 + 984,91x + 0,2371; \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0,996.$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки СтЗсп від ступеня деформації:

$$\sigma_{СтЗсп} = -8411,1x^4 + 10835x^3 - 4857x^2 + 921,64x + 0,2051; \quad (4.9)$$

$$R^2 = 0,998.$$

Результати оцінки відхилень в розрахунках по отриманих залежностях (4.2)–(4.9) в порівнянні з розрахунком істинного опору деформації  $\sigma_i$  по методиках, вказаних в табл. 4.4, та для свинцю по формулі (Є.21), наведені в табл. 4.5, 4.6.

**Таблиця 4.5** – Оцінки відхилень у розрахунках істинного опору деформації марок сталі (сплаву) – аналогів

Матеріал	Параметр	Ступінь деформації, од.					відхилення, %		
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,54	мін	макс	середнє
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0X18MФТ	$\sigma_i$ , МПа	27,18	28,47	29,25	29,82	30,43	-3,93	3,62	0,10
	$\sigma_{0X18MФТ}$ , МПа	26,60	29,59	28,19	30,27	30,37			
	відхилення, %	2,12	-3,93	3,62	-1,51	0,20			
15X25Т	$\sigma_i$ , МПа	30,63	31,76	32,43	32,92	33,44	-4,04	3,77	0,12
	$\sigma_{15X25Т}$ , МПа	29,97	33,04	31,21	33,43	33,35			
	відхилення, %	2,17	-4,04	3,77	-1,55	0,26			
DD11	$\sigma_i$ , МПа	42,00	47,16	50,46	52,94	55,66	-3,26	2,54	-0,38
	$\sigma_{DD11}$ , МПа	41,24	48,69	49,18	53,86	56,37			
	відхилення, %	1,83	-3,26	2,54	-1,74	-1,26			

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
65Г	$\sigma_i$ , МПа	42,21	49,23	53,87	57,42	61,38	1,80	9,91	6,46
	$\sigma_{65Г}$ , МПа	38,03	48,35	51,22	53,06	56,42			
	відхилення, %	9,91	1,80	4,93	7,61	8,08			
Х80	$\sigma_i$ , МПа	52,24	57,04	59,84	61,83	63,91	-1,73	9,46	4,04
	$\sigma_{Х80}$ , МПа	47,30	58,02	58,53	58,22	61,06			
	відхилення, %	9,46	-1,73	2,19	5,84	4,46			
Х70	$\sigma_i$ , МПа	56,91	60,57	62,71	64,23	65,82	-3,14	9,31	3,28
	$\sigma_{Х70}$ , МПа	51,61	62,47	61,90	60,73	63,52			
	відхилення, %	9,31	-3,14	1,30	5,45	3,49			
СтЗсп	$\sigma_i$ , МПа	54,80	61,52	65,83	69,07	72,62	-0,21	9,65	5,20
	$\sigma_{СтЗсп}$ , МПа	49,51	61,65	63,53	64,40	68,03			
	відхилення, %	9,65	-0,21	3,49	6,76	6,32			

Таблиця 4.6 – Оцінки відхилень у розрахунках істинного опору деформації свинцю

Матеріал	Параметр	Ступінь деформації, од									відхилення, %		
		0,085	0,152	0,232	0,314	0,377	0,444	0,476	0,513	0,54	мін	мак	середнє
Свинць	$\sigma_i$ , МПа	17,22	18,22	17,78	17,28	17,61	18,56	20,44	21,0	20,83	-5,15	5,29	0,20
	$\sigma_{pb}$ , МПа	16,31	19,16	17,96	16,69	17,32	19,29	20,28	20,92	20,76			
	відхилення, %	5,29	-5,15	-0,99	3,40	1,64	-3,93	0,80	0,37	0,35			

Таким чином, можна побачити збільшення як максимальних відхилень, так і середнього відхилення в міру віддалення або «зниження» ступеню аналогічності (100–відхилення, %) матеріалу від свинцю.

Для поширення результатів експерименту, як інструменту для фізичного моделювання процесів прокатки, для марок сталі (сплаву) – аналогів розраховано коефіцієнти пропорційності:

$$n_i = \frac{a_i \text{аналог}}{a_i \text{pb}}, \quad (4.10)$$

де  $a_{i \text{pb}}$  – відповідний коефіцієнт регресії в залежності істинного опору деформації свинцю від ступеня деформації;  $a_i \text{аналог}$  – відповідний

коефіцієнт регресії в залежності істинного опору деформації марки сталі (сплаву) – аналогу від ступеня деформації.

Результати розрахунку коефіцієнтів пропорційності наведено в табл. 4.7.

**Таблиця 4.7** – Розраховані коефіцієнти пропорційності для марок сталі (сплаву) – аналогів

Марка сталі (сплаву) аналога	Коефіцієнт пропорційності $n_i$ , для відповідного коефіцієнта поліному				
	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0X18MTФ	1,535	1,474	1,445	1,474	-1,112
15X25Т	1,758	1,686	1,650	1,669	-1,278
DD11	2,107	2,039	2,032	2,195	-1,487
65Г	1,969	1,914	1,926	2,158	-1,370
X80	2,740	2,647	2,626	2,772	-1,942
X70	3,124	3,007	2,963	3,060	-2,243
Ст3сп	2,749	2,660	2,651	2,864	-1,940

За допомогою отриманих коефіцієнтів пропорційності, результати подальших експериментів з прокатки свинцевих зразків можна перерахувати на відповідну марку сталі(сплав) – аналог для наступних умов: температура деформації 1200 °С, швидкість деформації  $u = 1c^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

Слід зазначити, що більшість сучасних марок сталі при чорновій прокатці обробляються при температурах 1200–1000 °С, в тому числі марки, що виробляються способом ТМСП. З метою розширення можливостей для фізичного моделювання, виконано додаткові розрахунки істинного опору деформації марок сталі (сплаву) – аналогів при температурах від 1200 °С до 1000 °С зі ступенем деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. Змінення істинного опору деформації по результатах розрахунків наведено на рис. 4.3.

Для встановлення залежностей впливу змінення температури на істинний опір деформації з врахуванням ступеня деформації, по кожній з досліджених марок сталі (сплаву) – аналогів, розраховано коефіцієнти змінення істинного опору деформації  $K_6$ . В якості

базового прийнято істинний опір деформації при температурі  $t = 1200$  °С, для кожного ступеня деформації.

Ідентичність розрахованих коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_{\sigma}$  в залежності від температури  $t$ , для різних ступенів деформації дозволило встановити залежності впливу змінення температури на істинний опір деформації для кожної з дослідних марок сталі (сплаву) – аналогів, рис. 4.4.

На підставі отриманих залежностей, рівняння для розрахунку коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_{\sigma}$  будуть мати наступний вигляд [228]:

– для сплаву 0X18MTФ:

$$K_{\sigma} = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,64}; R^2 = 1, \quad (4.11)$$

де  $t$  – температура деформації, °С;  $R^2$  – величина вірогідності апроксимації:

– для сталі марки 15X25Т:

$$K_{\sigma} = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,7}; R^2 = 1; \quad (4.12)$$

– для сталі марки DD11:

$$K_{\sigma} = 2 \times 10^{10} \times t^{-3,33}; R^2 = 1; \quad (4.13)$$

– для сталі марки 65Г:

$$K_{\sigma} = 2 \times 10^9 \times t^{-3,02}; R^2 = 1; \quad (4.14)$$

– для сталі марки (категорії міцності) X80:

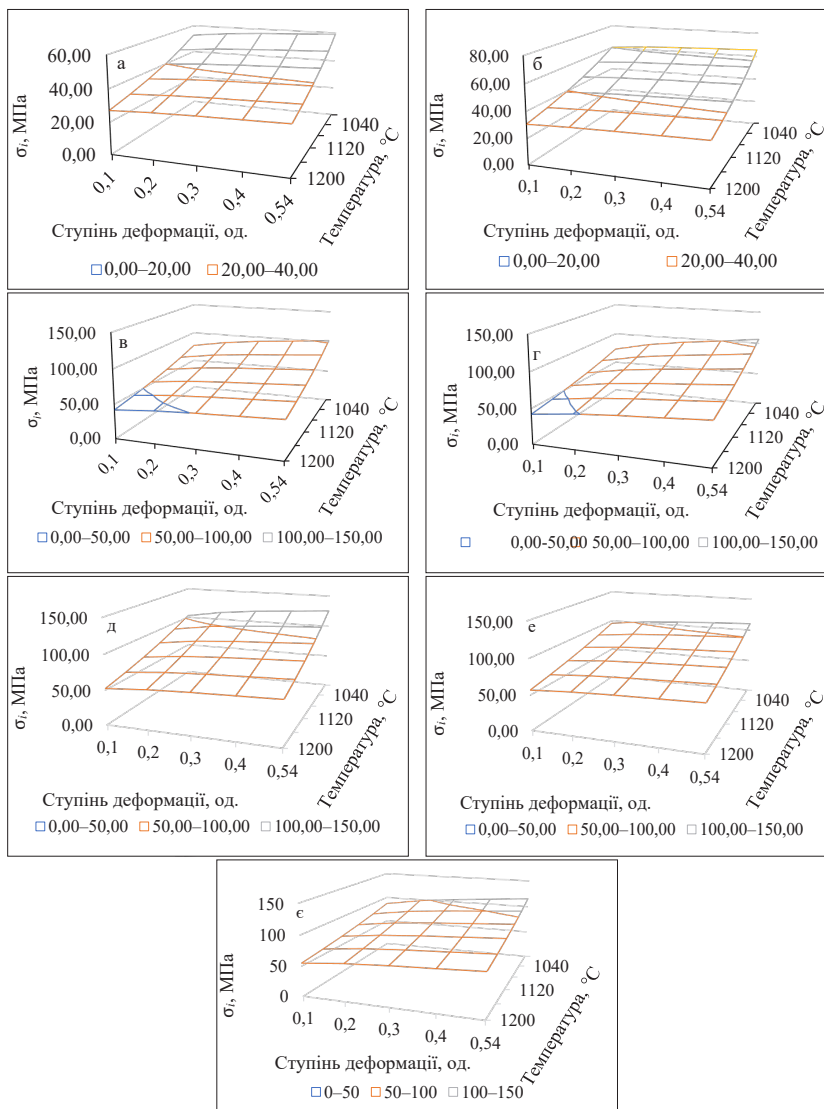
$$K_{\sigma} = 3 \times 10^{11} \times t^{-3,703}; R^2 = 0,999; \quad (4.15)$$

– для сталі марки (категорії міцності) X70:

$$K_{\sigma} = 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}; R^2 = 0,9993; \quad (4.16)$$

– для сталі марки СтЗсп:

$$K_{\sigma} = 7 \times 10^7 \times t^{-2,54}; R^2 = 1. \quad (4.17)$$



**Рисунок 4.3** – Змінення істинного опору деформації при різних температурно-деформаційних параметрах по результатах розрахунків сплаву 0X18MTФ (а), марок сталі 15X25T (б), DD11 (в), 65Г (г), X80 (д), X70 (е), СтЗсп (є)



**Рисунок 4.4** – Залежності коефіцієнтів змінення істинного опору деформації від температури для сплаву 0X18MTФ (а), марок сталі 15X25T (б), DD11 (в), 65Г (г), X80 (д), X70 (е), Ст3сп (є)

Таким чином, використання отриманих коефіцієнтів пропорційності, табл. 4.7, сумісно з рівняннями (4.11)–(4.17) дозволяє моделювати процеси прокатки та перераховувати результати експериментів зі свинцем на сплав 0X18МФТ та марки сталі марок 15X25Т, DD11, 65Г, X80, X70, СтЗсп при наступних умовах: температура деформації 1200–1000 °С, швидкість деформації  $u = 1\text{с}^{-1}$ , ступінь деформації 0,1–0,54 відн. од. Дані умови відповідають параметрам гарячої прокатки в чорнових клітях товстолистових та широкоштабових станів, що дозволяє використовувати отримані результати у подальшому дослідженні чорнових процесів, в тому числі термомеханічної прокатки.

### **4.3 Порівняння розрахованих на підставі експерименту даних з фактичними результатами прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

З метою перевірки якості отриманих результатів для застосування при подальшому фізичному моделюванні виконано порівняння фактичних даних по параметрах прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» з даними, отриманими по результатах розрахунку по коефіцієнтах пропорційності (див. табл. 4.7) та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ , рівняння (4.11)–(4.17).

Для перевірки використано дані чорнової прокатки товстих листів з кінцевими розмірами 17,5 × 3268 × 12200 мм зі сталі категорії міцності X70, плавка № 1302503, партія 9063, з розмірами слябу в холодному стані 300 × 1850 × 3003 мм, табл. 4.8.

В таблиці 4.8, розрахована, згідно з методикою [58], сила прокатки (через істинний опір деформації та середній тиск), отримана шляхом розрахунку істинного опору деформації згідно з залежністю (4.2), коефіцієнти регресії якої було скорегована через коефіцієнти пропорційності (див. табл. 4.7) та з врахуванням рівняння (4.16). Кінцева залежність, яка була використана для розрахунку має наступний вигляд:

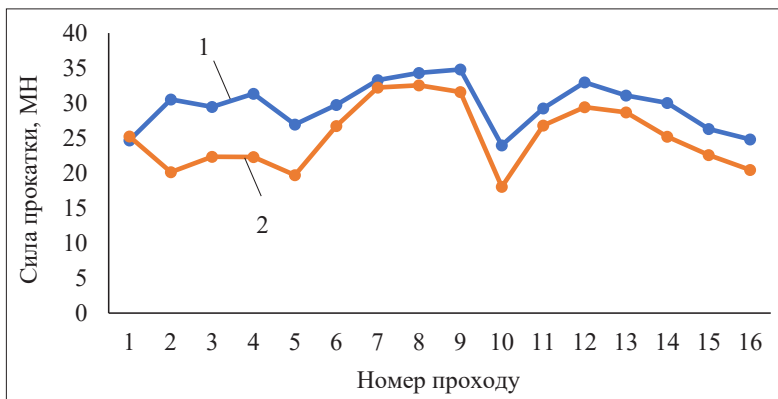
$$\sigma_{pb} = \left( \begin{aligned} & -3059,9 \times 3,124x^4 + 4073,8 \times 3,007x^3 - 1832 \times \\ & \times 2,963x^2 + 321,82 \times 3,060x - 0,1057 \times (-2,243) \end{aligned} \right) \times (4.18) \\ \times 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}.$$

**Таблиця 4.8** – Порівняння результатів чорнової прокатки товстих листів розмірами 17,5 × 3268 × 12 200 мм зі сталі категорії міцності Х70 з розрахованими даними

№ з/п	Фактичні параметри прокатки				Розраховані параметри прокатки	
	Товщина розкату, Н, мм	Ширина розкату, В, мм	Температура розкату, t, °С	Сила прокатки, МН	Сила прокатки, МН	Похибка, %
0	302	3042,7				
1	277	3042,7	1126	24,67	25,22	-2,24
2	258	3042,7	1120	30,52	20,12	34,04
3	238	3042,7	1117	29,44	22,33	24,13
4	219	3042,7	1114	31,35	22,31	28,84
5	203	3042,7	1110	26,93	19,72	26,79
6	180	2787,3	1107	29,75	26,73	10,14
7	159	3431,0	1102	33,28	32,22	3,18
8	139	3431,0	1098	34,33	32,54	5,21
9	121	3431,0	1093	34,80	31,59	9,22
10	112	3431,0	1087	23,97	18,03	24,79
11	99,1	3431,0	1081	29,25	26,82	8,32
12	85,6	3431,0	1073	32,96	29,41	10,78
13	73,6	3431,0	1064	31,08	28,68	7,72
14	64,4	3431,0	1054	30,04	25,22	16,05
15	57,1	3431,0	1042	26,30	22,60	14,09
16	51,2	3431,0	1028	24,82	20,46	17,58

Порівняння фактичної сили прокатки та розрахованої наведено на рис. 4.5.

Підвищена розбіжність між фактичними та розрахованими даними (див. табл. 4.8, рис. 4.5) спостерігається у 2–5 проходах, в яких безпосередньо здійснювалась розбивка розкату по ширині, та, яка може бути пов'язана з нерівномірним нагріванням або переохолодженням торців слябів.



**Рисунок 4.5** – Порівняння фактичної сили (1), отриманої при чорновій прокатці товстих листів з кінцевими розмірами  $17,5 \times 3268 \times 12\,200$  мм зі сталі марки X70 та розрахованої (2)

Загальна середня похибка по всіх проходах становить 14,9%. Якщо не враховувати вплив розбивки розкату по ширині у 2–5 проходах, тоді середня похибка становить 11,6%, що є задовільним рівнем.

Таким чином, при порівнянні фактичних даних по результатах чорнової прокатки товстих листів з кінцевими розмірами  $17,5 \times 3268 \times 12\,200$  мм зі сталі категорії міцності X70 на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» з даними, розрахованими на підставі отриманих коефіцієнтів пропорційності (див. табл. 4.7) та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації, рівняння (4.16), середня похибка становить 11,6%, що дозволяє використовувати отримані дані для подальшого фізичного моделювання процесів гарячої прокатки.

## Висновки до розділу 4

1. По результатах лабораторних досліджень, в умовах лабораторії кафедри ОМТ ДВНЗ «ПДТУ» встановлено реологічні властивості свинцю при температурі деформації 20 °С, швидкості деформації  $u = 1c^{-1}$ , ступені деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. Визначено, що при температурі деформації 1200 °С, швидкості деформації  $u = 1c^{-1}$  та ступені деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. опір деформації сплаву 0Х18МТФ та марок сталі 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп є наближеним до свинцю.

2. Для отриманих поліноміальних залежностей визначення істинного опору деформації свинцю та марок сталі (сплаву) – аналогів, шляхом апроксимації лабораторних даних та відомих дослідних даних, встановлено, що середнє відхилення при розрахунку по яких склало від -0,38 % до 5,20 %.

3. Перехід від свинцю до сталей можливий за допомогою коефіцієнтів пропорційності. Розраховано коефіцієнти пропорційності  $n_i$ , які дозволяють розраховувати опір деформації марок сталі (сплаву) – аналогів на підставі отриманого опору деформації свинцю з метою подальшого фізичного моделювання силових процесів прокатки.

4. Отримано залежності для розрахунку коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ , які дозволяють розширити температурні можливостей для фізичного моделювання для кожної з марок сталі (сплаву) – аналогів з 1200 °С до 1200–1000 °С. Вказаний діапазон відповідає температурним параметрами чорної прокатки для більшість сучасних марок сталі, в тому числі тих, що виробляються методом ТМСР.

5. Комплекс залежностей з коефіцієнтів пропорційності та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$  дозволяє моделювати процеси прокатки з використанням свинцевих зразків, середня похибка по яких не перевищує 11,6 %, що перевірено на фактичних даних по результатах чорної термомеханічної прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» товстих листів зі сталі категорії

міцності X70. Умови використання отриманих залежностей – температура деформації 1200–1000 °С, швидкість деформації  $u = 1\text{с}^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1–0,54 відн. од, відповідають режимам, які є при чорновій прокатці та можуть бути використані для фізичного моделювання процесів чорнової прокатки на товстолистових та широкоштабових станах, наприклад станах 3000 та 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», та стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».

---

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ НА СТАНІ СТЕККЕЛЯ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

---

## **5.1 Математична модель процесу гарячої прокатки**

### **5.1.1 Модель фізико-механічних властивостей матеріалу, що прокатується, початкові дані**

Застосування методів математичного моделювання процесів обробки металів тиском дозволяє одночасно задовільнити декілька цілей: мінімізувати витрати на дослідження та розробку технологічних процесів в умовах реального виробництва; виконати поглиблене дослідження процесів пластичної деформації, що відбуваються в дослідному осередку деформації; виконати порівняння результатів дослідження через математичне моделювання з фактичними результатами, отриманими при виробництві, з метою виявлення вузьких місць технології.

Метою цього дослідження є встановлення умов мінімальної нерівномірності розподілу деформації по товщині прокату шляхом отримання розподілу напружень та деформації вздовж осередку деформації в умовах чорнової прокатки та з урахуванням умов квазістаціонарного розподілу температур при чистовій прокатці на стані Стеккеля. Порівняння результатів розрахунку силових параметрів, отриманих шляхом математичного моделювання з фактичними результатами прокатки.

В якості інструменту дослідження методом скінченних елементів використано програмний додаток Aباquas CAE 6.14-2.

Докладні дані щодо особливостей стану Стеккеля, перелік, характеристики, схема розташування основного устаткування та сортамент наведено в розділі 1.3.3.

Характеристики дослідного сортаменту та фактичний режим прокатки наведено в табл. 5.1–5.3.

**Таблиця 5.1** – Сортамент слябів та рулонів, що досліджується

Шифр плавки	№ сляба	Марка сталі	Переріз слябу, мм	Переріз рулону, мм
81518	A1/02005400	S355JR+AR	220 × 1520 × 9800	15 × 1500

**Таблиця 5.2** – Хімічний склад сталі марки S355JR+AR, що досліджувалася

Шифр плавки	Масова доля елементів, %														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	Mo	V	N	As
81518	0,14	0,023	1,40	0,014	0,003	0,05	0,18	0,02	0,035	0,005	0,034	0,01	0,005	0,007	0,005

**Таблиця 5.3** – Фактичний режим прокатки плавки № 81518 по клітях стану Стеккеля

Прокатний стан	№ проходу	H, мм	h, мм	Ступінь деформації, %	Діаметр робочих валків, мм	Швидкість прокатки, м/с	Температура перед проходом, °С	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Стан дуо 3170	1	221,3	200,49	9,40	1050	2,20	1090	1007
	2	200,49	178,82	10,81	1050	2,20	1068	904
	3	178,82	158,36	11,44	1050	2,20	1068	1000
	4	158,36	139,55	11,88	1050	2,20	1044	1017
	5	139,55	120,54	13,62	1050	2,20	1073	1015
	6	120,54	103,88	13,82	1050	2,20	1023	1077
	7	103,88	87,23	16,03	1050	2,20	1055	1121
	8	87,23	71,81	17,68	1050	2,20	1009	1243

## Продовження таблиці 5.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	9	71,81	57,87	19,41	1050	2,20	1027	1254
	10	57,87	46,82	19,09	1050	2,20	1027	1246
	11	46,82	37,16	20,63	1050	2,20	1041	1397
Стан кварто 1780 (Стеккеля)	1	37,16	23,95	35,55	620	4,06	999	1957
	2	23,95	18,98	20,75	620	4,06	958	1351
	3	18,98	15,17	20,07	620	4,06	920	1195

Слід зазначити, що з метою виключення помилок розрахунку, пов'язаних з фіксацією фактичної температури прокатки по проходах, у математичній моделі в системі Abaqus CAE було використано результати розрахунку, здійсненого аналітичним способом [47].

Для побудови моделі фізико-механічних властивостей металу, що обробляється в системі CAE (Complete Abaqus Environment), необхідно задати його щільність, пружність та пластичні властивості.

Скінченно-елементна модель процесу гарячої прокатки побудована для прокатки сталі марки S355JR+AR згідно з вимогами EN 10025-2, з хімічним складом, що наведений в табл. 5.2.

В системі Abaqus CAE були задані наступні параметри:

- щільність  $7,8E-09$  т/мм<sup>3</sup>;
- коефіцієнт Пуассона – 0,3.

Модуль пружності був заданий у залежності від температури металу  $t$ , °C, по наступній залежності [229]:

$$E = (213,286 - 4,877 \cdot 10^{-2}t - 3,33 \cdot 10^{-5}t^2 - 2,778 \cdot 10^{-8}t^3) \cdot 10^3, \text{ МПа.} \quad (5.1)$$

Істинний опір металу було визначено згідно з методом Л. В. Андреюка та Г. Г. Тюленева по хімічному складу [129]:

$$\sigma_s = S_{\sigma_d} u^a (10\varepsilon)^b (t/1000)^c, \quad (5.2)$$

де  $u$  – швидкість деформації,  $c^{-1}$ ;  $\varepsilon$  – відносний ступінь деформації, відн. од.;  $t$  – температура деформації, °C;  $S_{\sigma_d}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти для кожної марки сталі, які визначаються по відповідних залежностях з урахуванням вмісту хімічних елементів в сталі [129].

Перетворення отриманих методом Л. В. Андреюка та Г. Г. Тюленева значень опору деформації (напруження)  $\sigma_{s\ true}$  та ступеня деформації  $\epsilon_{in}^{pl}$  для застосування в середовищі Abaqus CAE виконували по наступній методиці:

$$\sigma_{s\ true} = \sigma_s (1 + \epsilon); \quad (5.3)$$

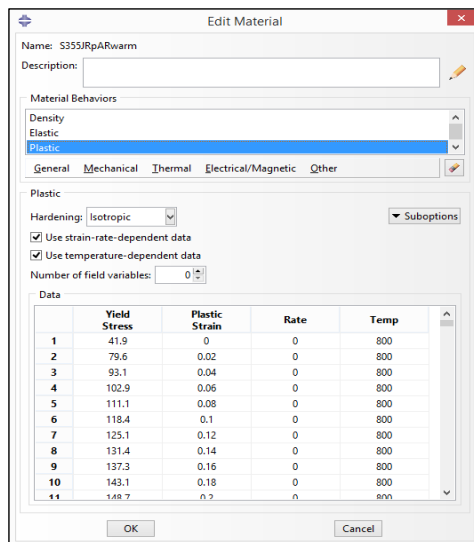
$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon); \quad (5.4)$$

$$\epsilon_{in}^{pl} = \epsilon_{true} - \frac{\sigma_{s\ true}}{E}. \quad (5.5)$$

Істинний опір деформації в середовищі Abaqus CAE,  $\sigma_{s\ true}$ , було задано в залежності від:

- ступеня деформації  $\epsilon$  в діапазоні 0,0–0,8 відн. од.;
- швидкості деформації  $u$  в діапазоні 0,0–40,0  $c^{-1}$ ;
- температури деформації  $t$  в діапазоні 800–1200  $^{\circ}C$ .

Приклад відображення матеріалу у середовищі Abaqus CAE представлено на рис. 5.1.



**Рисунок 5.1** – Відображення фізико-механічних властивостей матеріалу в середовищі Abaqus CAE

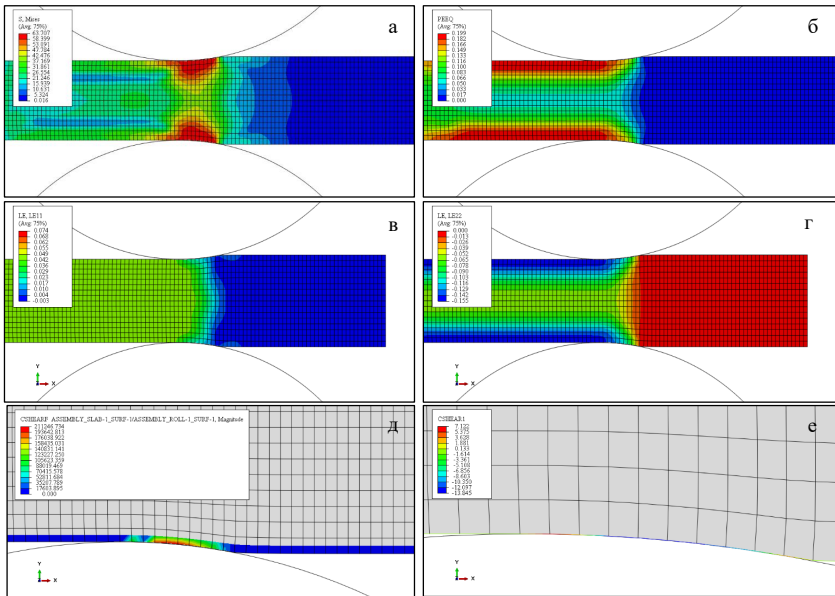
У розрахунках по формулі (5.2), для отримання в системі Abaqus САЕ нульових значень для ступеня деформації та швидкості деформації використовувались відповідні значення, які дорівнювали 0,001 та 0,01.

Значення опору деформації (напруження)  $\sigma_{s \text{ true}}$  та ступеня деформації  $\varepsilon_m^p$  було оброблено по формулах (5.3) та (5.5).

### 5.1.2 Обробка результатів розрахунку

Обробка результатів скінченно-елементного моделювання полягала в аналізі полів напружень та деформації, що наведені на рис. 5.2.

Для аналізу енергосилових параметрів процесу прокатки було використано реакції у довідковій точці валка. Зокрема, на рис. 5.3 показано розподілення сили та моменту прокатки.



**Рисунок 5.2** – Приклади полів напружень та деформації, отриманих при реалізації моделі скінченних елементів, поле еквівалентних напружень (а), поле еквівалентної деформації (б), поле логарифмічної деформації в горизонтальній площині (в), поле контактних напружень (д), поле дотичних контактних напружень (е)

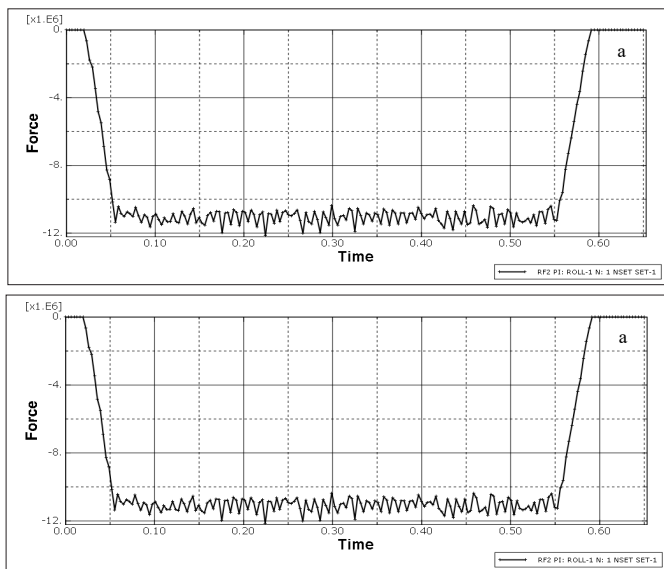


Рисунок 5.3 – Графіки змінення сили (а) та моменту (б) прокатки

Графіки, що були отримані в середовищі Abaqus CAE, експортували в MS Excel у числовому вигляді, рис. 5.4 та піддавали статистичній обробці.

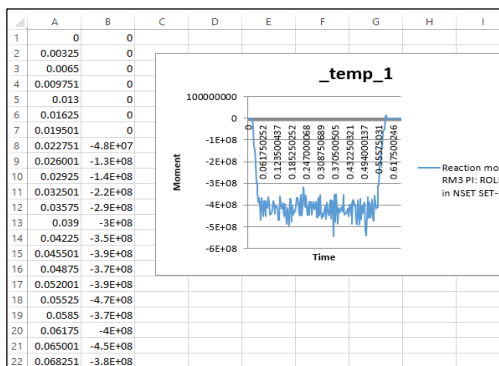


Рисунок 5.4 – Приклад електронної таблиці, що була імпортована з Abaqus CAE

## 5.2 Результати розрахунку процесу прокатки на стані Стеккеля в середовищі Abaqus CAE

### 5.2.1 Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 3170 в середовищі Abaqus CAE

Розрахунок процесів прокатки сталі марки S355JR+AR зі слябу розмірами  $220 \times 1520 \times 9800$  мм та кінцевими розмірами рулону  $15 \times 1500$  мм в середовищі Abaqus CAE здійснювали по проходах для чорнової кліті, стан 3170 та для стану 1780 з пічними моталками (Стеккеля) з урахуванням особливостей технології та устаткування.

Результати розрахунку полів еквівалентних напружень  $S$  (по Мізесу), еквівалентної пластичної деформації PEEQ, сили прокатки Force та моменту прокатки Moment по проходах в кліті стану 3170 наведено на рис. 5.5–5.15. Слід зазначити, що на рисунках поля еквівалентних напружень  $S$  мають розмірність «МПа», поля еквівалентної пластичної деформації PEEQ мають розмірність «відн. од.», сили прокатки Force має розмірність «Н», момент прокатки на валку Moment має розмірність «Н × мм». Виходячи з динаміки змінення форми полів, інтенсивності або рівня еквівалентного напруження  $S$  та еквівалентної деформації PEEQ можна зробити висновок щодо рівномірності проникнення деформації та напружень по товщині прокату. Як відомо, кінцеві властивості прокату починають формуватися на стадії чорнової прокатки. Тому отримання даних щодо настання такої фази в металі дозволяє покращити процеси розробки та вдосконалення технології в прив'язці до характеристик конкретного стану та матеріалу, що обробляється. При моделюванні режимів прокатки сталі марки S355JR+AR в кліті стану 3170, збільшення рівномірності проникнення напружень по товщині заготовки, спостерігається в шостому проході, в якому починає формуватися суцільний шар напружень, який складає 90 % від максимального еквівалентного напруження в цьому проході, при інших відповідних умовах прокатки. При цьому еквівалентний ступінь деформації на виході з осередку деформації по шарах, в залежності від глибини проникнення в товщину прокату, варіюється від 0,121 відн. од.

до 0,208 відн. од., різниця складає 0,087 відн. од. Фактор форми  $l_d/h_{cp}$  при цьому становить 0,83.

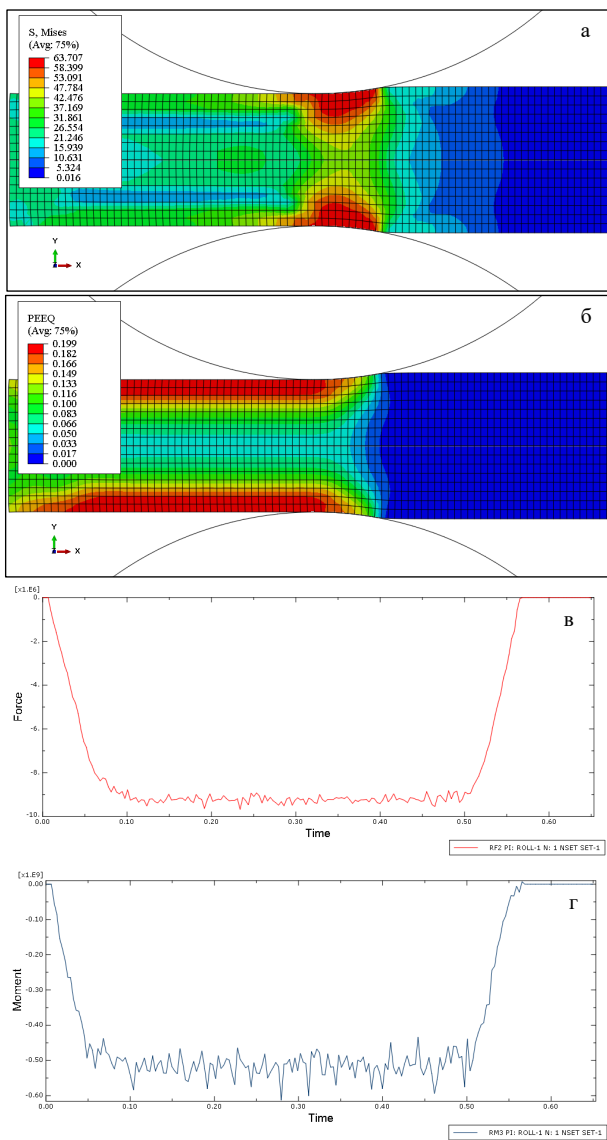
При подальшій прокатці в наступних проходах відбувається збільшення довжини цього суцільного поля напружень, разом зі збільшенням величини еквівалентної пластичної деформації. В проході 8 вже спостерігається формування суцільного шару з максимального напруження з подальшим його розширенням та змішування з шаром напружень, який дорівнює 90 %, з урахуванням розмірів осередку деформації. При цьому еквівалентний ступінь деформації на виході з осередку деформації, в залежності від глибини проникнення в товщину прокату, варіюється від 0,184 відн. од. до 0,246 відн. од, різниця складає 0,062 відн. од. Фактор форми  $l_d/h_{cp}$  становить 1,13. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що технологічна ефективність процесу прокатки, який моделюється, починає відбуватися з шостого проходу.

Деформація, яка здійснюється до шостого проходу спрямована здебільшого лише на досягнення необхідної форми прокату/заготовки. Під технологічною ефективністю мається на увазі здійснення процесу прокатки з суттєвим впливом на внутрішні процеси, що відбуваються по всій товщині, а не тільки на поверхневих шарах прокату.

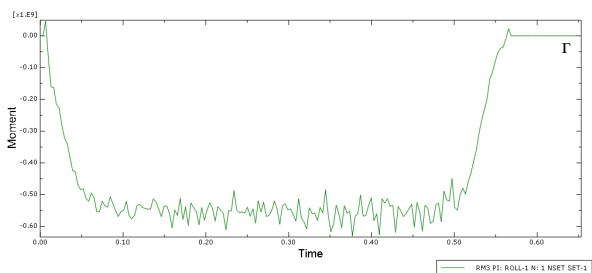
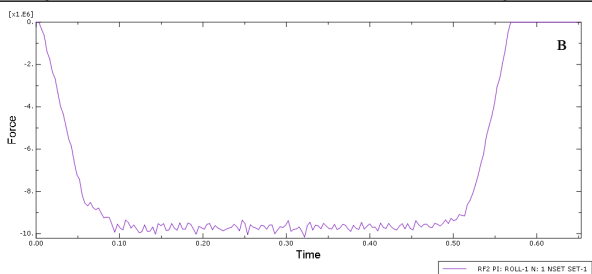
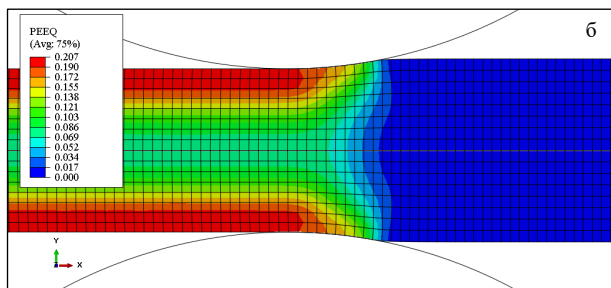
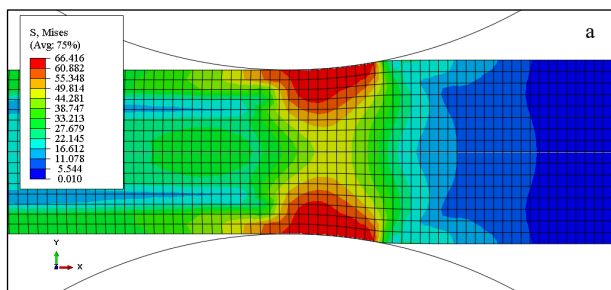
### **5.2.2 Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 1780 (Стеккеля) в середовищі Abaqus CAE**

Результати розрахунків полів еквівалентних напружень  $S$  (по Мізесу), еквівалентної пластичної деформації  $PEEQ$ , сили прокатки  $Force$  та моменту прокатки  $Moment$  по проходах в кліті стану 1780 (Стеккеля) наведено на рис. 5.16–5.18.

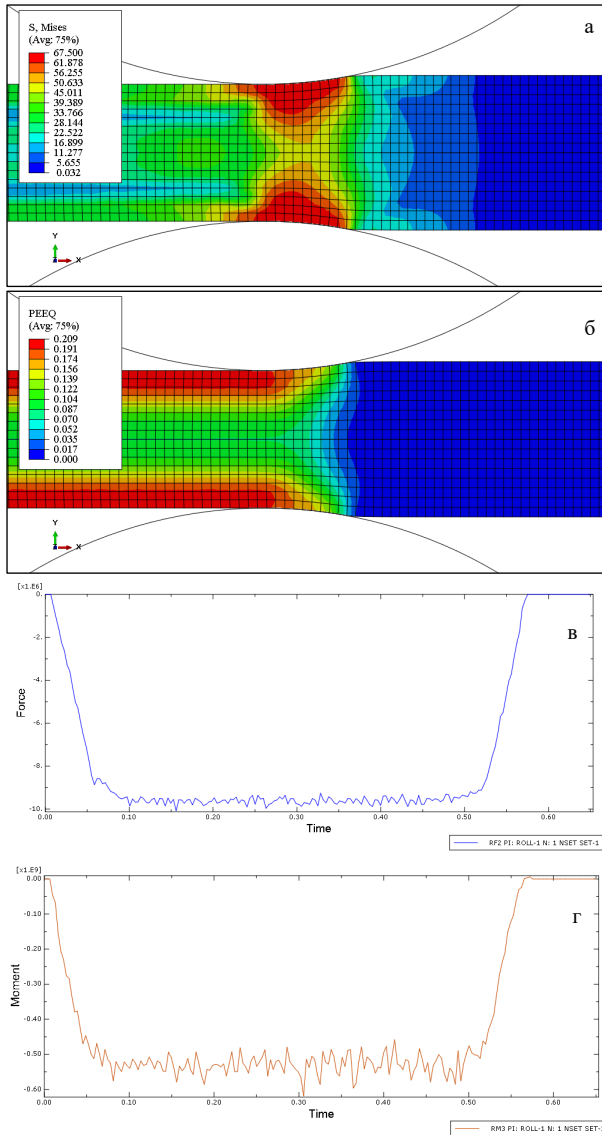
При моделюванні режимів прокатки сталі марки S355JR+AR в кліті стану 1780 (Стеккеля) по всіх трьох проходах спостерігається рівномірне проникнення еквівалентних напружень на всю глибину заготовки, при інших відповідних умовах прокатки. При цьому еквівалентна деформація на виході з осередку деформації по шарах є майже однаковою по всій глибини (товщині) прокату та має наступні відповідні значення: 0,422 відн. од., 0,228 відн. од., та 0,208–0,238 відн. од.



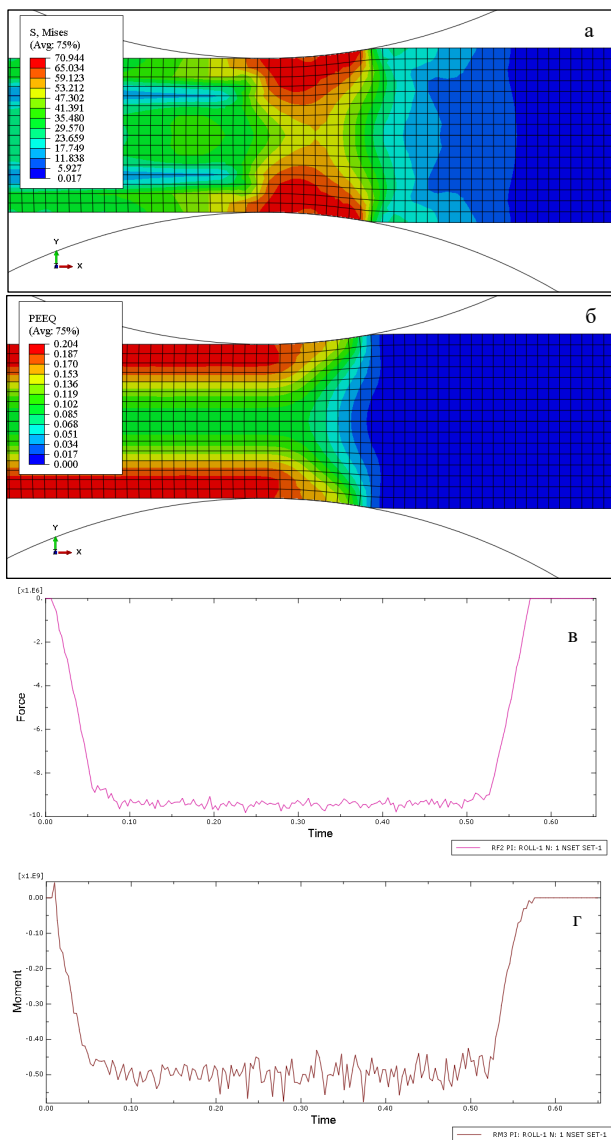
**Рисунок 5.5** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 1 стану 3170



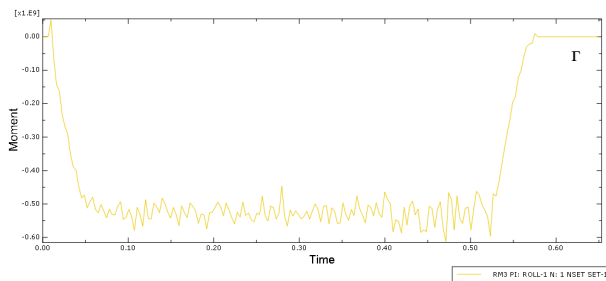
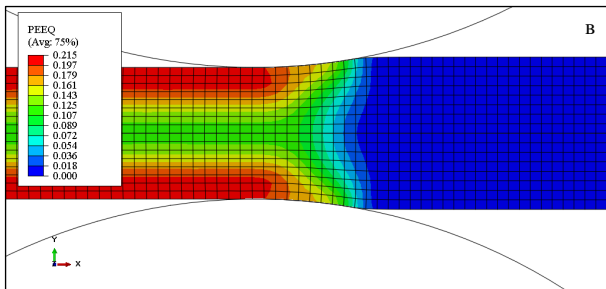
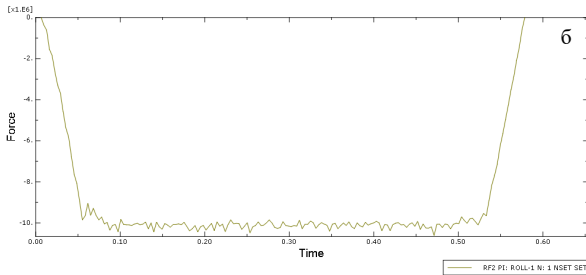
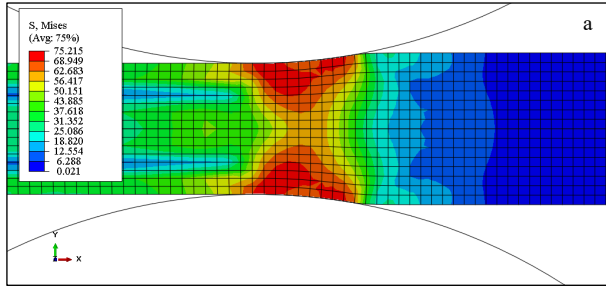
**Рисунок 5.6** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 2 стану 3170



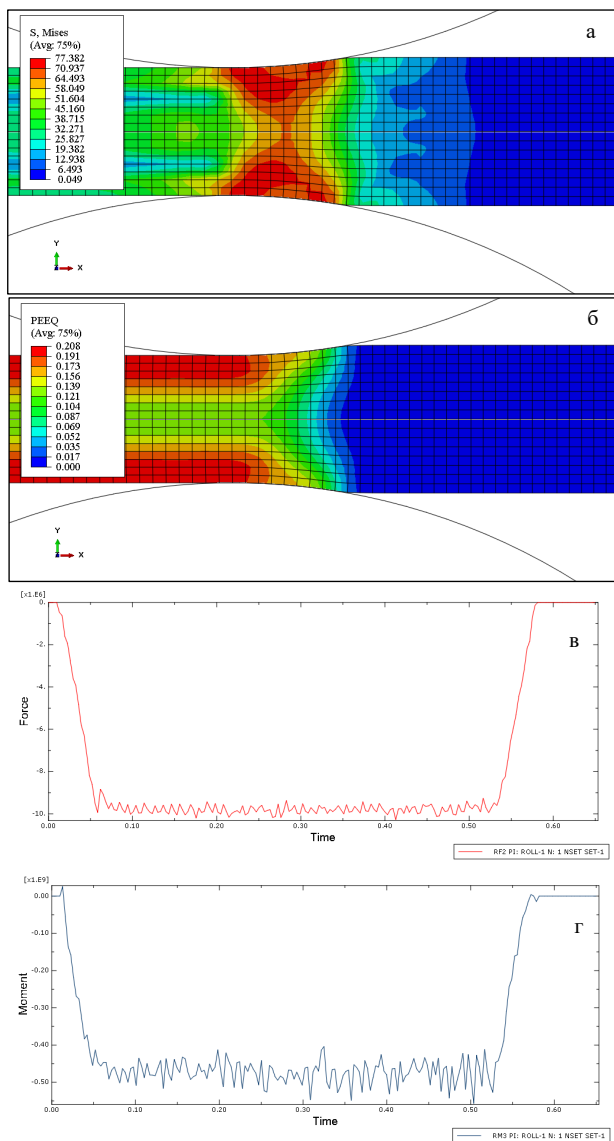
**Рисунок 5.7** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 3 стану 3170



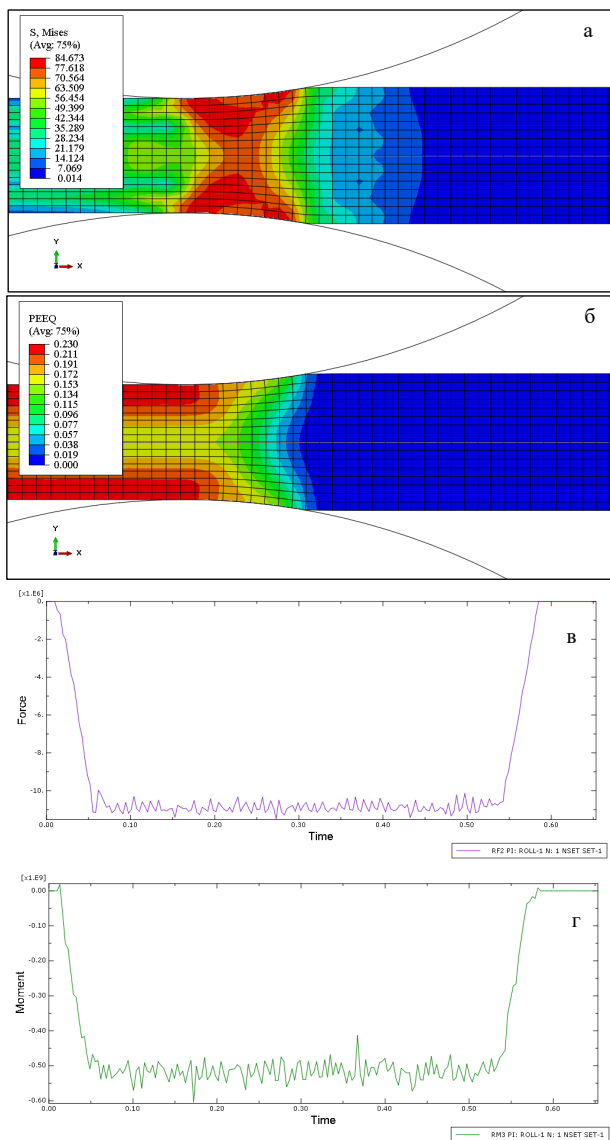
**Рисунок 5.8** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 4 стану 3170



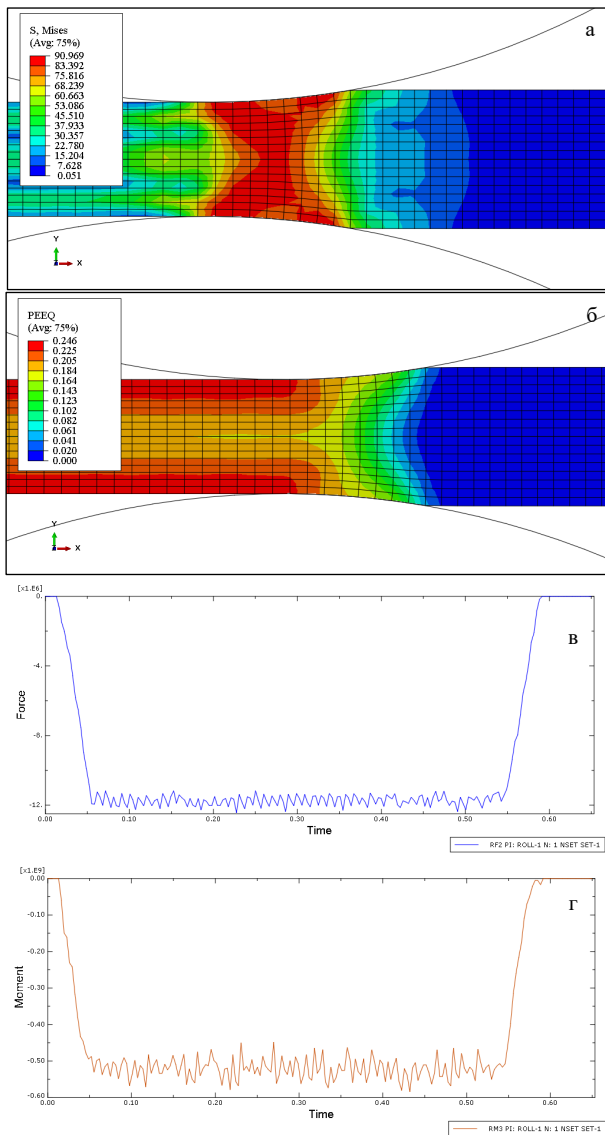
**Рисунок 5.9** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 5 стану 3170



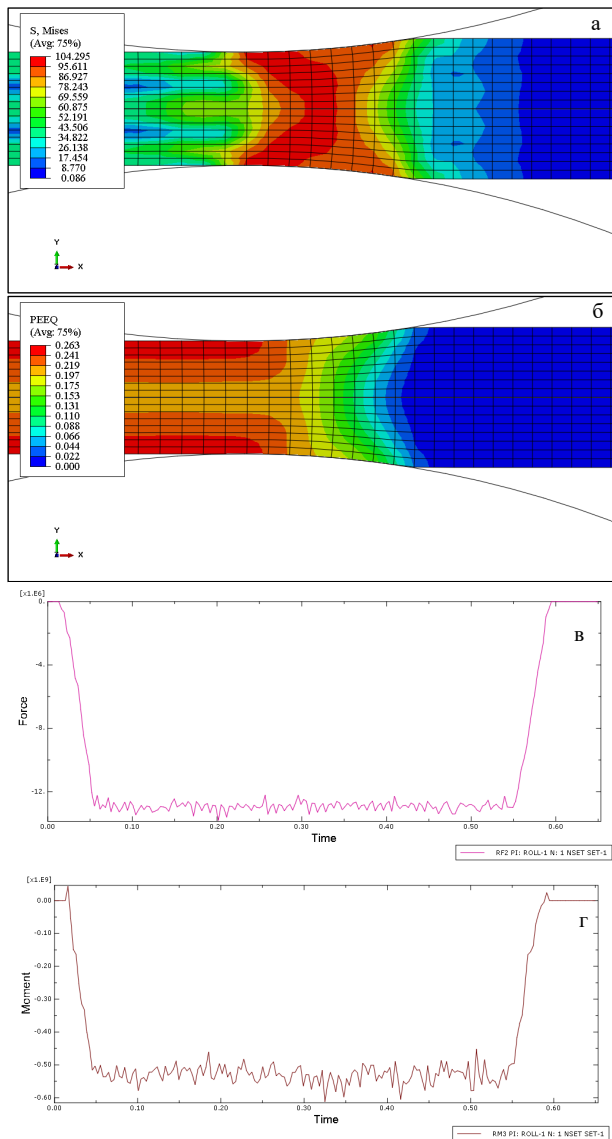
**Рисунок 5.10** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 6 стану 3170



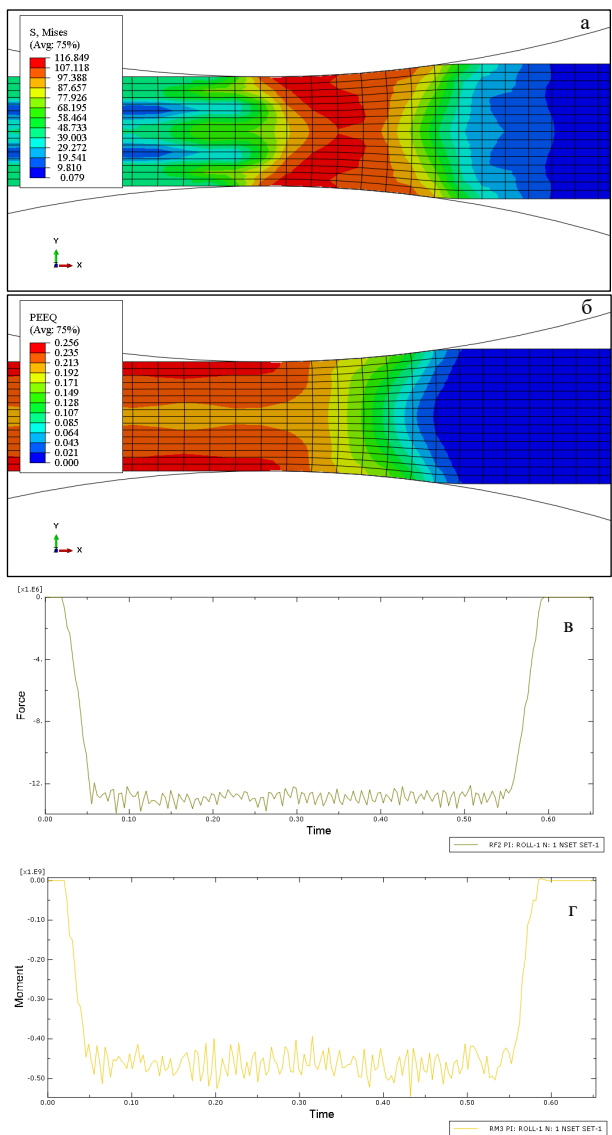
**Рисунок 5.11** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 7 стану 3170



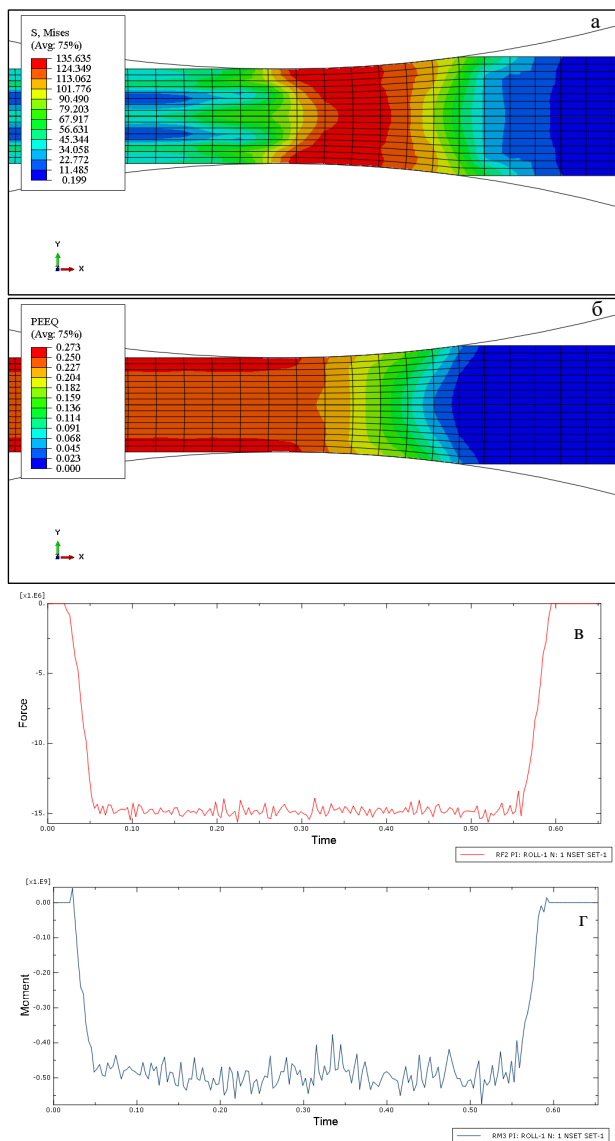
**Рисунок 5.12** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 8 стану 3170



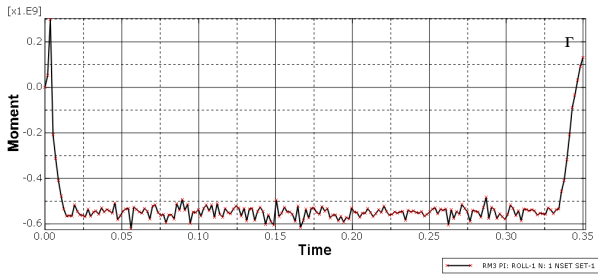
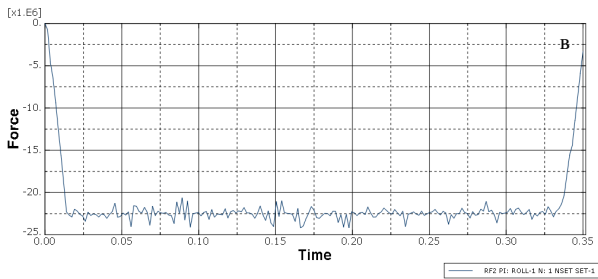
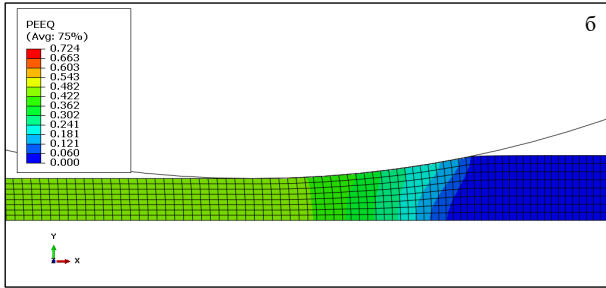
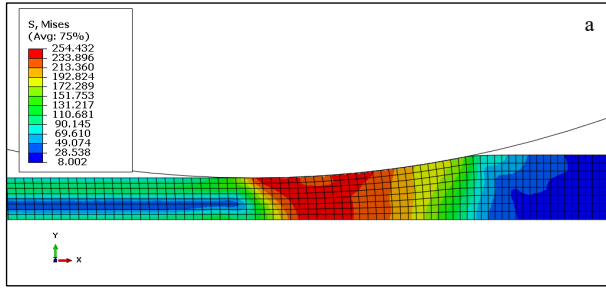
**Рисунок 5.13** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 9 стану 3170



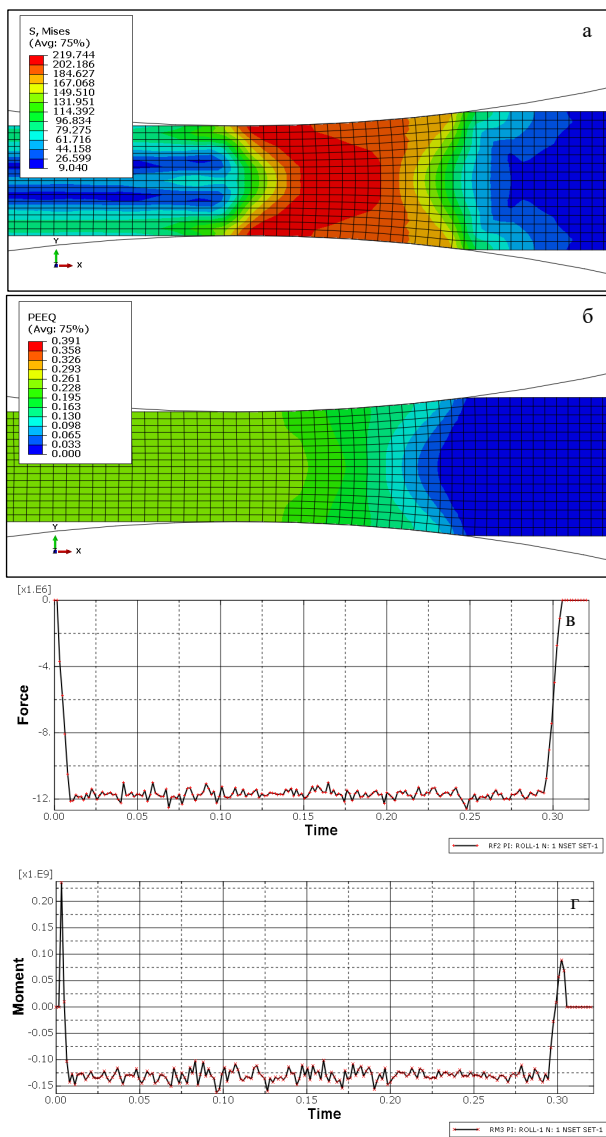
**Рисунок 5.14** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 10 стану 3170



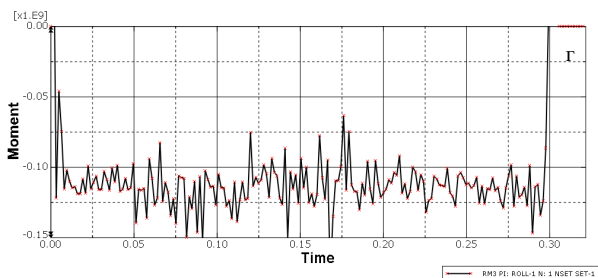
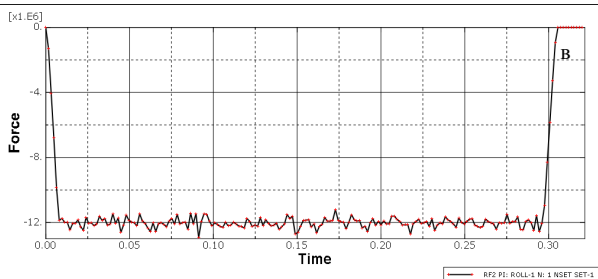
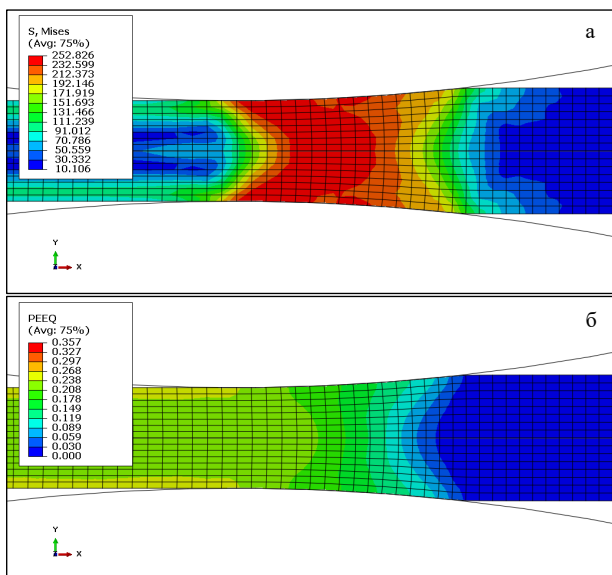
**Рисунок 5.15** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 11 стану 3170



**Рисунок 5.16** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 1 стану 1780 (Стеккеля)



**Рисунок 5.17** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 2 стану 1780 (Стекцеля)



**Рисунок 5.18** – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 3 стану 1780 (Стекляля)

Фактор форми  $l_d/h_{cp}$  по проходах становить 2,09–1,83–2,01. На підставі отриманих результатів можна зробити висновки, що при прокатці в кліті стану 1780 (Стеккеля) по всіх проходах рівномірне проникнення еквівалентних напружень та деформації здійснюється по всій товщині прокату. Максимальне еквівалентне напруження та напруження, яке дорівнює 90 % від максимального, мають суцільний шар по всій товщині прокату, з урахуванням розмірів осередку деформації.

### **5.3 Аналіз даних по результатах скінченно-елементного моделювання процесу прокатки рулонів на стані Стеккеля**

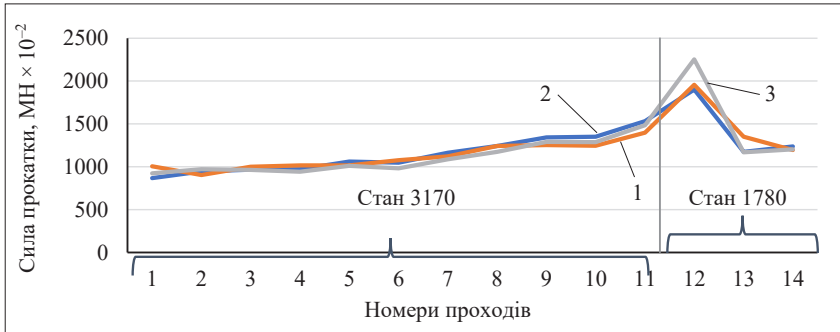
Результати розрахунків по проходах, отриманих за допомогою скінченно-елементного моделювання, порівнювали з фактичними результатами прокатки рулонів розмірами  $15 \times 1500$  мм зі сталі марки S355JR+AR. Додатково, з метою виявлення відхилень, пов'язаних з фіксацією фактичних показників прокатки, виконано аналогічні розрахунки за допомогою вдосконаленої аналітичної моделі технологічного процесу прокатки [47]. Порівняння результатів розрахунків температури та сили прокатки наведено в табл. 5.4. На підставі порівняльних розрахунків встановлено, що отримані відхилення сили прокатки між двома способами розрахунку та фактичними даними мають зіставні результати та схожу тенденцію змінення по проходах, рис. 5.19 [230]. Середнє значення отриманих відхилень не перевищує 1,54 % та  $-1,77$  % та свідчить про високу точність отриманих результатів розрахунків по обох способах [231]. Виконаний аналітичним способом перевірочний розрахунок змінення температури штаби по проходах, який було використано при математичному моделюванні, підтвердив наявність значних відхилень в фактичних температурах чорнової прокатки, що може бути пов'язане з місцем встановлення технологічних пірометрів та наявністю пари.

**Таблиця 5.4** – Порівняння фактичних результатів прокатки рулонів розмірами 15 × 1500 мм зі сталі марки S355JR+AR на стані Стеккеля з результатами розрахунків

Прокатний стан	№ проходу	H, мм	h, мм	Ступінь деформації, %	Фактичні дані		Розрахунок в аналітичній моделі		Розрахунок в Abaqus CAE	Відхилення розрахунків сили прокатки, %	
					t, °C <sup>a</sup>	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	t, °C <sup>a</sup>	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>		Abaqus від факту	Аналітична від факту
Стан 3170	1	221,3	200,49	9,40	1090	1007	1200	867,78	923,42	8,30	13,83
	2	200,49	178,82	10,81	1068	904	1194	946,42	970,29	-7,33	-4,69
	3	178,82	158,36	11,44	1068	1000	1187	965,31	963,11	3,69	3,47
	4	158,36	139,55	11,88	1044	1017	1179	970,42	943,00	7,28	4,58
	5	139,55	120,54	13,62	1073	1015	1169	1060,42	1011,41	0,35	-4,47
	6	120,54	103,88	13,82	1023	1077	1158	1048,15	981,68	8,85	2,68
	7	103,88	87,23	16,03	1055	1121	1144	1163,62	1088,26	2,92	-3,80
	8	87,23	71,81	17,68	1009	1243	1127	1243,94	1174,54	5,51	-0,08
	9	71,81	57,87	19,41	1027	1254	1105	1341,91	1291,21	-2,97	-7,01
	10	57,87	46,82	19,09	1027	1246	1076	1350,15	1288,40	-3,40	-8,36
	11	46,82	37,16	20,63	1041	1397	1037	1532,49	1484,29	-6,25	-9,70
Середнє										1,54	-1,23
Стан 1780	1	37,16	23,95	35,55	999	1957	999	1900,98	2253,24	-15,14	2,86
	2	23,95	18,98	20,75	958	1351	973	1173,79	1169,96	13,40	13,12
	3	18,98	15,17	20,07	920	1195	931	1236,66	1202,42	-0,62	-3,49
Середнє										0,38	-1,77

<sup>a</sup> вказана температура перед проходом

Таким чином підтверджено правомірність використання розрахованих аналітичним способом температур прокатки для скінченно-елементного моделювання.



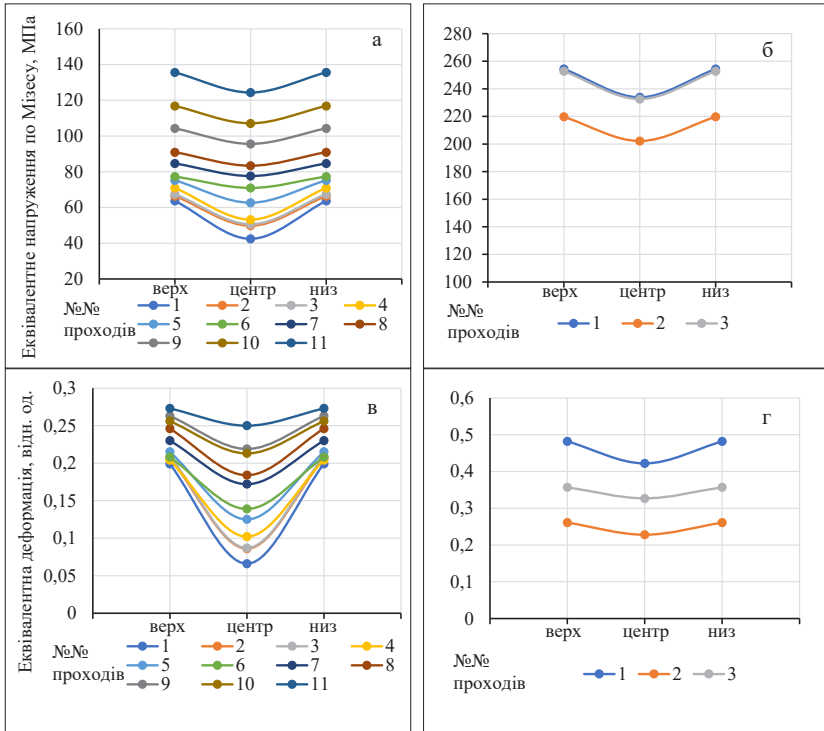
**Рисунок 5.19** – Змінення сили прокатки по проходах по фактичних даних (1), по аналітичних розрахунках (2), по результатах математичного моделювання (3)

Розподіл еквівалентних напружень по Мізесу та еквівалентної деформації по проходах в клітях стану 3170 та 1780 виглядає наступним чином, рис. 5.20.

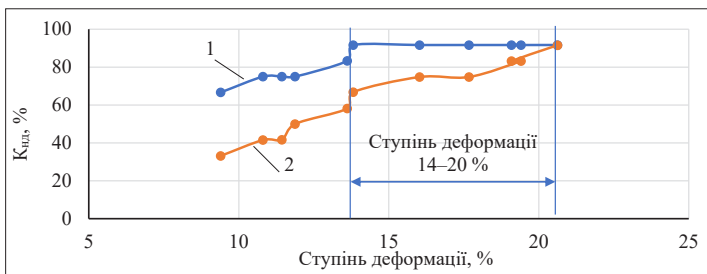
Таким чином, в кліті 3170, по проходах відбувається збільшення інтенсивності еквівалентних напружень по Мізесу, а, відповідно і еквівалентної деформації в центральній частині штаби (заготовки) по відношенню до верхніх та нижніх шарів заготовки. В кліті 1780 такої залежності не встановлено, інтенсивність еквівалентної деформації та еквівалентних напружень по Мізесу по шарах перерізу є майже однаковою по всіх проходах.

Для встановлення аналітичним методом умов прокатки при яких забезпечується рівномірність розподілу еквівалентних напружень та еквівалентної деформації по товщині, що виражена коефіцієнтом  $K_{нд}$ , на рівні 90 % та характеризує проникнення максимального еквівалентного напруження та еквівалентної деформації в центральну частину заготовки, для умов прокатки на стані 3170 та стані 1780, побудуємо наступні графіки, рис. 5.21, 5.22.

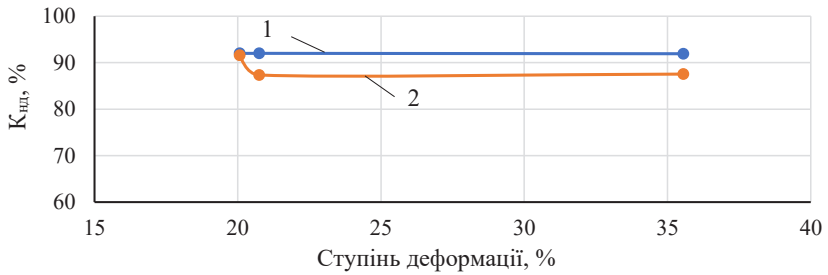
Оцінку залежності коефіцієнту  $K_{нд}$  для еквівалентного напруження та деформації від форми осередка деформації  $l_d/h_{cp}$  виконано на підставі даних, рис. 5.23.



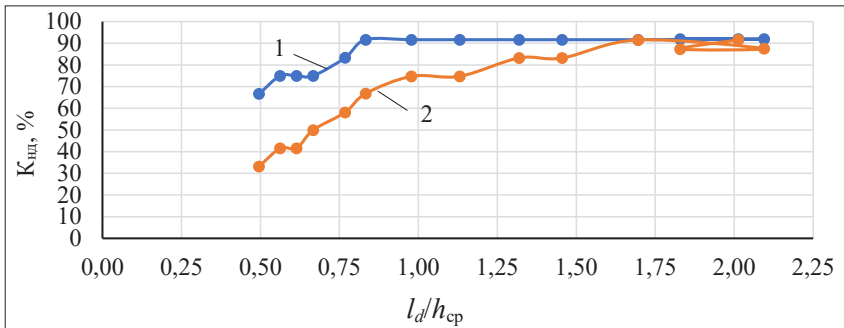
**Рисунок 5.20** – Розподіл по проходах у кліті 3170 та кліті 1780 еквівалентних напружень по Мізесу (а), (б), та еквівалентної деформації (в), (г) відповідно



**Рисунок 5.21** – Залежність коефіцієнта  $K_{нд}$  для рівня еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від ступеня деформації на стані 3170



**Рисунок 5.22** – Залежність коефіцієнта  $K_{нд}$  для рівня еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від ступеня деформації на стані 1780



**Рисунок 5.23** – Залежність коефіцієнта  $K_{нд}$  для рівня еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від форми осередка деформації  $l_d/h_{cp}$

Таким чином, отримання коефіцієнту  $K_{нд}$  для еквівалентного напруження на рівні 90% в центральній частині заготовки, або інакше рівномірності еквівалентного напруження, яке дорівнює 90% по перерізу заготовки, забезпечується при ступені деформації 14%, що відповідає деформації в 6 проході чорнової кліті стану Стеккеля.

Рівномірність проникнення еквівалентної деформації  $K_{нд}$ , яка дорівнює 90%, по перерізу заготовки, забезпечується при ступені деформації 20%, що відповідає деформації в 11 проході чорнової кліті стану Стеккеля.

На підставі отриманих результатів аналізу рівномірності проникнення по перерізу заготовки коефіцієнту  $K_{нд}$  для еквівалентного напруження та еквівалентної деформації можна встановити деформаційні умови при чорновій прокатці, які знаходяться в межах від 14 % до 20 %, та дійсні для форми осередку деформації від 0,83 або більше, і забезпечують покращення рівномірності успадкованих параметрів якості по перерізу в кінцевому прокаті.

При чистовій прокатці, на стані 1780, по всіх проходах в умовах квазістаціонарного розподілу температур на стані Стеккеля умови прокатки є достатніми для забезпечення рівномірності розподілу коефіцієнту  $K_{нд}$  еквівалентних напружень та еквівалентної деформації на рівні 90 %.

Слід зазначити, що розраховані коефіцієнти  $K_{нд}$  по стану 3170 та стану 1780 не перевищують значення 0,92 %, тому, збільшення обтиснення більше ніж 20 % не впливає на підвищення рівномірності проникнення напружень та деформації по товщині.

Застосування коефіцієнту  $K_{нд}$  для визначення рівномірності проникнення як еквівалентного напруження так і по еквівалентній деформації пов'язано з можливістю його використання для обох вказаних характеристик. Так як процеси рекристалізації пов'язані з напруженням, для керування властивостями прокату, що успадковуються, при розробці технології рекомендується використовувати коефіцієнти  $K_{нд}$  визначені для еквівалентного напруження.

Отримані методом математичного моделювання результати по необхідному рівню деформації для забезпечення внутрішньої якості прокату на стадії чорнової прокатки є порівняльними з дослідженнями, виконаними з використанням залежностей Холла – Петча, з встановлення рівня деформації для забезпечення якомога дрібнішого розміру зерна, та доповнюють дослідження, виконані авторами роботи [200], в тому числі в частині встановлення проникнення рівня деформації по товщині.

Таким чином, отримані результати дозволяють керувати процесами внутрішньої якості та комплексом властивостей прокату, які необхідно отримати шляхом розробки відповідних технологічних режимів із врахуванням ступеня деформації.

## Висновки до розділу 5

1. По результатах моделювання методом скінченних елементів в умовах стану Стеккеля отримано розподіл полів еквівалентних напружень та еквівалентної деформації по проходах, розраховано енергосилові параметри процесу прокатки. При порівнянні енергосилових параметрів, отриманих методом скінченних елементів та розрахованих аналітичним методом з фактичними даними по результатах прокатки рулонів розмірами  $15 \times 1500$  мм з конструкційної сталі марки S355JR+AR на стані Стеккеля, середнє значення відхилення не перевищує 1,54 % та  $-1,77$  % відповідно, що свідчить про високу точність отриманих результатів обома способами розрахунку. Встановлено, що максимальний розподіл рівномірності деформації по товщині підкату, який характеризується коефіцієнтом  $K_{нд}$ , при прокатці конструкційної марки сталі типу S355JR+AR забезпечується при наступних умовах: температурі  $\leq 1150$  °C, ступені деформації  $\geq 14$  % та показнику осередку деформації  $\geq 0,83$ . Значення коефіцієнта  $K_{нд}$  при цих параметрах становить 90 %.

2. Встановлено, що при чистовій прокатці по всіх проходах в умовах квазістаціонарного розподілу температур на стані Стеккеля деформація, яка відбувається, забезпечує отримання коефіцієнта  $K_{нд}$  на рівні 90 %.

3. Визначено, що в досліджених межах параметрів прокатки конструкційної марки сталі типу S355JR+AR – температура прокатки 1200–1037 °C, ступені деформації 0,09–0,35 відн. од., показнику осередку деформації 0,5–2,09, коефіцієнт  $K_{нд}$  не перевищує значення 92 %, тому обтиснення  $\geq 20$  % забезпечує найкращу рівномірність деформації по товщині розкату в дослідженому діапазоні.

4. Отримані результати по визначенню умов забезпечення розподілу максимальної рівномірності деформації методом скінченно-елементного моделювання дозволяють керувати процесами внутрішньої якості та комплексом властивостей прокату, які необхідно отримати шляхом розробки відповідних технологічних режимів. Отримані результати можуть бути використані для розробки технології гарячої прокатки (з однією або кількома стадіями чорнової прокатки) на інших типах станів та комплексів основного устаткування зі схожими технологічними параметрами.

---

## ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ ТА ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ СПОСОБОМ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ

---

### **6.1 Розробка технології в межах внутрішньої координації між підприємствами однієї компанії**

#### **6.1.1 Розробка технології виробництва листового прокату розмірами $4 \times 3125 \times 16000$ на стані 3200 заводу Trametel, Італія, зі слябу товщиною 220 мм**

В даному розділі наведено результати розробки технологічних рекомендацій та промислове впровадження технологічних процесів із засвоєння виробництва нових продуктів, на підставі аналізу ринку, попиту Замовників, приведення рівня сортаменту, що виробляється до рівня, який відповідає сучасним світовим вимогам та тенденціям, а також досягнення сучасного рівня якості продукції.

Однією з гілок досягнення мети в межах однієї компанії є внутрішня координація між підприємствами, яка дозволяє за рахунок використання необхідної промислової потужності на різних підприємствах однієї компанії, отримати необхідний консолідований результат.

Відомо, що товстолистові стани спеціалізуються на виробництві прокату товщиною від 5 мм та більшою. Однак попит ринку потребує виробництва більш тонкого прокату в сортаменті ширин, які виробляються на товстолистових станах і які, зазвичай, не можуть бути замінені сортаментом безперервних станів гарячої прокатки. Для виробництва прокату товщиною менше 5 мм здебільшого використовують сляби меншої товщини, цільове використання яких – рулонний прокат, це порушує баланс металу на підприємствах та змушує змінювати виробничі пріоритети.

Актуальність розробки та оптимізації технології прокату листів товщиною 4 мм зі слябу товщиною 220 мм замість слябів товщиною 150 мм на заводі Trameal обумовлена потребою в розширенні сортаменту, а також недостатнім обсягом слябів товщиною 150 мм в компанії METINVEST.

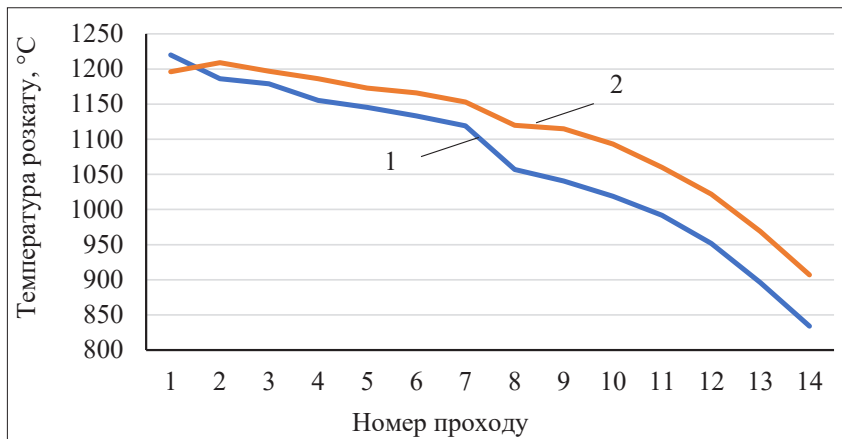
Метою даного дослідження є розробка технології виробництва прокату товщиною 4 мм при використанні безперервно литих слябів товщиною 220 мм замість слябів товщиною 150 мм для умов стану 3200 заводу Trameal, Італія.

Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування стану 3200 наведені в розділі 1.3.1.3.

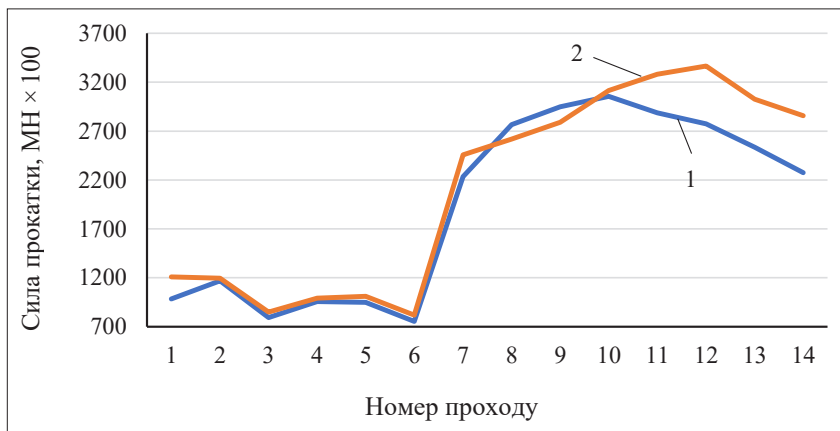
Для проектування технології було виконано перевірку розробленої аналітичної моделі технологічного процесу прокатки [57, 59], яку буде використано задля подальших розрахунків.

Перевірку було виконано на фактичних даних з температури та сили прокатки, які були отримані при прокатці листів розмірами  $5 \times 3125 \times 12000$  мм зі сталі категорії A320, сляб № 1TL5800906 з фактичними розмірами  $217 \times 1355 \times 780$  мм.

Результати моделювання наведені на рис. 6.1, 6.2.



**Рисунок 6.1** – Змінення розрахованої (1) та фактичної (2) температури по проходах у кліті 3200



**Рисунок 6.2** – Змінення розрахованої (1) та фактичної (2) сили прокатки по проходах у кліті 3200

Результати розрахунку для перевірки аналітичної моделі наведені у табл. 6.1 [232]. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки склала 4,3 %, при моделюванні сили прокатки – 7,9 %. Слід зазначити, що достатньо великі похибки по силі прокатки у проході № 1 пов’язані зі зміною температури металу після гідрозбиву окалини, а у проходах №№ 11–14 отримані у наслідок впливу переохолоджених торців прокату, які не враховувались при моделюванні внаслідок відсутності фактичних даних по температурі цих ділянок. Підтвердженням впливу переохолоджених торців є перевищення фактичної сили прокатки у проходах №№ 11–14 з одного боку.

Таким чином отримані похибки температури та сили прокатки дозволяють виконати моделювання технології для стану 3200 заводу Trametel. Слід зазначити, що при максимальній силі прокатки 40 МН, фактична сила не перевищує 33,6 МН, що свідчить про наявність резерву який можливо використати.

Перевірка необхідної потужності головних двигунів через середньоквадратичні моменти показала наявність суттєвого резерву, при сумарній потужності двох двигунів 7000 кВт,

фактична потужність при прокатці розрахованого сортаменту не перевищила 2900 кВт.

**Таблиця 6.1** – Результати перевірного розрахунку аналітичної моделі

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °С			Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>			
				Розрахунок	факт	Δ, %	Розрахунок	факт	Δ, МН × 10 <sup>-2</sup>	Δ, %
1	217	182,16	1387	1220,0	1196	-2,0	985,3	1209,3	224,0	18,5
2	182,16	146,41	1387	1186,1	1209	1,9	1169,4	1196,9	27,5	2,3
3	146,41	123,64	1200	1178,9	1197	1,5	792,2	849,9	57,7	6,8
4	123,64	98,83	1200	1155,4	1186	2,6	956,7	991,1	34,4	3,5
5	98,83	77,47	1200	1145,5	1173	2,3	948,0	1010,8	62,8	6,2
6	77,47	64,0	1200	1133,2	1166	2,8	754,3	818,5	64,2	7,8
7	64,0	50,2	3146	1118,9	1153	3,0	2234,2	2457,9	223,7	9,1
8	50,2	37,58	3146	1057,1	1120	5,6	2765,7	2618,7	-147,0	-5,6
9	37,58	26,56	3146	1040,6	1115	6,7	2949,7	2788,9	-160,8	-5,8
10	26,56	17,85	3146	1018,9	1093	6,8	3055,0	3113,7	58,7	1,9
11	17,85	12,09	3146	991,7	1060	6,4	2887,5	3280,4	392,9	12,0
12	12,09	8,42	3146	951,7	1022	6,9	2773,8	3365,1	591,3	17,6
13	8,42	6,36	3146	895,9	969	7,5	2535,9	3025,7	489,8	16,2
14	6,36	5,22	3146	834,0	907	8,0	2274,4	2857,3	582,9	20,4
Середня похибка						4,3				7,9

У таблиці 6.1, «H» та «h» – це товщина розкату до та після проходу в кліті, «B» – ширина прокату.

На основі виконаного аналізу пропонується декілька наступних варіантів технології виробництва прокату товщиною 4 мм зі слябів «МК «АЗОВСТАЛЬ» товщиною 220 мм [233].

Розробка технології виробництва листового прокату розмірами 4 × 3125 × 16 000 мм зі слябів товщиною 220 мм сталі марки А320 (аналог марки S355 згідно з вимогами стандарту EN 10025-2) здійснювалась для умов стану 3200 заводу Tramelal.

Хімічний склад сталі, яка використовується, наведено в табл. 6.2.

**Таблиця 6.2** – Хімічний склад сталі марки А320, з якої вироблявся прокат

Марка сталі	Масова доля елементів, %															
	C	Mn	Al	Nb	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	V	Mo	Ti	N	B	H
	не більше, або в межах															
А320	0,14–0,16	1,35–1,50	0,020–0,050	0,005	0,20–0,30	0,005	0,020	0,07	0,05	0,05	0,01	0,02	0,005	0,012	0,0005	0,0005

З метою мінімізації змін до існуючого регламенту роботи устаткування стану 3200 заводу Grametal при проектуванні технології розрахований рівень енергосилових параметрів тримався на рівні, який фактично використовується згідно з існуючою технологією.

*Перший варіант технології*

Розбивка розкату до отримання необхідної ширини готового прокату виконується однаково у всіх варіантах.

У всіх варіантах початкова температура прокатки складає 1220 °С. Товщина та ширина в таблицях вказані у гарячому стані.

Результати розрахунку наведені в табл. 6.3.

**Таблиця 6.3** – Розрахунок режимів прокатки листів розмірами 4 × 3125 × 16000, варіант 1

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °С	Час паузи, с	Швидкість, м/с	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	219,4	180	1373	1220	58	1,92	1079,2
2	180	146	1373	1175	6	2,00	1177,7
3	146	125	1200	1168	30	2,11	787,9
4	125	98	1200	1138	6	2,23	1105,0
5	98	77	1200	1130	6	2,27	1019,8
6	77	63	1200	1117	6	2,34	851,1
7	63	48	3181	1104	30	2,11	2629,9
8	48	36	3181	1047	6	2,23	2955,9

## Продовження таблиці 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8
9	36	26	3181	1031	7	2,31	3036,4
10	26	18	3181	1001	7	2,50	3251,4
11	18	12	3181	970	6	2,73	3417,3
12	12	8,2	3181	930	6	2,88	3304,9
13	8,2	5,8	3181	873	6	3,23	3412,7
14	5,8	4,6	3181	801	6	3,42	3016,6
15	4,6	4	3181	720	6	3,54	2683,5

Перший варіант характеризується використанням часу пауз, який звичайно використовуються при прокатці на стані 3200.

Сила прокатки у проходах № 11 та № 13 з урахуванням додаткового підвищення до 600 МНх100 від впливу переохолоджених торців наближується до максимальної сили згідно з характеристиками стану, що становить певний ризик.

Температура закінчення прокатки становить 720 °С, що відповідає умовам контрольованої прокатки або прокатки ТМСР, і не відповідає умовам гарячої або нормалізувальної прокатки. Реалізація такого варіанту технології буде мати суттєві обмеження сортаменту, який виробляється.

#### Другий варіант технології

У другому варіанті технології час пауз між проходами був скорочений до рівня, який застосовується на товстолистових станах гарячої прокатки, наприклад, на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», та стані 3000 «ММК «ИМЕНИ ЛІЛЧА». Також зниження часу пауз (до 10 с замість 58 с та 30 с відповідно) між проходами підтверджене фактичними даними при прокатці листів товщиною 4,5 × 2585 мм зі сляба товщиною 150 мм на стані 3200 заводу Trameal. Результати розрахунку наведені в табл. 6.4.

За рахунок зменшення часу пауз вдалось підвищити температуру металу по проходах, що призвело до зниження сили прокатки.

Зниження навантаження по проходах дозволило оптимізувати увесь режим прокатки шляхом зменшення кількості проходів до 13-ти та отримати температуру закінчення прокатки на рівні 826 °С.

**Таблиця 6.4** – Розрахунок режимів прокатки листів розмірами  $4 \times 3125 \times 16000$ , варіант 2

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °С	Час паузи, с	Швидкість, м/с	Сила прокатки, МН $\times 10^{-2}$
1	219,4	180	1373	1220	10	1,92	1079,2
2	180	146	1373	1210	5	2,00	1065,7
3	146	125	1200	1203	10	2,11	712,8
4	125	98	1200	1188	5	2,23	954,2
5	98	77	1200	1179	5	2,27	882,2
6	77	63	1200	1165	5	2,34	737,6
7	63	48	3181	1151	10	2,11	2280,0
8	48	32	3181	1122	5	2,23	2909,9
9	32	20	3181	1102	5	2,31	2923,9
10	20	12	3181	1063	5	2,50	2979,1
11	12	7,5	3181	1013	5	2,73	2837,0
12	7,5	5	3181	934	5	2,88	2926,9
13	5	4	3181	826	5	3,23	2493,7

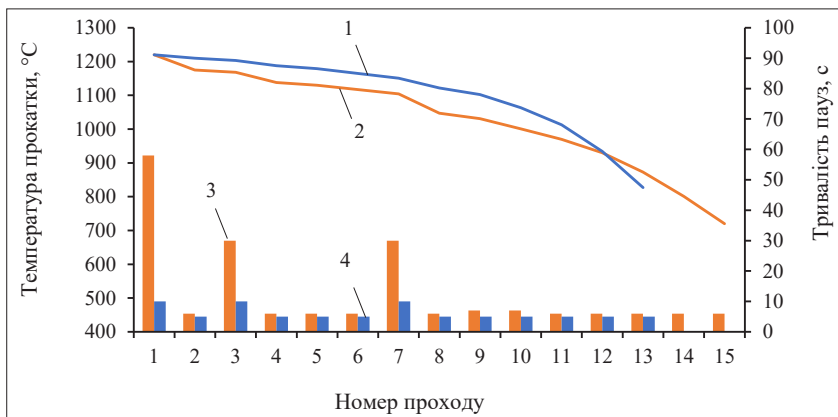
Сила прокатки в усіх проходах з урахуванням додаткового підвищення до  $600 \text{ МН} \times 10^{-2}$  від впливу переохолоджених торців не перевищує максимальної сили, згідно з характеристиками стану.

Такий варіант дозволяє виробляти прокат без технологічних обмежень, тобто за технологією гарячої, нормалізувальної, контрольованої прокатки або ТМСР.

Для останніх двох технологій необхідно буде зробити паузу перед останніми проходами з метою виконання деформації в зоні міжкритичного перетворення, або в зоні вже утвореного  $\alpha$ -заліза, залежно від вимог.

Порівняння зниження температури та зменшення часу пауз по двох варіантах наведено на рис. 6.3.

Порівняння двох варіантів технології свідчить про суттєві технологічні переваги варіанту 2, які формуються вже на перших шістьох проходах при розбивці ширини.



**Рисунок 6.3** – Змінення розрахованої температури по варіанту 1 (1), варіанту 2 (2) та тривалості пауз по варіанту 1 (3), варіанту 2 (4) по проходах у кліті 3200

Таким чином, шляхом внутрішньої координації між підприємствами компанії МЕТИНВЕСТ, розроблена технологія виробництва прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametал зі слябів товщиною 220 мм (замість слябу 150 мм) виробництва «МК «АЗОВСТАЛЬ». Нова технологія дозволяє ліквідувати дефіцит слябу 150 мм в компанії та задовільнити вимоги європейських Замовників з виробництва широкого прокату товщиною 4 мм.

По результатах даного дослідження виконано перевірку розробленої аналітичної моделі на фактичних даних, отриманих на стані 3200 заводу Trametал. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки склала 4,3 %, при моделюванні сили прокатки 7,9 %.

Показана принципова можливість використанні слябу товщиною 220 мм замість слябу товщиною 150 мм для виробництва прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametал.

Розроблена технологія прокатки листів розмірами  $4 \times 3125 \times 16\,000$  мм зі слябу розмірами  $217 \times 1355 \times 780$  мм, яку можливо використовувати для виробництва прокату способом гарячої, нормалізувальної, контрольованої або термомеханічної прокатки не обмежуючи існуючий марочний сортамент.

## **6.1.2 Розробка технології виробництва термомеханічного прокату на стані Стеккеля**

### **6.1.2.1 Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля**

У деяких випадках, розробка нової технології потребує поглибленого вивчення та адаптації окремих етапів проектування, наприклад врахування особливостей теплових втрат металу, вдосконалення та перевірка точності розрахунків за допомогою аналітичних моделей, що використовуються.

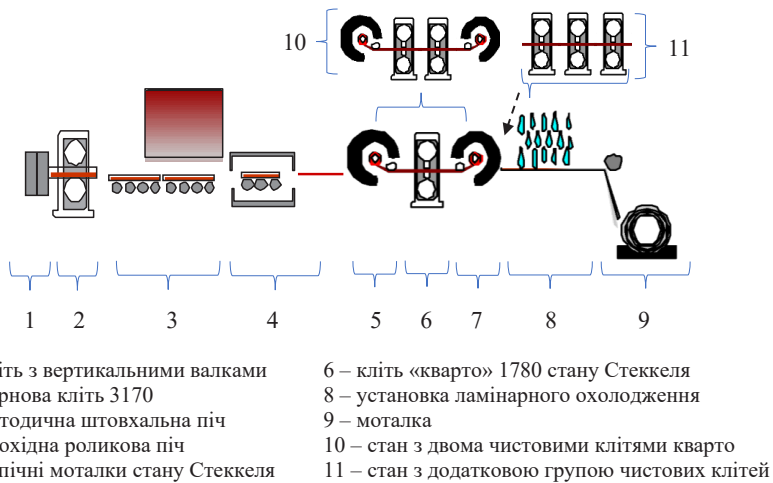
При проектуванні технології важливо щоб розрахунки, які були виконані, з достатньою точністю описували технологічні процеси. Особливо важлива точність при проектуванні технології ТМСР, яка отримала широке застосування у наслідок своєї економічності та досягнення унікального комплексу властивостей. Ця технологія реалізується в достатньо вузькому діапазоні температур  $\gamma$ - $\alpha$  перетворень. Розробка технології ТМСР для умов станів Стеккеля потребує особливого підходу до розрахунків температурних параметрів, з урахуванням особливостей цих станів.

Серед існуючих прокатних комплексів, стани Стеккеля займають особливе місце.

Актуальність розрахунків температурних процесів прокатки на станах Стеккеля обумовлена потребою в розширенні сортаменту та технічних можливостей при виробництві рулонного прокату, в тому числі на заводі *Ferrier Valsider*.

Метою дослідження є уточнення методики розрахунку змінення температури металу при прокатці на станах Стеккеля, яка враховує фактори швидкості руху полоси, довжину рольгангу та довжину дуги контакту металу з валками, а також фактори, які впливають на температуру розкату в пічних моталках, стосовно до умов стану Стеккеля заводу *Ferrier Valsider*.

Схему розміщення основного устаткування стану Стеккеля заводу *Ferrier Valsider*, та деяких існуючих варіантів розміщення устаткування станів Стеккеля, наведено на рис. 6.4.



**Рисунок 6.4** – Схема технологічної лінії з виробництва гарячекатаних рулонів на заводі Ferreria Valsider та деякі існуючих варіантів розміщення устаткування станів Стекеля

Детальній сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування заводу Ferreria Valsider наведені в розділі 1.3.3.

Відмінною особливістю розрахунку температурного режиму прокатки на стані Стекеля є необхідність врахування додатково до відомих факторів [126–128], фактору зміни температури металу в пічних моталках, а також особливостей розрахунку змінення температури розкату на ділянці «стан – пічні моталки».

Сумарний час, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на станах Стекеля визначається по методиці аналогічній той, що застосовується для чистових груп безперервних станів:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_{t1}, \quad (6.1)$$

де  $\tau$  – час, який витрачається на прокатку розкату в кліті, сек;  $\tau_{t1}$  – час транспортування розкату між кліттю та пічною моталкою, с.

Час, який витрачається на прокатку в кліті, рахується по формулі:

$$\tau = \frac{l_g}{v_{roll} \times 1000}, \quad (6.2)$$

де  $l_g$  – довжина дуги контакту, мм;  $v_{roll}$  – швидкість прокатки, м/с.

Час транспортування розкату між кліттю та пічними моталками визначається залежністю:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{v_{roll}}, \quad (6.3)$$

де  $l_r$  – довжина рольгангу між кліттю та пічною моталкою, м.

Розрахунок змінення температури металу в пічних моталках виконується по наступних залежностях.

Для розрахунку допустимих розмірів заготовки (сляба), яка використовується для виробництва гарячекатаного рулону, виконуємо перевірку максимально-можливої маси рулону для змотування в пічній моталці виходячи з її конкретних технічних характеристик (допустимої маси ( $m_{max/wind}$ ) та максимального діаметру рулону, який змотується), т:

$$m_{max/wind} = \left( \frac{\pi D_{max/coil}^2}{4} - \frac{\pi D_d^2}{4} \right) \times \frac{b}{1000} \times 7,85, \quad (6.4)$$

де  $D_d$  – діаметр пічного барабану, м;  $D_{max/coil}$  – максимальний діаметр рулону в печі, за характеристиками устаткування, м;  $b$  – ширина прокату, мм; 7,85 – питома щільність сталі, г/мм<sup>3</sup>.

Розрахунок змінення температури металу в пічній моталці виконуємо для умов одностороннього нагріву термічно тонкого тіла (нескінченної полоси товщиною рівною товщині розкату за час рівний часу намотування останнього вітка на барабан), згідно із залежністю, отриманою з рівняння [203]:

$$t_{met/fur} = t_{fur} - (t_{fur} - t_{met}) \times \exp \left( \alpha_{\Sigma} \times \frac{-\tau_w}{\frac{h}{1000} \times 7,85 \times c_p} \right), \quad (6.5)$$

де  $t_{fur}$  – температура в печі, °C;  $t_{met}$  – температура металу перед піччю, °C;  $\alpha_{\Sigma}$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі;  $c_p$  – теплоємність

сталі яка прокатується, Дж/(кг К),  $h$  – товщина прокату, мм;  $\tau_w$  – тривалість намотування останнього вітка, с.

Тривалість намотки останнього витка на барабан пічної моталки визначаємо з формули:

$$\tau_w = \frac{2\pi R_{d/met}}{v_{rol}}, \quad (6.6)$$

де  $R_{d/met}$  – радіус барабану з металом, м;  $v_{rol}$  – швидкість руху штаби (швидкість прокатки), м/с.

Радіус барабану з металом визначаємо згідно із залежністю:

$$R_{d/met} = \sqrt{\frac{h \times l}{\pi \times 1000} + R_d^2}, \quad (6.7)$$

де  $h$ ,  $l$  – товщина та довжина прокату відповідно, мм;  $R_d$  – радіус барабану пічної моталки, м;

Визначаємо сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_{conv} + \alpha_{rad}, \quad (6.8)$$

де  $\alpha_{conv}$  – коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію;  $\alpha_{rad}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

Коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію визначаємо по формулі [218]:

$$\alpha_{conv} = 5,7 + (3,13 v_{rol} \times \rho_g), \quad (6.9)$$

де  $\rho_g$  – щільність димових газів, кг/м<sup>3</sup> (для природного газу 0,7 кг/м<sup>3</sup>).

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначаємо по формулі [203]:

$$\alpha_{rad} = 5,7 \times 0,8 \times \frac{\left(\frac{t_{fur} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{met} + 273}{100}\right)^4}{t_{fur} - t_{met}}. \quad (6.10)$$

Теплоємність розраховуємо на підставі наступного рівняння:

$$c_p = 1000 \times \left[ (-1 \times 10^{-7}) \times t_{met}^2 + 0,0004 t_{met} + 0,4281 \right]. \quad (6.11)$$

Рівняння (6.11) отримано шляхом обробки та усереднення даних по середній теплоємності вуглецевих та низьколегованих сталей при різноманітних температурах (табл. 6.5) [218].

Результати обробки даних (див. табл. 6.5), наведені на рис. 6.5.

З метою спрощення розрахунків дані по вуглецевим та низьколегованим маркам сталі (див. рис. 6.5) були усереднені, що не знизило точність ( $R_2 = 0,9185$ ), а також дало змогу застосовувати отримане рівняння для обох типів марок сталі.

Таким чином, рівняння, яке було отримане (6.11), може бути застосовано з достатньою точністю як для розрахунків вуглецевих так і для низьколегованих сталей в діапазоні температур від 100 °C до 1200 °C.

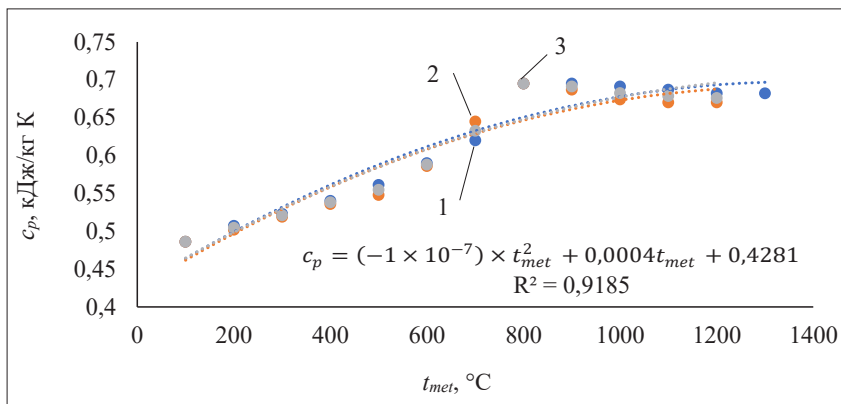
Перевірка отриманих залежностей (6.1) та (6.5) [61] була виконана на аналітичній моделі, адаптованій до умов стану Стеккеля, заводу *Ferriera Valsider*.

Відхилення розрахованих температур прокату від фактичних, отриманих при виробництві гарячекатаних рулонів розмірами 6 × 1500 мм з мікролегованої сталі типу B638 (аналог X60 по API 5L) партії CL16/11369A, CL16/20707A склало від 0,09% до -2,1%, табл. 6.6.

**Таблиця 6.5** – Середня теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей при різноманітних температурах

Тип сталі	Параметр	Величина параметра												
	$t_{мет}$ , °C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Вуглецеві	$c_p$ , кДж/кг К	0,486	0,507	0,523	0,54	0,561	0,59	0,62	0,695	0,695	0,691	0,687	0,682	0,682
Низьколеговані	$c_p$ , кДж/кг К	0,486	0,502	0,519	0,536	0,548	0,586	0,645	0,695	0,687	0,674	0,67	0,67	

Середнє відхилення при розрахунку температурного режиму прокатки без врахування розроблених залежностей склало 20,1% та 25,9% для партії CL16/11369A, CL16/20707A відповідно.



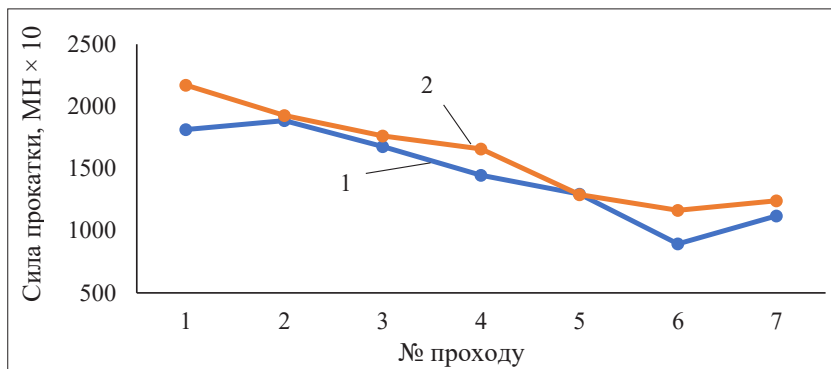
**Рисунок 6.5** – Залежність теплоємності вуглецевих (1), низьколегованих (2) сталей, а також середніх значень їх теплоємності (3) від температури

**Таблиця 6.6** – Результати розрахунку температурного режиму прокатки за розробленими залежностями

№ партії	Кількість проходів у кліті	$t_{met}$ початок прокатки, °C (факт)	$t_{met}$ кінець прокатки, °C (факт)	$t_{met}$ кінець прокатки, °C, розрахунок з (6.1)–(6.3), (6.5)	$t_{met}$ кінець прокатки, °C, не відокремлено (6.5)	$\Delta t$ , %	Середнє відхилення без врахування (6.1)–(6.3), (6.5)	Середнє відхилення, не відокремлено (6.5)
11369A	7	980	875	876	980	0,09	20,1	10,76
20707A	5	1030	920	901	1014	-2,1	25,9	9,15

Середнє відхилення без врахування залежностей (6.1)–(6.3), (6.5) розраховано за всю кількість проходів, так як є більш показовим і відображає середню похибку, а не накопичену.

Також, за допомогою адаптованої моделі виконано розрахунок сили прокатки при виробництві рулонів розмірами  $6 \times 1500$  мм, партія CL16/11369A. Результати розрахунку наведені на рис. 6.6.



**Рисунок 6.6** – Змінення розрахованої (1) та фактичної (2) сили прокатки по проходам на стані Стеккеля при виробництві рулонів розмірами  $6 \times 1500$  мм

Середнє відхилення розрахованої сили прокатки від фактичної по результатах моделювання склало 9,8%. Основні відхилення отримані в першому проході та в шостому проході при низьких значеннях навантаження. Дані відхилення потребують додаткового вивчення.

Таким чином у даному дослідженні виконане уточнення розрахунку температурних втрат металу на станах Стеккеля за рахунок наступного:

- враховано особливості розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на станах Стеккеля;

- розроблена залежність (6.5) для визначення змін температури розкату при змотуванні на пічній моталці стану Стеккеля, яка враховує вплив температури пічного простору, температуру металу перед змотуванням, сумарний коефіцієнт тепловіддачі, теплоємність сталі, товщину прокату, тривалість намотування останнього витка.

Похибка розрахунку температури металу з урахуванням запропонованих залежностей перевірена на фактичних даних, отриманих на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider та склала від  $-2,1\%$  до  $0,09\%$ .

Отримані залежності перевірені при розрахунку сили прокатки на адаптованій аналітичній моделі для стану Стеккеля, яка включає уточнення розрахунку температурних втрат металу, середня похибка склала 9,8 %.

### **6.1.2.2 Перевірка аналітичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider**

Актуальність розробки та перевірки аналітичної моделі для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider обумовлена потребою в засвоєнні нових технологій з метою розширення сортаменту та задоволення потреб європейського ринку.

Метою дослідження є перевірка вдосконаленої аналітичної моделі технологічного процесу прокатки гарячекатаних рулонів для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider для подальшої розробки технологічних рекомендацій.

Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування заводу Ferriera Valsider наведені в розділі 1.3.3.

Для перевірки аналітичної моделі використані фактичні дані по прокатці рулонів, сортамент яких наведений в табл. 6.7. Хімічний склад слябів, використаних для перевірки моделі, наведений у табл. 6.8.

**Таблиця 6.7** – Сортамент слябів та рулонів для перевірки аналітичної моделі

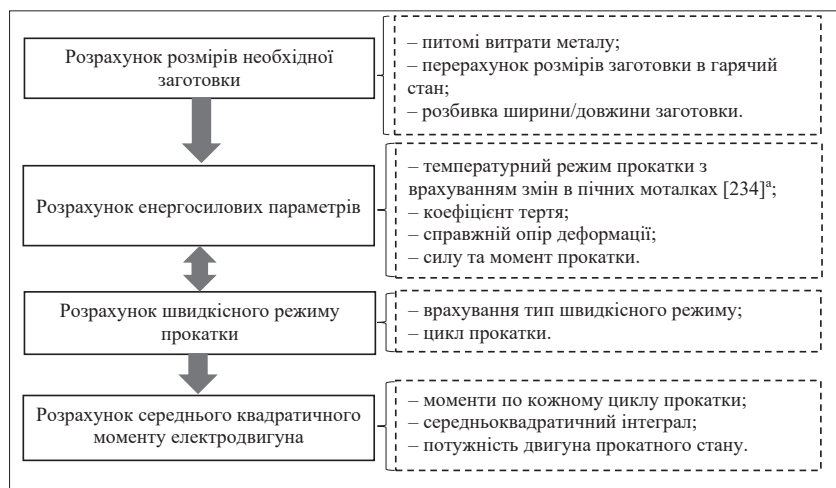
Шифр плавки	№ сляба	Марка сталі	Переріз слябу, мм	Переріз рулону, мм
81518	A1/02005400	S355JR+AR	220×1520×9800	15×1500
83270	A1/02008812	S355J2+N		12×1500
83749	A1/02008905	S355J2+N		10×1500

При моделюванні, розрахунок істинного опору металу пластичній деформації виконувався з використанням фактичного хімічного складу слябів по методиці Л. В. Андреюка та Г. Г. Тюленева [129].

**Таблиця 6.8** – Хімічний склад сталі, з якої вироблявся прокат для перевірки моделі

Шифр плавки	Масова доля елементів, %														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	Mo	V	N	As
81518	0,14	0,023	1,40	0,014	0,003	0,05	0,18	0,02	0,035	0,005	0,034	0,01	0,005	0,007	0,005
83270	0,14	0,015	1,34	0,017	0,004	0,04	0,02	0,02	0,033	0,005	0,034	0,01	0,005	0,005	0,005
83749	0,13	0,009	1,37	0,014	0,004	0,05	0,03	0,03	0,037	0,005	0,030	0,01	0,005	0,006	0,005

Аналітична модель, що вдосконалена, має наступну структуру:



<sup>a</sup> Вдосконалення температурного режиму прокатки на стані Стеккеля детально описано в розділі 6.1.2.1.

Слід зазначити, що для використання фактичних даних по режимах прокатки, зазор між робочими валками треба перерахувати у товщину прокату з врахуванням «жорсткості» кліті.

Розрахунок «жорсткості» кліті дуо, стану 3170 виконано на підставі даних по валковому зазору, фактичній довжині прокату та силі прокатки у цьому проході:

$$S_r = F / (H_f - H_G), \quad (6.12)$$

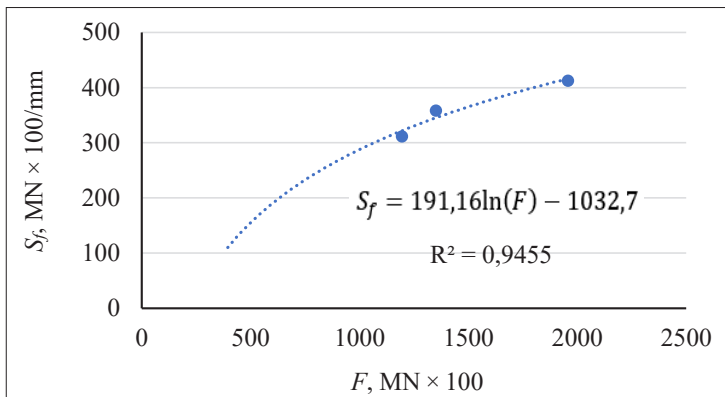
де  $F$  – сила прокатки,  $\text{MN} \times 10^{-2}$ ;  $H_f$  – фактична товщина прокату, розрахована на підставі вимірювань фактичної ширини та довжини прокату в останньому проході та маси розкату, мм;  $H_G$  – валковий зазор у останньому проході, мм.

Таким чином, розрахована «жорсткість» кліті стану 3170 становить  $180 \text{ MN} \times 10^{-2}/\text{мм}$ . Дані з яких виконаний розрахунок та результати розрахунку, наведені в табл. 6.9.

**Таблиця 6.9** – Вихідні дані та результати розрахунку «жорсткості» кліті дуо, стану 3170

Параметр	Одиниця виміру	Значення
$F$	$\text{MN} \times 10^{-2}$	1397
$H_G$	мм	29,4
Ширина прокату	мм	1494
Довжина прокату	мм	56 280
Маса розкату	т	24,48
$S_r$	$\text{MN} \times 10^{-2}/\text{мм}$	180

Результати обробки даних по «жорсткості» кліті в залежності від сили прокатки наведені на рис. 6.7.



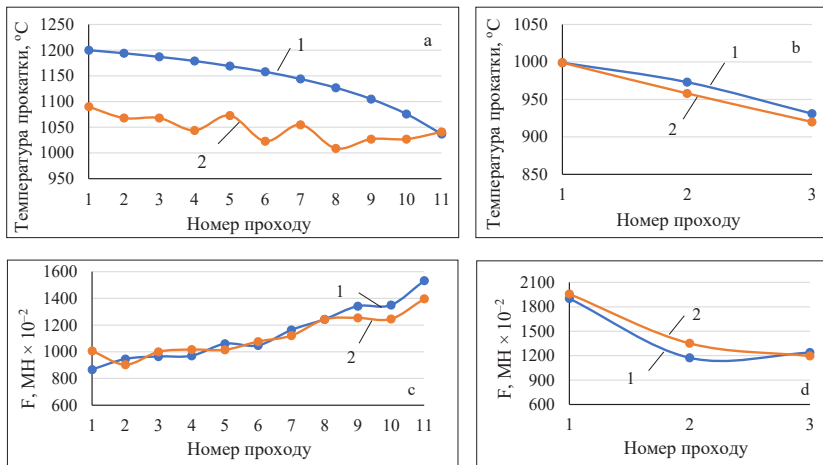
**Рисунок 6.7** – Залежність «жорсткості» кліті кварто 1780 стану Стекеля від сили прокатки по проходах

На підставі результатів обробки даних (див. рис. 6.7), для розрахунку «жорсткості» в кліті кварто 1780 стану Стеккеля, в залежності від сили прокатки, отримано наступну формулу:

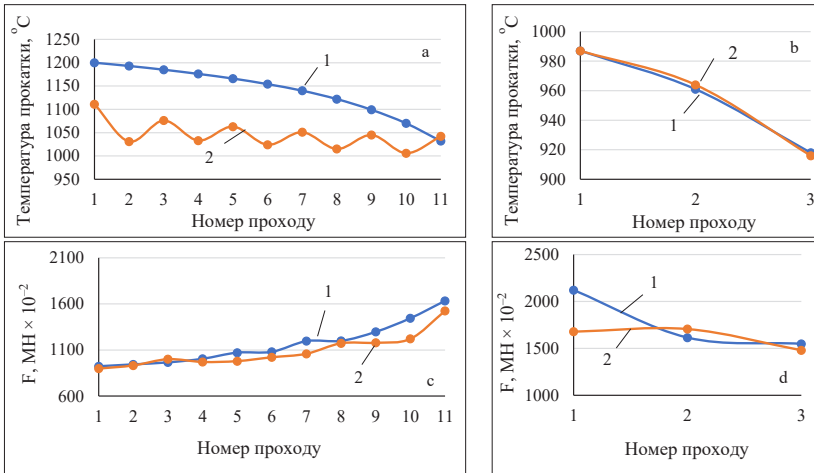
$$S_f = 191,16 \ln(F) - 1032,7. \quad (6.13)$$

З врахуванням «жорсткості» обох клітей виконані розрахунки технологічних параметрів прокату рулонів, сортамент яких наведений, див. табл. 6.7. Оцінювання похибки розрахунків виконувалось на таких параметрах як температура та сила прокатки, динаміка яких по проходах наведена на рис. 6.8–6.10.

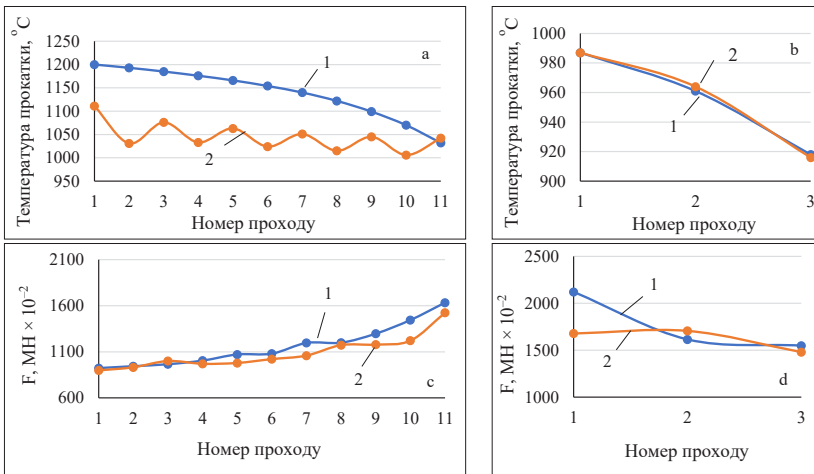
В результаті розрахунку сили прокатки та температури по проходах виконана оцінка похибок між фактичними та розрахованими даними, результати наведені в табл. 6.10.



**Рисунок 6.8** – Змінення розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві рулонів номінальними розмірами 15 × 1500 мм



**Рисунок 6.9** – Зміннення розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві рулонів номінальними розмірами 12 × 1500 мм



**Рисунок 6.10** – Зміннення розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві рулонів номінальними розмірами 10 × 1500 мм

**Таблиця 6.10** – Похибки між фактичними та розрахованими даними на дослідженому сортаменті

Кліть	Параметр	Похибка розрахунків, %			
		шифр плавки	81518	83270	83749
		Переріз рулону, мм	15 × 1500	12 × 1500	10 × 1500
3170	Температура	середня	-9,11	-9,06	-8,27
		мін.	-13,2	-15,71	-14,7
		макс.	0,38	0,96	-0,39
	Сила прокатки	середня	0,8	5,7	0,5
		мін.	-16,0	-3,6	-13,6
		макс.	8,8	15,5	9,5
1780 Стекеля	Температура	середня	-0,92	0,03	0,003
		мін.	0	0,22	-0,205
		макс.	1,57	0,31	0,22
	Сила прокатки	середня	-4,89	6,59	-2,73
		мін.	-15,1	-5,6	-12,94
		макс.	3,37	20,9	12,89

На підставі отриманих результатів розрахунків параметрів прокатки та похибок слід зазначити наступне [60, 66]:

– на стані 3170 суттєве відхилення фактичної температури від розрахованої пов’язане з похибками фактичних замірів на які могли вплинути залишки води на поверхні розкатів після гідрозбиву, або з охолодження прокатних валків. При цьому розрахована та фактична температури наприкінці прокатки в кліті 3170 мають найменші похибки які становлять 0,38 %, 0,96 % та -0,39 % для рулонів товщиною 15 мм, 12 мм та 10 мм відповідно. Розрахована сила прокатки в кліті 3170 має схожу динаміку з фактичними даними, що також підтверджує правильність виконаного розрахунку температур;

– на стані 1780 похибка розрахунків температур становить від 0 % до 1,57 %, що є достатньо задовільним результатом з урахуванням впливу устаткування, яке використовується, зокрема пічних моталок. Похибка, отримана при розрахунку сили прокатки у першому проході для рулонів товщиною 12 мм та 10 мм пов’язана з фактично більшою температурою металу перед станом ніж та,

що виміряна після гідрозбиву, що можна побачити при порівнянні з температурами на виході з прохідної печі, табл. 6.11.

**Таблиця 6.11** – Порівняння фактичних температур розкату після прохідної печі та температур перед станом Стеккеля

Шифр плавки	Переріз рулону, мм	Температура тіла рулону, °С	
		після прохідної печі	перед станом Стеккеля
81518	15 × 1500	997	999
83270	12 × 1500	1001	987
83749	10 × 1500	1048	1005

Вдосконалена аналітична модель технологічного процесу прокатки може використовуватись за для проектування технології на станах Стеккеля.

Отримані похибки розрахунків, внаслідок впливу на фактичні показники технологічних факторів, не знижують цінності розробленої моделі і можуть бути зменшені шляхом підвищення точності вимірів (температури) шляхом корегування місць їх контролю.

Таким чином, по результатах дослідження виконано перевірку вдосконаленої аналітичної моделі на фактичних даних, отриманих на стані 3170 та стані Стеккеля 1780 заводу Ferriera Valsider. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки на стані 3170 склала від  $-8,27\%$  до  $-9,11\%$ , на стані 1780 від  $0,003\%$  до  $-0,92\%$ . Середня похибка при моделюванні сили прокатки на стані 3170 склала від  $0,5\%$  до  $5,7\%$ , на стані 1780 від  $-4,89\%$  до  $6,59\%$ .

Встановлено вплив на вимір температури попередньої обробки розкату гідрозбивом окалини, що призводить до значних похибок при подальшому порівнянні з результатами розрахунків.

Розроблена модель може бути використана для проектування технологічних режимів прокатки на станах Стеккеля з різноманітним розташуванням устаткування.

### **6.1.2.3 Освоєння технології виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу *Ferriera Valsider***

Найбільш поширеним способом виготовлення плоского прокату для труб великого діаметру є прокатка на товстолистових реверсивних станах, а також на станах безперервної прокатки. Особливе місце займає виробництво трубного сортаменту на станах Стеккеля. Цей спосіб є менш поширеним, але вдало застосовується світовими виробниками. Слід зазначити, що аналога реалізації виробництва трубного сортаменту великого діаметру на станах Стеккеля на території колишнього Радянського Союзу немає. При цьому в Канаді, Америці, Південній Кореї, Китаї такий спосіб виробництва є поширеним [40].

Отримання необхідних властивостей прокату у всіх випадках досягається переважно методом термомеханічного процесу з використанням або без використання прискореного охолодження.

Застосування для виготовлення труб великого діаметру листового прокату або рулонного, а отже і виготовлення їх в прямошовному виконанні або спіральшовному багато в чому залежить від політичних, а також від історично сформованих технічних та технологічних аспектів конкретного регіону, країни. У той час як при реалізації великих проектів у східно-європейських та азійських країнах переважають трубопроводи у прямошовному виконанні, в низці Європейських держав, а також Канаді, Америці широко застосовуються спіральшовні труби [40].

Безсумнівно, переваги і недоліки мають обидва варіанти виготовлення, починаючи від листового прокату і труби та закінчуючи безпосередньо трубопроводом.

Розробка технологічних рекомендацій з виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу *Ferriera Valsider* категорії міцності X65 є актуальним завданням, що дозволить оцінити технічні можливості діючого устаткування та встановити можливість виробництва рулонів, що відповідають сучасним світовим вимогам та задовільнять потреби європейських виробників електрозварних труб.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва рулонного прокату трубного сортаменту категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider з урахуванням технічних особливостей наявного нагрівального та прокатного устаткування.

Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування заводу Ferriera Valsider наведені в розділі 1.3.3.

Наразі, основним сортаментом стану є товстолистовий та рулонний прокат конструкційного призначення, у тому числі стійкого до атмосферної корозії, прокат для суднобудування та вироблення деталей для машинобудування.

Сортамент, що виробляється, обумовлює існуючий технологічний регламент роботи всього основного устаткування, тобто високі температури нагрівання слябів під прокатку порядку 1230 °С, високу температуру печі при проміжному підігріванні підкату від 1100 °С до 1250 °С, високі температури пічних моталок порядку 1070 °С. Слід зазначити, що при вказаних температурах є суттєвий резерв енергосилових параметрів. Фактична сила прокатки в чорновій і чистовій клітях знаходиться у межах 12–14 МН, при відносній ступені деформації за прохід від 15 % до 50 % відповідно до сортаменту, що дає змогу до подальшого розвитку технології та розширенню сортаменту.

Оцінка можливостей заводу з освоєння технології виробництва рулонів трубного сортаменту базувалася на аналізі технічних характеристик існуючого устаткування.

В результаті аналізу та виконання попередніх розрахунків гранично допустимих технологічних навантажень на основне устаткування клітей, за допомогою комплексу аналітичного моделювання (детально описано в розділі 6.1.2.1 та 6.1.2.2), відзначена недостатня потужність двигунів головного приводу стану 3170 та стану 1780 Стеккеля при досить високих силових характеристиках обох клітей, що не дозволяє експлуатувати їх на повну потужність. Виходячи з розрахунку отримані наступні результати, табл. 6.12.

**Таблиця 6.12** – Порівняння існуючої потужності двигунів і розрахованої

Кліть / тип	Кількість двигунів головного приводу, шт.	Максимальна сила прокатки, МН	Фактична потужність двигуна, кВт	Розрахована, необхідна потужність двигуна, кВт
3170/дуо	2	25	2×2240	2×4430
1780/кварто	2	24	2×4480	2×5770

Таким чином, підвищення ефективності експлуатації клітей на заводі *Ferriera Valsider* шляхом підвищення продуктивності, зниження питомих енерговитрат, підвищення якості виробленої продукції можливе шляхом встановлення нових, більш потужних двигунів головного приводу.

Недостатня потужність двигунів вносить певні труднощі в розробку і реалізацію технології термомеханічної прокатки на існуючому устаткуванні.

Розробка технології виробництва рулонів трубного сортаменту можлива в двох наступних варіантах.

Реалізація на стані технології ТМСР без прискореного охолодження з необхідністю завершення деформації в феритній області, що призведе до значної (до 30 %) втрати продуктивності за рахунок вимушеного збільшення кількості проходів. Крім цього, при виконанні чистої прокатки досить складним буде планування і реалізація роботи пічних моталок як в частині силових характеристик при змотуванні, так і безпосереднього підтримання необхідного температурного режиму прокатки, який буде змінюватися в широкому діапазоні.

Застосування технології ТМСР з прискореним охолодженням є більш прийнятним варіантом.

Безумовною перевагою цієї технології є більш високі споживчі властивості одержуваної продукції, що неодноразово підкреслювалося багатьма дослідженнями. Менші витрати на виробництво, в тому числі за рахунок зниження рівня мікролегуючих елементів, які додаються в сталь, зниження енерговитрат на нагрівання та прокатку. Крім цього і, що особливо важливо для цього стану *Стеккеля*,

це зниження навантажень на двигуни головного приводу і пічних моталок за рахунок проведення деформації в більш високій температурній області.

Розробка технології контрольованої прокатки з прискореним охолодженням виконувалася із застосуванням результатів попередніх досліджень, відомих наукових і практичних підходів, а також за допомогою спеціально розробленого комплексу аналітичного моделювання. У якості заготовки для виробництва рулонів розмірами 12 × 1510 мм, категорії міцності Х65, шляхом внутрішньої координації між підприємствами компанії МЕТИНВЕСТ, було розглянуто використання слябів «МК «АЗОВСТАЛЬ» поточного виробництва, перерізом 220 × 1510 мм. Хімічний склад дослідних слябів наведено в табл. 6.13.

**Таблиця 6.13** – Хімічний склад дослідної сталі категорії міцності Х65

№ плавки	Переріз слябів, мм	Хімічний склад, %														
		C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N	B
1002129	220 × 1510	0,09	1,40	0,23	0,002	0,011	0,036	0,030	0,066	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,0070	0,0005

Згідно із запропонованими технологією, нагрівання слябів виконується в шестизонній методичній печі. Температура нагрівання слябів для прокатування повинна становити 1170 ± 10 °С. Визначення необхідної температури аустенізації здійснювалося на підставі даних по температурах розчинності частинок NbC та Nb(C, N) в структурі безперервнолитого слябу.

Нагріті сляби надходять до чорнової кліті дуо стану 3170, попередньо проходячи камеру гідрозбиву для видалення пічної окалини з поверхні. Температура слябів після гідрозбиву повинна становити 1130 ± 10 °С.

Прокатку в чорновій кліті необхідно здійснювати по поздовжній схемі в дві стадії [235]. Перша стадія прокатки здійснюється у верхній частині аустенітної області в діапазоні температур від 1130 °С до 1020 °С, де протікає інтенсивна рекристалізація деформованого

аустеніту, зі ступенем деформації більшим ніж 10% за прохід, за винятком перших двох-трьох проходів, ступінь деформації в яких обмежений максимальним кутом захоплення, потужністю та обертаючим моментом двигуна.

Після виконання першої стадії підкат охолоджується шляхом поступального переміщення на рольгангу до температури 920 °С. Відсутність деформації в даній температурній області дозволяє зберегти частину ніобію в розчиненому вигляді для подальшого дисперсійного зміцнення металу, так як на даному етапі некогерентні частки Nb (С, N), а також Ti (С, N), що виділяються, не вносять істотних змін в зміцнення стали.

Останні 2–4 пропуски виконуються в області гальмування рекристалізації в інтервалі температур 920–880 °С, при ступені деформації  $\geq 10\%$ .

Виконання чорнової прокатки в дві стадії сприяє формуванню більш дрібного аустенітного зерна, а отже більш дисперсної та однорідної успадкованої феритної структури в готовому прокаті. Товщина підкату повинна бути не менше ніж трьох кратної від кінцевої товщини.

Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки по проходах в кліті 3170 наведено в табл. 6.14 [236].

Після прокатки в чорновій кліті підкат товщиною 40 мм охолоджується на рольгангу до температури 830–820 °С.

Далі підкат надходить до прохідної роликівної печі де відбувається вирівнювання температури по перерізу та довжині, а також підігрів бічних кромок.

Температура металу після вирівнювання в роликівній печі повинна становити  $835 \pm 5$  °С.

Остаточна прокатка здійснюється в кліті кварто стану Стеккеля.

Прокатка в кліті Стеккеля повинна починатися при температурі 825–835 °С, тобто нижче температури повного гальмування рекристалізації аустеніту, і закінчуватися при температурі не менш ніж 810 °С. Ступінь деформації по всіх проходах повинен бути не меншим ніж 10%.

**Таблиця 6.14** – Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки в чорновій кліті 3170

№ проходу	Товщина перед проходом, мм	Товщина після проходу, мм	Ступінь деформації, %	Температура перед проходом, °С	Сила прокатки, МН
1	222	202	9,0	1130	14,07
2	202	183	9,4	1122	14,22
3	183	165	9,8	1117	14,25
4	165	148	10,3	1113	14,24
5	148	132	10,8	1107	14,28
6	132	117	11,4	1102	14,28
7	117	103	12,0	1094	14,38
8	103	90	12,6	1087	14,43
9	90	78	13,3	1076	14,61
10	78	67,5	13,5	1066	14,26
11	67,5	58	14,1	1051	14,46
12	58	49,5	14,7	1037	14,54
Охолодження на рольгангу					
13	49,5	44,5	10,1	917	14,42
14	44,5	40	10,1	902	14,40

В ході реалізації описаних температурно-деформаційних параметрів при чистовій прокатці відбувається витягування аустенітних зерен, межі яких закріплені за допомогою фаз Nb (C, N), що виділяються в процесі прокатки та дозволяють істотно подрібнити усадкаване зерно фериту.

Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки по пропусках в кліті 1780 наведений в табл. 6.15.

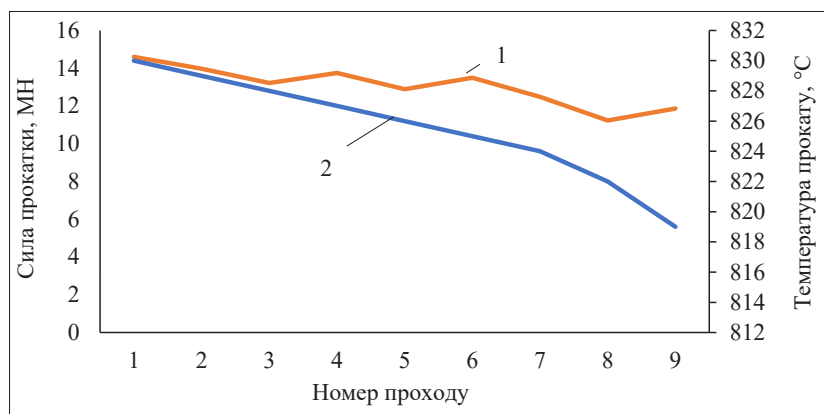
Режим деформації розрахований таким чином щоб останній пропуск виконувався по ходу процесу прокатки. Змінення температури та сили прокатки по проходах в кліті Стеккеля наведені на рис. 6.11.

З метою виконання умов термомеханічного процесу прокатки необхідне утримання температури металу по проходах в кліті Стеккеля. При моделюванні технології утримання температури на потрібному

рівні, який є низьким відносно діючої технології, здійснено шляхом регулювання кількості пальників в пічних моталках [237].

**Таблиця 6.15** – Рекомендований режим прокатки в кліті 1780 стану Стеккеля

№ проходу	Товщина перед проходом, мм	Товщина після проходу, мм	Ступінь деформації, %	Температура перед проходом, °С	Сила прокатки, МН
1	40	35,5	11,25	830	14,60
2	35,5	31,5	11,27	829	13,97
3	31,5	28	11,11	828	13,22
4	28	24,5	12,50	827	13,75
5	24,5	21,5	12,24	826	12,89
6	21,5	18,5	13,95	825	13,50
7	18,5	16	13,51	824	12,49
8	16	14	12,50	822	11,23
9	14	12	14,29	819	11,87



**Рисунок 6.11** – Динаміка змін сили прокатки (1) та температури (2) по проходах у кліті Стеккеля

Після прокатки штаба без затримок передається на установку ламінарного охолодження. Послідовність проходження технологічних агрегатів перед ламінарним охолодженням повинна бути наступною:

**Пічна моталка перед станом** → **Стан Стеккеля** → **Установка ламінарного охолодження**

З огляду на малу відстань розкочувальних полів робота всього технологічного устаткування повинна бути синхронізованою.

Охолодження рулонів на установці прискореного охолодження повинно виконуватись зі швидкістю 12–14 °C/с до температури 560–580 °C.

Прискорене охолодження з нижнього діапазону аустенітної області дозволить сформувати остаточну дисперсну ферито-бейнітну структуру в готовому прокаті. Виділення на даній стадії частинок Nb (С, N) з твердого розчину дозволить значно підвищити міцність металу.

Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі категорії міцності Х65 на стані Стеккеля виглядає наступним чином, рис. 6.12.



**Рисунок 6.12** – Схема термомеханічного процесу прокатки сталі категорії міцності Х65 на стані Стеккеля

Після прискороного охолодження штаба змотується в рулон на фінішній моталці.

З метою зменшення товщини шару повітряної окалини, змотані рулони необхідно піддати додатковому контрольованому повітряному охолодженню до температури 400 °С, за допомогою промислових аераторів [238, 239]. Остаточне сповільнене охолодження рулонів виконується на складі протягом 48 годин.

Таким чином, шляхом внутрішньої координації між підприємствами компанії МЕТИНВЕСТ, для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider, виконано оцінку технічних можливостей та розроблено комплексну технологію для виробництва рулонів категорії міцності X65 для подальшого вироблення електрозварних труб великого діаметру нафто-газового призначення. В якості заготовки передбачено використання безперервнолитих слябів «МК «АЗОВСТАЛЬ»».

Таким чином, для заводу Ferriera Valsider виконано розрахунок та встановлена необхідна потужності головних двигунів прокатних станів 3170 та 1780, що дозволить підвищити продуктивність, знизити питомі енерговитрати та підвищити якість продукції, що виробляється.

З метою покращення якості поверхні рулонів, для стану Стеккеля, запропоновано застосування технології контрольованого повітряного охолодження рулонів після змотування.

## **6.2 Освоєння виробництва нового сортаменту на підприємствах України**

### **6.2.1 Освоєння виробництва конструкційного прокату способом термомеханічної прокатки**

#### **6.2.1.1 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S355MC товщиною 6 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

Слід зазначити, що вітчизняні стани для виробництва гарячекатаних рулонів були сконструйовані набагато раніше ніж отримала поширення технологія термомеханічної прокатки. Тому ця технологія та продукція не є проектними та потребують поетапного впровадження.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S355MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами до  $6 \times 1500$  мм в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», без модернізації устаткування.

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом  $6 \times 1500$  мм із сталі марки S355MC для умов стану 1700, без здійснення модернізації на даному етапі є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів з найпоширенішої марки стали та забезпечить потреби ключових клієнтів підприємства.

Детальний сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведені в розділі 1.3.2.1.

Згідно з проектом та діючою технологією прокатний стан виробляє гарячекатані рулони вагою до 9 т, товщиною від 1,5 до 9 мм, шириною від 1000 мм до 1530 мм, в залежності від сортаменту, з марок сталі від 08пс (згідно з ГОСТ 1050) до 09Г2С (згідно з ГОСТ 19281), S355 усіх категорій згідно з EN 10025-2 та інший аналогічний сортамент, обмежений тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа.

Основною відмінністю при виробництві сортаменту за технологією ТМСП є низький рівень хімічних елементів, які забезпечують властивості міцності прокату, порівняння наведене в табл. 6.16, а також в розділі 1.2.1.

**Таблиця 6.16** – Порівняння показників продукції, яка виробляється по різноманітних технологічних режимах

Вимоги	Технологія <sup>a</sup>	Марка сталі	Показники / хімічний склад						
			C, %	Mn, %	Nb, %	V, %	Ti, %	Ce	KV <sub>-20</sub> , Дж
EN 10025-2	AR; N <sup>2</sup>	S355J2	≤0,20	≤1,60	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	≤0,45	≥27
EN 10025-4	ТМСП	S355ML	≤0,14	≤1,60	≤0,05	≤0,10	≤0,05	≤0,39	≥47
EN 10149-2	ТМСП	S355MC	≤0,12	≤1,50	≤0,09	≤0,20	≤0,15	-	-

<sup>a</sup> AR – гарячекатаний стан; N – стан після нормалізувальної прокатки; ТМСП – стан після термомеханічної контрольованої прокатки;

<sup>1</sup> – дозволяється використання елементів;

<sup>2</sup> – переважний стан прокату по даному стандарту.

Суттєвою відмінністю вимог до прокату, який виробляється термомеханічним способом, є нижчий рівень вмісту хімічних елементів в порівнянні з іншими способами, а також додаванням мікролегуючих елементів, як зазначалося раніше, розділ 1.2.1. Такі змінення разом забезпечують відмінний комплекс механічних властивостей.

Для виробництва дослідницької партії гарячекатаних рулонів із сталі марки S355MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами 6 × 1500 мм було виплавлено плавку з наступним хімічним складом, табл. 6.17.

**Таблиця 6.17** – Хімічний склад дослідної плавки марки S355MC

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %											
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Al	Ti	Nb
255634-2	0,11	1,36	0,03	0,007	0,019	0,04	0,01	0,01	0,004	0,037	0,022	0,030

У якості елементів хімічного складу, які дозволяють здійснювати контроль розмірів зерна при аустенізації та прокатці, а також змінення властивостей за рахунок карбонітридного зміцнення, використано Nb та Ti.

На підставі хімічного складу (див. табл. 6.17) розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [3, 28, 43], дотримання яких, надалі, забезпечить необхідний комплекс механічних властивостей, згідно з EN 10149-2, табл. 6.18.

З метою отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.19 [45, 46].

**Таблиця 6.18** – Цільові термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра
Температура нагрівання слябів	°С	1260+/-20
Час нагрівання	Годин-хвилин	≤2-00
Температура прокатки після кліті 4а	°С	≥1040
Температура прокатки після кліті 10	°С	810–860
Температура змотування рулонів	°С	580–630
Кількість секцій які використовуються для прискореного охолодження	шт.	8–14
Швидкість охолодження	°С/с	40–50

**Таблиця 6.19** – Цільовий температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі S355MC розмірами 6 × 1500 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
1	2	3	4	5	6	7
0 <sup>b</sup>	140					
01	120	1260	707,3	800	0,85	1343,5
1	90	1237	1217,0	2500	1,26	3758,8
2	60	1213	1508,2	2500	1,36	5046,3

Продовження таблиці 6.19

1	2	3	4	5	6	7
3	42	1178	1260,1	2000	1,78	4676,5
4	32	1138	1039,2	2000	1,78	2907,3
4a	28	1074	722,3	2000	2,89	2129,9
5	22	934	1736,5	2400	1,36	3846,4
6	16	916	1772,1	2400	1,87	4714,1
7	12	898	1346,9	2000	2,67	3619,8
8	10	876	1460,3	1800	3,38	4575,2
9	8	856	1274,1	1700	4,27	4127,9
10	6	834	994,1	1500	5,70	3343,1

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

У якості напівфабрикату було використано попередньо редукований до розмірів  $140 \times 1500 \times 5395$  мм сляб перерізом  $250 \times 1550$  мм.

Згідно з розрахунком, експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені, що дозволяє застосувати цей температурно-деформаційний режим при виробництві дослідницької партії прокату.

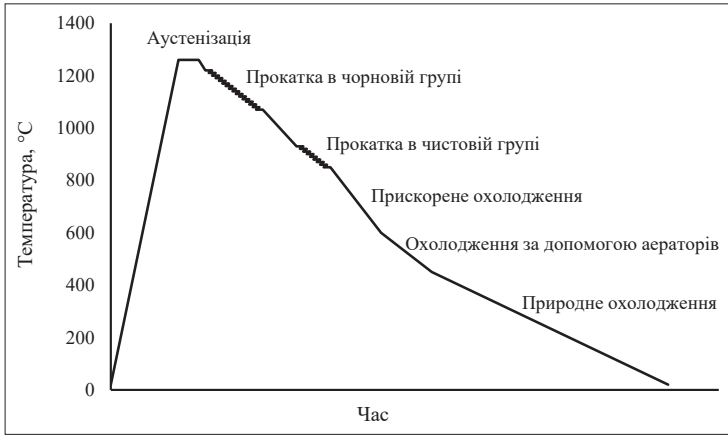
Слід зазначити, що при розрахунку необхідний рівень температури після кліті 10 був досягнений завдяки регулюванню швидкості прокатування металу в чистовій групі.

По розрахованих режимах була вироблена дослідницька партія гарячекатаних рулонів перерізом  $6 \times 1500$  мм, зі сталі марки S355MC, плавка 255634-2, згідно з вимогами EN 10149-2 та EN 10051.

Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки S355MC на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.13.

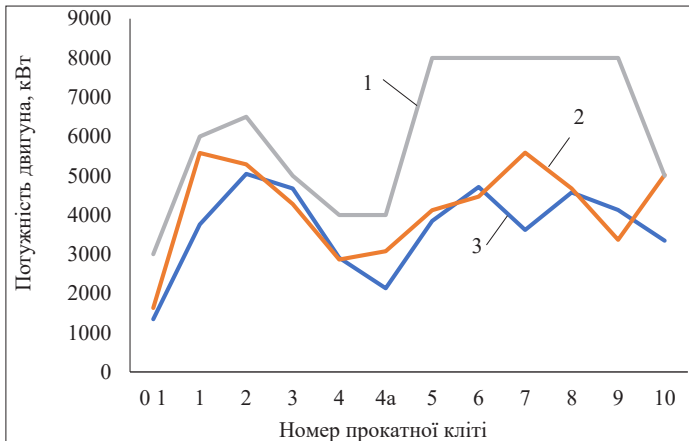
При виробництві, режим деформації був частково скорегований від розрахованого, у тому числі системою АСУТП, що призвело до зміни в розподіленні навантажень головних двигунів по клітях, рис. 6.14.

Змінення фактичного режиму деформації при прокатці від цільового, тобто розрахованого (див. рис. 6.14) не призвело до перевантажень головних двигунів по клітях.



**Рисунок 6.13** – Схема термомеханічного процесу прокатки ролонів зі сталі марки S355MC на стані 1700

Після прокатки, ролони були оброблені на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 6.20.



**Рисунок 6.14** – Потужність головних двигунів по клітях (1) допустима, (2) фактична, (3) розрахована

**Таблиця 6.20** – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°С	1260–1280
Час нагрівання	Годин-хвилин	2–12
Температура прокатки після кліті 4а	°С	1105–1117
Температура прокатки після кліті 10	°С	880–887
Температура змотування рулонів	°С	623–644
Кількість секцій для прискороного охолодження	шт.	14
Швидкість охолодження	°С/с	51

Фактично отримані термомеханічні параметри дещо перевищують цільові, що пов'язано з регулюванням параметрів в процесі прокатки, а також з опрацюванням технології. Слід зазначити, що з метою отримання необхідних механічних властивостей, підвищені значення температури кінця прокатки в кліті 10 та температури змотування було скомпенсовано використанням максимальної кількості секцій охолодження, що підвищило швидкість охолодження прокату.

Змотані на моталках рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °С, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів [238–241]. Після цієї технологічної операції, рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Технологія додаткового контрольованого повітряного охолодження прокату після термомеханічної прокатки спеціально розроблена для виробництва цієї дослідницької партії. Застосування цієї технології дозволило зменшити товщину шару повітряної окалини, який інтенсивна утворюється після закінчення прокатки та аж до температури 450 °С, при звичайному повітряному охолодженні.

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі механічних випробувань та металографічного дослідження.

Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.21.

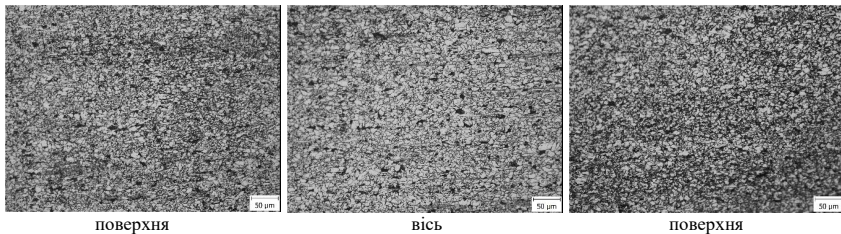
**Таблиця 6.21** – Результати механічних випробувань дослідницької партії рулонів

№ плавки	Механічні властивості			
	Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Відносне видовження, %	Вигін по оправці
255634-2	475	550	30	Без розтріскування
Вимоги EN10149-2 S355MC	≥355	430–550	23	Без розтріскування

Отримані результати механічних випробувань повністю відповідають вимогам EN10149-2 до сталі марки S355MC. Слід зазначити, що отримані результати випробувань знаходяться на верхньому рівні вимог стандарту. Таким чином, технологія виробництва може бути скорегована у напрямок зниження вмісту мікролегованих елементів, що дозволить знизити собівартість продукту. Також, отримані результати свідчать про технічну наявність подальшого освоєння технології термомеханічної прокатки сталі марки S355MC в більших товщинах, та освоєння виробництва гарячекатаних рулонів більш міцних категорій [242, 243].

Для аналізу внутрішньої якості прокатку проведені металографічні дослідження зразків від рулонів плавки 255634-2. Мікроструктура зразків наведена на рис. 6.15.

Отримана мікроструктура прокату є ферит-перлітною з зерном фериту 9, 10 номеру та смугастістю 1 балу.



**Рисунок 6.15** – Мікроструктура зразків плавки 255634-2 після травлення,  $\times 200$

Різниця у розмірі зерна фериту між віссю та поверхнею не перевищує одного номера, також метал має майже однаковий стан смугастості по перерізу.

Такий стан мікроструктури по товщині прокату та смугастості свідчать про досягнення необхідного результату при здійсненні термомеханічного процесу прокатки та достатньо ефективно, для цього сортаменту, охолодження прокату по товщині. Для встановлення можливості виробництва прокату в більших товщинах з урахуванням охолоджувальних можливостей устаткування, необхідне подальше дослідне випробування.

Таким чином, з метою забезпечення замовників компанії прокатом відповідного рівня якості розроблено технологію та вироблено партію гарячекатаних рулонів перерізом  $6 \times 1500$  мм з сталі марки S355MC у повної відповідності до вимог EN 10149-2.

Вперше для умов стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» підтверджена технічна можливість реалізації процесу термомеханічної контрольованої прокатки.

Вперше розроблена та промислово застосована технологія додаткового контрольованого повітряного охолодження рулонного прокату до температури  $450$  °C, з метою зменшення товщини шару повітряної окалини після термомеханічної прокатки, та покращення якості поверхні для споживачів.

Встановлена технічна наявність подальшого освоєння технології термомеханічної прокатки сталі марки S355MC для більших товщин, та виробництва гарячекатаних рулонів більш міцних категорій.

### ***6.2.1.2 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S460MC товщиною 2,5 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»***

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом  $2,5 \times 1000$  мм зі сталі марки S460MC для умов стану 1700 без здійснення модернізації є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів, які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби споживачів підприємства.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами  $2,5 \times 1000$  мм, в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», без модернізації устаткування.

Детальній сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведені в розділі 1.3.2.1.

Відмінністю сортаменту, який виробляється за технологією ТМСП, є низький рівень вуглецю та використання мікролегуючих елементів, завдяки яким при термомеханічній прокатці забезпечується необхідний рівень властивостей. У табл. 6.22 наведено вимоги до хімічного складу сталі марки S460MC, згідно з EN 10149-2.

Для виробництва дослідницької партії гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами  $2,5 \times 1000$  мм було розроблено хімічний склад та виготовлено сляби розмірами  $150 \times 1000 \times 6200$  мм, табл. 6.23.

**Таблиця 6.22** – Вимоги до хімічного складу сталі марки S460MC

Вимоги	Технологія	Марка сталі	Хімічний склад, %					
			C	Mn	Nb	V	Ti	Nb+V+Ti
EN 10149-2	ТМСП	S460MC	≤0,12	≤1,60	≤0,09	≤0,20	≤0,15	≤0,22

**Таблиця 6.23** – Хімічний склад дослідної плавки марки S460MC

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %											
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Al	Ti	Nb
162955-3	0,10	1,38	0,03	0,009	0,021	0,020	0,01	0,01	0,002	0,052	0,016	0,025

Вказаний рівень вмісту Nb та Ti створено для забезпечення контролю розмірів зерна при аустенізації та прокатці, а також зміння властивостей за рахунок карбонітридного зміцнення.

На підставі хімічного складу (див. табл. 6.23) розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [36, 44, 135], дотримання яких, надалі забезпечить необхідний комплекс механічних властивостей сталі марки S460MC згідно з EN 10149-2, табл. 6.24.

**Таблиця 6.24** – Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра
Температура нагрівання слябів	°С	1260–1280
Час нагрівання	Годин-хвилин	≤2–10
Температура прокатки після кліті 4а	°С	≥1040
Температура прокатки після кліті 10	°С	820–880
Температура змотування рулонів	°С	580–630
Кількість секцій які використовуються для прискореного охолодження	шт.	8–14
Швидкість охолодження	°С/с	95–105

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.25 [36].

**Таблиця 6.25** – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі S460MC розмірами 2,5 × 1000 мм на стані 1700

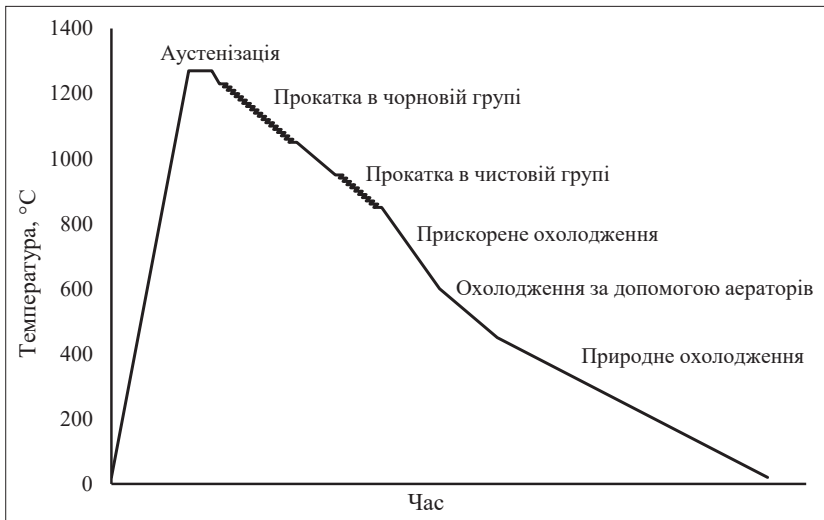
№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>а</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
	2	3	4	5	6	7
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	446,0	800	0,85	847,2
1	95	1237	845,9	2500	1,26	2817,1
2	58	1216	1070,2	2500	1,36	3967,2
3	41	1177	768,0	2000	1,78	2772,6
4	30	1124	750,1	2000	1,78	2196,4
4а	22	1048	918,5	2000	2,89	3754,2
5	15	952	1153,6	2400	2,21	3899,0
6	9,5	938	1248,6	2400	3,23	5508,6

Продовження таблиці 6.25

1	2	3	4	5	6	7
7	6	927	1210,9	2000	4,98	6519,3
8	4	917	1046,0	1800	7,30	6394,7
9	3	903	783,1	1700	9,79	4735,4
10	2,5	880	561,7	1500	11,75	3049,4

<sup>a</sup> товщина після проходу  
<sup>b</sup> початкові дані

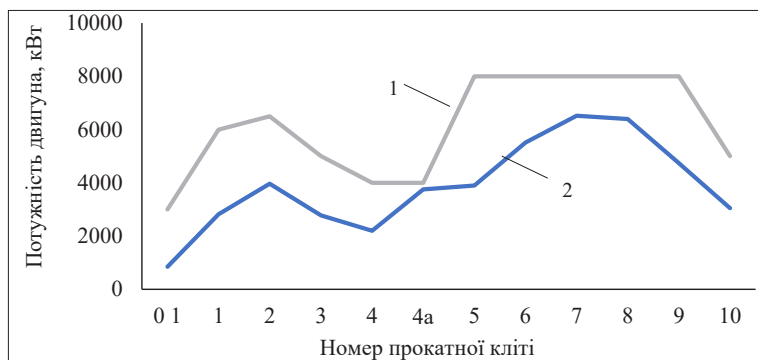
Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки S460MC на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.16.



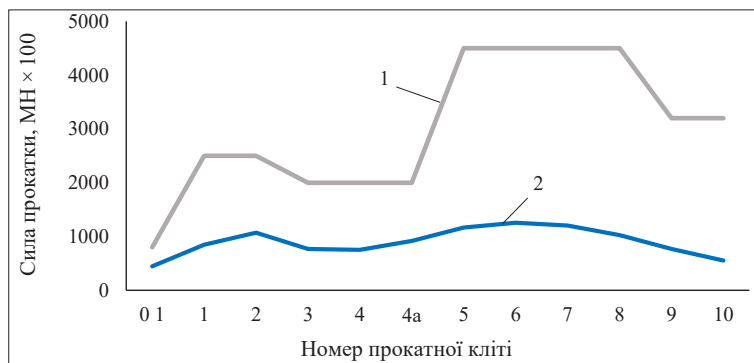
**Рисунок 6.16** – Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки S460MC на стані 1700

Згідно з виконаним розрахунком, встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені. Таким чином, дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні із застосуванням цього

температурно-деформаційного режиму. Різниця між встановленими обмеженнями та розрахованими рівнями сили прокатки та потужності головних двигунів наведені на рис. 6.17, 6.18.



**Рисунок 6.17** – Порівняння встановленої (1) та розрахованої (2) потужності двигунів по клітях



**Рисунок 6.18** – Порівняння встановленої (1) та розрахованої (2) сили прокатки по клітях

По розрахованих режимах була вироблена дослідницька партія гарячекатаних рулонів перерізом  $2,5 \times 1000$  мм з марки сталі S460MC, плавка 162955-3, згідно з вимогами EN 10149-2 та EN 10051.

При передачі з чорнової до чистової групи клітей, з метою зниження температурних втрат відносно тонкого розкату (товщина розкату 22 мм), використовувались теплозберігаючі екрани, рис. 1.13. Після прокатки рулони були оброблені на установці прискороного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 6.26.

З метою зменшення товщини шару повітряної окалини змотані на моталках рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °С, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів. Після цієї технологічної операції рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

**Таблиця 6.26** – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра
Температура нагрівання слябів	°С	1260
Час нагрівання	Годин-хвилин	2–35
Температура прокатки після кліті 4а	°С	1052–1078
Температура прокатки після кліті 10	°С	872–875
Температура змотування рулонів	°С	600–605
Кількість секцій для прискороного охолодження	шт.	13
Швидкість охолодження	°С/с	114

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі комплексу механічних випробувань.

Проби, для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії, було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.27.

Отримані результати механічних випробувань повністю відповідають вимогам EN10149-2 до сталі марки S460MC. При цьому, отримані результати випробувань знаходяться ближче до нижнього рівню вимог стандарту EN10149-2. Для забезпечення стабільних результатів механічних властивостей прокатку необхідно продовжити відпрацювання технології.

**Таблиця 6.27** – Результати механічних випробувань дослідницької партії рулонів

№ плавки	№ рулону	Механічні властивості			
		Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Відносне видовження, %	Вигін по оправці
162955-3	1	465	540	25	Без розтріскування
	2	495	550	28	Без розтріскування
	3	495	550	28	Без розтріскування
Вимоги EN10149-2 до S460MC		≥460	520–670	17	Без розтріскування

З урахуванням фактичних параметрів охолодження прокату (використано 13 з 14 секцій), та отриманих термомеханічних показників (температура змотування не опускалася нижче 600 °С) можна зробити висновок про наближення до верхньої межі у категорії міцності прокату, який може бути освоєний способом термомеханічної прокатки на наявному устаткуванні, при використанні аналогічного хімічного складу. Подальше освоєння виробництва більш міцного сортаменту можливо здійснювати за допомогою підвищення складу мікролегуючих елементів в сталі.

Таким чином, з метою забезпечення замовників компанії прокатом відповідного рівня якості, для умов стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки рулонів перерізом 2,5 × 1000 мм зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2.

Вперше в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» вироблена партія прокату з сталі марки S460MC, яка повністю відповідає вимогам європейського стандарту EN 10149-2.

Визначено наближення до верхньої можливої межі у категорії міцності прокату, який може бути освоєний способом термомеханічної прокатки на наявному устаткуванні стану 1700 без змінення хімічного складу.

Встановлена можливість подальшого освоєння прокату більш міцних категорій (вище за S460MC) за рахунок підвищення складу мікролегуючих елементів в сталі.

## **6.2.2 Освоєння виробництва прокату для труб способом термомеханічної прокатки**

### **6.2.2.1 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки В товщиною 4,7 мм та 5,7 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»**

Видобуток вуглеводнів та їх транспортування є великим сегментом світової економіки, який потребує надвеликих ресурсів. Значна частина витрат йде на будівництво нафто-газо транспортних систем. Зниження їх металоємності є безумовно надважливим комплексним питанням, яке охоплює цілу низку інститутів, починаючи з проектування транспортних систем та забезпечення їх зварними трубами, і закінчуючи можливістю металургійних виробників забезпечити встановлені вимоги.

Безперервне прагнення до зниження металоємності проєктів призвело до всебічного поглибленого вивчення проблем, пов'язаних з цим. Так, отримали розвиток вивчення впливу різноманітних мікролегуючих елементів в сталі (таких як Ti, Nb, V, Mo, останнім часом Cr, Ni, Cu, B) на властивості прокату та труб, вплив різноманітних технологій прокатки (починаючи з термообробки нормалізацією і надалі нормалізувальна прокатка, контрольована прокатка, термомеханічна контрольована прокатка з прискореним охолодженням), що задіяло цілу низку наукових інститутів, металургійних виробництв та підприємств по видобутку та збагаченню руд, які містять перераховані мікролегуючі елементи.

На сьогодні продукт у вигляді рулонів чи товстого листа, який використовується для виробництва електрозварних труб, є мабуть найбільш наукоємним, а здобуті технології надають розвитку для впровадження нових та вдосконалення існуючих технологій та продукції іншого призначення (як, наприклад, будівництва, машинобудування).

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом 4,7×1190 мм та 5,7×1190 мм зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб згідно стандарту API-5L для умов стану 1700, є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів, які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби вітчизняних та закордонних виробників електрозварних труб.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L, розмірами 4,7×1190 мм та 5,7×1190 мм в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Детальній сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведені в розділі 1.3.2.1.

Вимоги до хімічного складу згідно зі стандартом API-5L, здебільшого, лімітують тільки верхню межу вмісту хімічних елементів та дають широке поле діяльності виробникам у забезпеченні необхідного рівня властивостей, які поділяють на два рівні: базовий – PSL-1 та з додатковими вимогами – PSL-2, табл. 6.28.

**Таблиця 6.28** – Вимоги до хімічного складу сталі марки В згідно зі стандартом API-5L

Вимоги	Марка сталі	Хімічний склад, %										
		C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Nb+V	Nb+V+Ti	CE
API-5L PSL-1	B	<0,28 	-	<1,20 	<0,030 	<0,030 	-	-	-	<0,06 	<0,15 	-
API-5L PSL-2	BM	<0,22 	<0,45 	<1,20 	<0,025 	<0,015 	<0,05 	<0,05 	<0,04 	<0,06 	<0,15 	<0,43 
Додаткові вимоги PSL-1: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,50%; Cr ≤ 0,50%; Mo ≤ 0,15%. Додаткові вимоги PSL-2: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,30%; Cr ≤ 0,30%; Mo ≤ 0,15%. Вуглецевий еквівалент розраховується по формулі:												
$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$												

Також, згідно з вимогами PSL-1 API-5L марка В може вироблятися у будь який наступний спосіб: гаряча прокатка, прокатка з нормалізацією, термомеханічна прокатка. Згідно з вимогами PSL-2 API-5L марка ВМ може вироблятися тільки способом термомеханічної прокатки. В вимогах також є способи поставки після різноманітних способів термічної обробки, але в даній роботі ми їх не розглядаємо.

Для виробництва партії гарячекатаних рулонів зі сталі марки В, розмірами  $4,7 \times 1190$  мм та  $5,7 \times 1190$  мм було розроблено хімічний склад, табл. 6.29, та виготовлені сляби розмірами  $150 \times 1200 \times 6200$  мм. Слід зазначити, що при освоєнні даного сортаменту у якості вимог до прокату застосовувались базові вимоги API-5L, додаткові вимоги з урахуванням трубного переділу замовником не вимагалися.

**Таблиця 6.29** – Хімічний склад плавки зі сталі марки В

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %													
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Nb	Ti	Al	CE
172648-3	0,14	0,77	0,18	0,013	0,022	0,03	0,01	0,02	0,003	0,001	0,002	0,002	0,032	0,28

Оскільки до прокату з цієї сталі не пред'являється підвищених вимог, у хімічний склад спеціально не додавались мікролегуєчі елементи. Розроблений хімічний склад відповідає вимогам PSL-1 та PSL-2, та може бути застосований до марки сталі В та ВМ.

На підставі хімічного складу (див. табл. 6.29) розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [241, 244] з метою забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей готового прокату сталі марки В, табл. 6.30.

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо для двох товщин було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.31, 6.32 [245].

Слід зазначити, що цільові розраховані параметри прокатки у чорновій групі клітей є однакові, оскільки прокатка виконувалась з одного розміру слябів  $150 \times 1200 \times 6200$  мм та одного розміру підкату  $24 \times 1190$  мм для чистової групи.

**Таблиця 6.30** – Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра
Температура нагрівання слябів	°С	1260–1280
Час нагрівання	Годин – хвилини	≤2–35
Температура прокатки після кліті 4а	°С	≥1040
Температура прокатки після кліті 10	°С	840–880
Температура змотування рулонів	°С	560–620
Кількість секцій, які використовуються для прискороного охолодження	шт.	8–10
Швидкість охолодження	°С/с	85–95

Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки В на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.19.

Згідно з виконаним розрахунком встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені. Таким чином, дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні із застосуванням розрахованих температурно-деформаційних режимів.

**Таблиця 6.31** – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі В розмірами 4,7 × 1190 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>а</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
1	2	3	4	5	6	7
0 <sup>б</sup>	150					
01	130	1260	555,1	800	0,85	1054,4
1	95	1237	1030,8	2500	1,26	3432,8
2	58	1213	1287,0	2500	1,36	4770,8
3	41	1174	910,8	2000	1,78	3288,1
4	30	1127	854,9	2000	1,78	2503,3
4а	24	1050	805,6	2000	2,89	2873,3
5	18	934	1117,1	2400	2,55	4052,2

## Продовження таблиці 6.31

1	2	3	4	5	6	7
6	13	921	1180,6	2400	3,40	5244,2
7	9,5	909	1127,3	2000	4,45	5419,4
8	7,2	896	994,5	1800	5,52	4895,3
9	5,5	880	970,1	1700	7,30	5521,2
10	4,7	864	647,0	1500	9,44	3427,5

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

**Таблиця 6.32** – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі В розмірами 5,7 × 1190 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	555,1	800	0,85	1054,4
1	95	1237	1030,8	2500	1,26	3432,8
2	58	1213	1287,0	2500	1,36	4770,8
3	41	1174	910,8	2000	1,78	3288,1
4	30	1127	854,9	2000	1,78	2503,3
4a	24	1050	805,6	2000	2,89	2873,3
5	18	934	1117,1	2400	2,55	4052,2
6	13	921	1180,6	2400	3,40	5244,3
7	10	909	994,0	2000	4,45	4452,3
8	8	894	871,7	1800	5,52	4029,5
9	6,5	877	840,8	1700	7,30	4522,5
10	5,7	861	606,4	1500	9,44	3212,7

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

Виробництво дослідної партії гарячекатаних рулонів перерізом 4,7 × 1190 мм та 5,7 × 1190 мм з марки сталі В згідно з базовими вимогами API-5L здійснювалось зі слябів однієї плавки 172648-3.



**Рисунок 6.19** – Схема термохімічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки В на стані 1700

Після прокатки рулони було оброблено на установці прискореного охолодження. Фактичні термохімічні параметри виробництва дослідної партії наведені в табл. 6.33.

Слід зазначити, що за умов виробничого процесу час нагрівання всіх слябів було збільшено з 2–35 годин при цільовому розрахунку до 3–56 годин, фактично.

Після змотування рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °С, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів з метою зменшення товщини шару повітряної окалини. Після контрольованого охолодження рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі механічних випробувань та металографічного дослідження.

Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.34.

**Таблиця 6.33** – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра
Температура нагрівання слябів	°С	1260–1270
Час нагрівання	Годин-хвилин	3–56
Температура прокатки після кліті 4а	°С	1088–1112
Температура прокатки після кліті 10	°С	851–884
Температура змотування рулонів	°С	583–613
Кількість секцій для прискороного охолодження	шт.	10
Швидкість охолодження	°С/с	90

**Таблиця 6.34** – Результати механічних випробувань дослідної партії рулонів

№ плавки	№ рулону	Товщина рулонів, мм	Механічні властивості				
			Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Відносне видовження, %	Вигін по оправці 180°	Границя плинності / Тимчасовий опір
162955-3	1	5,7	360	475	30	Без розтріскування	0,76
	2		340	465	33	Без розтріскування	0,73
	3	4,7	360	480	36	Без розтріскування	0,75
	4		365	485	40	Без розтріскування	0,75
Вимоги API-5L PSL-1			≥245	≥415	≥18	Без розтріскування	–
Вимоги API-5L PSL-2			245–450	415–655	≥18	Без розтріскування	≤0,93

Отримані результати механічних випробувань відповідають вимогам рівня PSL-1 та PSL-2 API-5L для сталі марки В. Слід зазначити, що відповідно до вимог PSL-2 додатково до вказаних (див. табл. 6.34) виконуються випробування на ударну в'язкість, які в даній роботі не досліджувалися.

Для аналізу внутрішньої якості прокату проведені металографічні дослідження зразків від рулонів товщиною 4,7 мм та 5,7 мм, плавки 162955-3. Мікроструктура зразків наведена на рис. 6.20, 6.21.

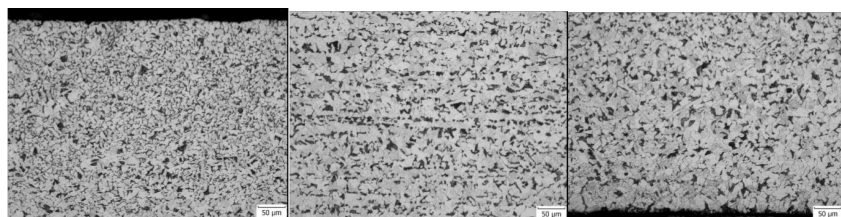


поверхня

вісь

поверхня

**Рисунок 6.20** – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 4,7 мм, плавки 162955-3 після травлення,  $\times 200$



поверхня

вісь

поверхня

**Рисунок 6.21** – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 5,7 мм, плавки 162955-3 після травлення,  $\times 200$

Мікроструктура зразків від рулону товщиною 4,7 мм є ферит-перлітною з зерном фериту 10 номеру. Смугастість на поверхні зразків відсутня. На половині товщини смугастість дорівнює 1 балу.

Мікроструктура зразків від рулону товщиною 5,7 мм є ферит-перлітною з зерном фериту 9, 10 номеру. Смугастість на поверхні зразків відсутня. На половині товщини смугастість дорівнює 2 балам.

Такі відмінності стану мікроструктури прокату та смугастості на різних товщинах свідчать про недостатнє охолодження прокату товщиною 5,7 мм на установці прискореного охолодження в порівнянні з товщиною рулонів 4,7 мм, що найбільш відбилося на осьовій частині прокату.

Для покращення мікроструктури прокату товщиною 5,7 мм або більшої необхідне додаткове дослідження з корегуванням

технології охолодження прокату (збільшення охолоджувальних секцій), а також можливо скорегувати хімічний склад з доданням незначної кількості мікролегуючих елементів в сталь з метою гальмування рекристалізації та зниження крапки структурного перетворення аустеніту, що частково дозволить компенсувати обмежені можливості існуючого устаткування прискореного охолодження.

Таким чином, вперше, для умов стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокату рулонів перерізом  $4,7 \times 1190$  мм та  $5,7 \times 1190$  мм зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб згідно з вимогами API-5L, рівень PSL-1.

Вперше в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» вироблена дослідницька партія прокату зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб, яка повністю відповідає вимогам американського стандарту API-5L, рівень PSL-1.

Для визначення можливості виробництва прокату зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб з забезпеченням вимог API-5L у повній відповідності до рівня PSL-2 необхідно провести додаткові дослідження випробувань на ударну в'язкість.

Виконано порівняння якості дослідницької партії прокату товщиною 4,7 мм та 5,7 мм. Встановлено, що для покращення мікроструктури прокату товщиною 5,7 мм або подальшого освоєння більших товщин необхідне додаткове дослідження технології охолодження прокату та змінення хімічного складу сталі з додаванням мікролегуючих елементів.

### ***6.2.2.2 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X52M товщиною 8 мм згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»***

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів із сталі категорії міцності X52M для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L, розмірами  $8 \times 1260$  мм в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом 8×1260 мм із сталі категорії міцності X52M, для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L, для умов стану 1700 є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби вітчизняних та закордонних виробників електрозварних труб.

Вимоги до хімічного складу згідно зі стандартом API-5L, здебільшого, лімітують тільки верхню межу вмісту хімічних елементів та дають широке поле діяльності виробникам у забезпеченні необхідного рівня властивостей, та поділяють на два рівні: базовий – PSL-1, та з додатковими вимогами – PSL-2, табл. 6.35.

**Таблиця 6.35** – Вимоги до хімічного складу сталі категорії міцності X52 згідно зі стандартом API-5L

Вимоги	Марка сталі	Хімічний склад, %						
		C	Si	Mn	P	S	Nb+V+Ti	CE P <sub>cm</sub>
API-5L PSL-1	X52	≤0,28	–	≤1,40	≤0,030	≤0,030	≤0,15	–
API-5L PSL-2	X52M	≤0,22	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,15	≤0,25
Додаткові вимоги PSL-1: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,50%; Cr ≤ 0,50%; Mo ≤ 0,15%. Додаткові вимоги PSL-2: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,30%; Cr ≤ 0,30%; Mo ≤ 0,15%. Вуглецевий еквівалент розраховується по формулі: $CE P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B.$ Формула застосовується при вмісті вуглецю ≤0,12%.								

Також, згідно з вимогами PSL-1 API-5L марка X52 може вироблятися у будь-який наступний спосіб: гаряча прокатка, прокатка з нормалізацією, термомеханічна прокатка. Згідно з вимогами PSL-2 API-5L марка X52M може вироблятися тільки способом термомеханічної прокатки. В вимогах також є способи поставки після різноманітних способів термічної обробки, але в даній роботі ми їх не розглядаємо.

Для виробництва дослідної партії гарячекатаних рулонів із сталі категорії міцності X52M, розмірами 8×1260 мм було розроблено

два варіанти хімічного складу та виготовлено дві різноманітні плавки, табл. 6.36 [246]. Слід зазначити, що при освоєнні даного сортаменту у якості вимог до прокату застосовувались базові вимоги API-5L, додаткові вимоги с врахуванням трубного переділу замовником не виставлялися. У якості мікролегуючих елементів використано Nb, з різним вмістом по плавках, та Ti. Розроблений хімічний склад відповідає вимогам PSL-1 та PSL-2, та може бути застосований до сталі категорії міцності X52 та X52M [247]. На підставі хімічного складу обох плавко, табл. 6.36, розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки, з метою забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей готового прокату зі сталі категорії міцності X52 та оцінки впливу різного рівня мікролегуючих елементів, табл. 6.37 [248]. Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі категорії міцності X52 на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.22.

**Таблиця 6.36** – Хімічний склад плавки сталі категорії міцності X52

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %													
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Nb	Ti	Al	CE P <sub>cm</sub>
254077-2	0,10	1,40	0,21	0,009	0,020	0,03	0,02	0,02	0,003	0,004	0,040	0,017	0,032	0,18
164022-3	0,12	1,36	0,03	0,009	0,019	0,02	0,01	0,01	0,003	0,002	0,026	0,019	0,043	0,19

**Таблиця 6.37** – Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра
Температура прокатки після кліті 10	°C	820–880
Температура змотування рулонів	°C	580–630
Кількість секцій, які використовуються для прискороного охолодження	шт.	10–14
Швидкість охолодження	°C/c	45–55

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо, для двох плавко було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.38, 6.39 [248].



**Рисунок 6.22** – Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі категорії міцності X52 на стані 1700

Слід зазначити, що плавка 164022-3 була розлита у сляби розмірами  $150 \times 1620 \times 6200$  мм, плавка 254077-2 була розлита у сляби  $250 \times 1550 \times 6200$ , які після редукування до розмірів  $150 \times 1260 \times 5800$  (з одного сляба  $250 \times 1550 \times 6200$  мм після редукування отримано два сляба з вказаними розмірами) було використано для подальшої прокатки [11, 12, 16].

Необхідно відмітити, що цільові деформаційні параметри прокатки двох плавок є однаковими. Незначна відмінність у температурах, силі прокатки на потужності двигунів по проходах пов'язана з різним хімічним складом двох плавок (див. табл. 6.36), а також різною довжиною слябів, які використовувались.

Порівняння сили при прокатці дослідних плавок рулонів наведено на рис. 6.23.

Таким чином, згідно з розрахунком, при виробництві рулонів розмірами  $8 \times 1260$  мм по однакових режимах прокатки, плавка 164022-3 з більшим вмістом С та меншим вмістом Nb має більші властивості міцності, ніж плавка 254077-2.

**Таблиця 6.38** – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів плавки 254077-2, сталі категорії міцності X52 розмірами 8 × 1260 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	551,4	800	0,85	1047,3
1	95	1238	1036,6	2500	1,26	3452,1
2	58	1215	1315,0	2500	1,36	4874,9
3	41	1177	936,1	2000	1,78	3380,0
4	30	1131	891,0	2000	1,78	2608,9
4a	24	1056	856,4	2000	2,89	3054,5
5	19	934	1097,8	2400	2,21	3169,7
6	14	918	1340,0	2400	3,06	5357,0
7	11	906	1115,7	2000	3,92	4397,5
8	9,5	891	764,6	1800	4,63	2608,1
9	8,5	871	646,3	1700	5,16	2060,6
10	8	850	429,5	1500	5,70	1130,5

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

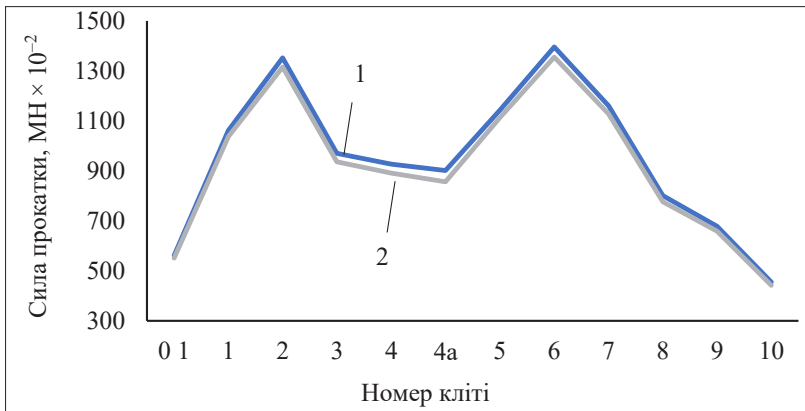
**Таблиця 6.39** – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів плавки 164022-3, сталі категорії міцності X52 розмірами 8 × 1260 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
1	2	3	4	5	6	7
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	561,7	800	0,85	1067,0
1	95	1237	1061,7	2500	1,26	3535,6

Продовження таблиці 6.39

1	2	3	4	5	6	7
2	58	1213	1352,4	2500	1,36	5013,3
3	41	1174	969,9	2000	1,78	3501,6
4	30	1127	926,7	2000	1,78	2713,6
4a	24	1050	900,9	2000	2,89	3213,2
5	19	934	1125,7	2400	2,21	3250,3
6	14	918	1377,7	2400	3,06	5508,1
7	11	907	1145,5	2000	3,92	4515,1
8	9,5	892	786,7	1800	4,63	2683,4
9	8,5	873	662,6	1700	5,16	2112,7
10	8	852	440,6	1500	5,70	1159,7

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані



**Рисунок 6.23** – Порівняння сили прокатки по клітях при виробництві рулонів з плавки 164022-3 (1) та плавки 254077-2 (2)

Цей розрахунок підтверджує переваги термомеханічного способу прокатки, та можливість його впровадження на устаткуванні, яке не було розраховане на виробництво прокатних продуктів з рівнями міцності, які перевищують проектні. Сталь яка застосовується для термомеханічної прокатки зазвичай має нижчий рівень міцності в процесі прокатки ніж сталі які виробляються

іншими способами, завдяки меншому вмісту хімічних елементів. Особливості цього способу є те, що формування кінцевих властивостей відбувається вже після процесу прокатки. Таким чином прокатне устаткування працює без перевищення експлуатаційних характеристик.

Згідно з виконаними розрахунками, встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені. Таким чином, дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні із застосуванням розрахованих температурно-деформаційних режимів.

Виробництво дослідної партії гарячекатаних рулонів перерізом  $8 \times 1260$  мм, зі сталі категорії міцності X52 згідно з базовими вимогами API-5L здійснювалось з слябів двох плавок 164022-3, та 254077-2 з різним хімічним складом.

Після прокатки, рулони були оброблені на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 6.40.

**Таблиця 6.40** – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра
Температура прокатки після кліті 10	°C	865–885
Температура змотування рулонів	°C	622–644
Кількість секцій для прискореного охолодження	шт.	10–11
Швидкість охолодження	°C/с	49

Слід зазначити, що всі температури після кліті 10 та температури змотування знаходились в горі діапазону, та на деяких рулонах перевищили верхній рівень.

Після змотування рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °C, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів, з метою зменшення товщини шару повітряної окалини. Після контрольованого охолодження рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі механічних випробувань та металографічного дослідження. В дослідженні вказано марку сталі S355MC як порівняльну, хімічний склад якої було використано для виробництва сталі категорії міцності X52 (X52M).

Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.41.

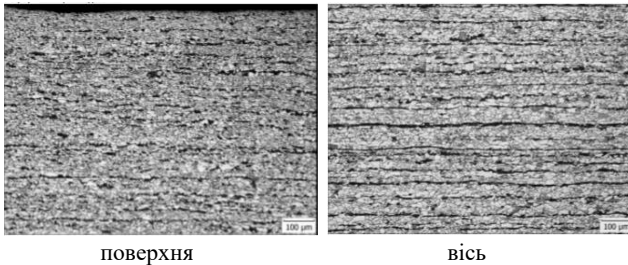
Отримані результати механічних випробувань відповідають вимогам рівня PSL-1 та PSL-2 API-5L для сталі категорії міцності X52 та X52M.

Однак, слід зазначити, що отриманий низький рівень відносного видовження, та ударної в'язкості не є типовим для дослідної марки сталі. Низькі результати по цим показникам отримані в наслідок недостатнього прискореного охолодження та підвищених температур кінця прокатки в кліті 10, та температури змотування.

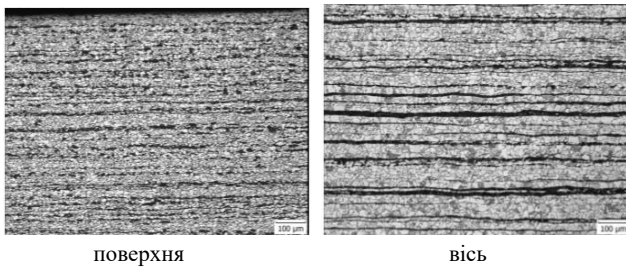
**Таблиця 6.41** – Результати механічних випробувань дослідницької партії рулонів

№ плавки	Механічні властивості					Ударна в'язкість, KV, Дж, при температурі випробувань, °C			
	Границя плинності, $\sigma_f$ , МПа	Тимчасовий опір, $\sigma_b$ , МПа	Відносне видовження, $\delta$ , %	Вигін по опраці 180°	$\sigma_{T, \sigma_b}$	0	-20	-40	-60
254077-2	425	520	24	Без розтріскування	0,82	–	41	37	34
	430	520	24		0,83		37	38	33
164022-3	380	500	24	Без розтріскування	0,76	–	32	30	30
	390	500	27		0,78		34	32	32
Вимоги API-5L PSL-1	$\geq 360$	$\geq 460$	16	Без розтріскування	–	–	–	–	–
Вимоги API-5L PSL-2	360–530	460–760	16	Без розтріскування	0,93	27	–	–	–

Для аналізу внутрішньої якості прокату проведено металографічні дослідження зразків від рулонів плавки 254077-2 та плавки 164022-3. Мікроструктура зразків наведена на рис. 6.24, 6.25.



**Рисунок 6.24** – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 8 мм, плавки 254077-2 після травлення,  $\times 100$



**Рисунок 6.25** – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 8 мм, плавки 164022-3 після травлення,  $\times 100$

Мікроструктура зразків від рулонів плавки 254077-2 мм є ферит-перлітною з зерном фериту на поверхні 9–10 номеру, в осі 8–9 номеру. Смугастість на поверхні зразків 1 бал, в осі 2 бал. Мікроструктура зразків від рулону плавки 164022-3 є ферит-перлітною з зерном фериту 10 номеру. Смугастість на поверхні зразків 2 бал, в осі 3–4 бал. Отримані показники мікроструктури свідчать про недостатнє здійснене прискорене охолодження прокату на перевищення цільових термомеханічних температур на обох плавках, що також підтверджується результатами механічних випробувань.

Більш краща мікроструктура та механічні властивості отримані на плавці 254077-2 за рахунок більшого вмісту Nb-0,040 %, в порівнянні з плавкою 164022-3 (Nb-0,026 %), при однакових температурно-деформаційних параметрах. Таким чином, підтверджено позитивний вплив Nb на формування мікроструктури та властивості прокату при термомеханічному способі обробки.

З метою покращення мікроструктури та механічних властивостей рулонів товщиною 8 мм зі сталі категорії міцності X52 необхідне додаткове дослідження з корегуванням технології в частині зниження температур змотування, збільшення кількості охолоджувальних секцій. Також слід зазначити важливість цього дослідження так як виробництво товщини 8 мм знаходиться на межі технічних можливостей стану 1700.

Таким чином, вперше, для умов стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки рулонів перерізом  $8 \times 1260$  мм зі сталі категорії міцності X52 для подальшого виробництва електрозварних труб згідно з вимогами API-5L, рівень PSL-1.

Вперше, в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» вироблена дослідницька партія прокату з сталі категорії міцності X52 (X52M), для подальшого виробництва електрозварних труб, яка повністю відповідає вимогам американського стандарту API-5L, рівень PSL-1, та PSL-2.

В роботі підтверджено переваги термомеханічного способу прокатки, завдяки особливостям хімічного складу та нижчого рівня міцності в процесі виробництва, в порівнянні з іншими способами прокатки, та можливість його впровадження на устаткуванні, яке не було розраховане на виробництво продуктів таких рівнів міцності.

Підтверджено позитивний вплив Nb на формування мікроструктури та властивості прокату при термомеханічному способі обробки.

Встановлено, що для покращення мікроструктури прокату граничної для стану 1700 товщини 8 мм необхідне додаткове дослідження з корегуванням технології в частині зниження температур змотування та збільшення кількості охолоджувальних секцій.

### **6.2.3 Освоєння виробництва товстолистового прокату зі сталі марки ЕН36 товщиною 25 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами Правил Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва товстолистового прокату розмірами  $25 \times 2150 \times 8000$  мм із судосталі марки ЕН36 замість термічної обробки нормалізацією в умовах стану 3600 є актуальним завданням, що забезпечить виробництво прокату відповідно до сучасних вимог та дозволить знизити собівартість продукції.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва товстолистового прокату із судносталі підвищеної міцності марки ЕН36 згідно з вимогами Правил Bureau Veritas (BV), розмірами  $25 \times 2150 \times 8000$  мм в умовах стану 3600 «МК АЗОВСТАЛЬ».

Детальній сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» наведено в розділі 1.3.1.2.

Стан виробляє товстолистовий прокат конструкційного, машинобудівного, суднобудівного призначення, а також для будівництва морських бурових платформ, для виготовлення електрозварних труб великого діаметру з підвищеним тиском та іншого призначення.

Слід зазначити, що наразі, виробництво прокату із судносталі підвищеної міцності марки ЕН36 товщиною до 50 мм на стані 3600 здійснюється з виконанням термічної обробки – нормалізації, що відповідно зазначено сертифікатом № 08458/D0 BV, який видало товариство Bureau Veritas (Бюро Веритас).

Згідно з Правилами BV, товстолистовий прокат товщиною до 100 мм зі сталі марки ЕН36 може виготовлятися з нормалізацією або способом термомеханічної прокатки [163].

Для проведення дослідної прокатки використані сляби розмірами  $220 \times 1850 \times 1590-1600$  мм вагою 5,080-5,112 т, плавка 2104917, з хімічним складом, наведеними в табл. 6.42.

Хімічний склад дослідних слябів повністю відповідає вимогам «Правил на матеріали та зварювання для класифікації морських

споруд» NR216, Глава 2, встановлених для термомеханічного способу виробництва прокату зі сталі марки EN36.

Для порівняння хімічних складів в табл. 6.42 наведений типовий хімічний склад, який використовується наразі для виробництва сталі марки EN36 з термічною обробкою – нормалізацією. Наведений хімічний склад має незначні відхилення від складу, який використано в дослідній прокатці, але перевищення встановленого обмеження по вуглецевому еквіваленту унеможливує його використання для термомеханічного способу прокатки.

При проектуванні технології використовувалися принципи низькотемпературної контрольованої прокатки, а саме формування необхідної структури і властивостей прокату при завершенні деформації у двофазній  $\gamma$ - $\alpha$  області [249–253].

**Таблиця 6.42** – Параметри слябів для дослідної прокатки

Марка сталі	№ плавки	CE	Вміст хімічних елементів, %													
			C	Mn	Si	S	P	Nb	Cr	Ni <sup>b</sup>	Cu	V <sup>b</sup>	Ti <sup>b</sup>	Mo	Al	H
EN36	2104917	0,38	0,16	1,28	0,25	0,0040	0,019	0,033	0,03	0,03	0,03	0,003	0,012	0,005	0,04	4,9
EN36	типовий <sup>a</sup>	0,37–0,41	0,14–0,16	1,32–1,35	0,22–0,26	0,005–0,011	0,009–0,018	0,032–0,038	0,03–0,08	0,02–0,13	0,02–0,05	–	–	–	0,028–0,040	3,1–4,7
Правила BV NR216, Глава 2		≤0,38	≤0,18	0,90–1,60	≤0,50	≤0,035	≤0,035	0,02–0,05	≤0,20	≤0,40	≤0,35	0,05–0,10	≤0,02	≤0,08	≥0,015	–
		<p>Сума Nb+V+Ti ≤0,12%.</p> <p>Вуглецевий еквівалент CE розраховується по формулі:</p> $CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$														

<sup>a</sup> типовий хімічний склад, який застосовується для поточного виробництва вказаного сортаменту з використанням термічної обробки – нормалізації;

<sup>b</sup> вказані елементи використовуються окремо або в комбінації.

В якості дослідного сортаменту прийнятий прокат розмірами  $25 \times 2150$  мм зі сталі марки ЕН36, який наразі виробляється тільки з нормалізацією.

Розраховані наступні цільові термомеханічні показники процесу прокатки: ступінь деформації після розбивання ширини розкату в чорновій кліті – не менше ніж 15 %; температурний режим в чистовій кліті, температура початку деформації  $750\text{--}770$  °С, температура закінчення деформації  $740\text{--}720$  °С [254, 255].

Цільова схема термомеханічного процесу прокатки товстих листів зі сталі марки ЕН36 на стані 3600 виглядає наступним чином, рис. 6.26.



**Рисунок 6.26** – Схема термомеханічного процесу прокатки товстих листів зі сталі марки ЕН36 на стані 3600

На рис. 6.26, під протифлокєнною обробкою (ПФО) мається на увазі уповільнене охолодження прокату в штабелі [251, 252].

Проектування технології виконувалося на базі комплексної аналітичної моделі стану 3600 [256, 257].

Цільовою схемою прокатки в чорновій кліті є поперечно-поздовжня схема з наростанням деформації, що забезпечує, в середньому,

постійну, на рівні 23МН, силу прокатки по пропусках. Реалізація процесу термомеханічної прокатки на стані 3600 здійснювалася відповідно до розроблених температурно-деформаційних режимів, табл. 6.43, 6.44.

**Таблиця 6.43** – Цільові та фактичні параметри виробництва листового прокату розмірами 25 × 2150 мм зі сталі марки ЕН36 в чорновій клітці стану 3600

№ проходу	Цільові параметри				Фактичні параметри									
					партія № 7052					партія № 7053				
	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Температура, °С
0	К 221,7				221,7					К 221,7				
1	190	14,3	2045,6	1150	200	202,2	9,6	2250	1128	180	182,7	21,3	2500	1125
2	154	18,9	2386,9	1146	180	182,3	10,9	2300		152	154,2	18,5	2250	
3	К 131	14,9	2299,5	1142	К 145	147,7	23,4	2500		К 115	119,3	29,3	3420	
4	110	16,0	2300,4	1136	123	127,4	15,9	3500		90	93,9	27,1	3200	
5	91	17,3	2302,9	1129	100	103,9	22,6	3200		72	75,2	24,9	2820	
6	75	17,6	2202,7	1121	К 72	76,1	36,5	3300						

К – кантування; <sup>а</sup> фактична товщина розкату, перерахована з урахуванням пружини клітці.

Фактично, в процесі дослідження було використано дві схеми – поздовжньо-поперечно-поздовжня (розбивка з протягуванням) для партії № 7052 та цільова – поперечно-поздовжня схема для партії № 7053.

Порівняння результатів розрахунку з фактичними параметрами прокатки наведені в табл. 6.43, 6.44.

**Таблиця 6.44** – Цільові та фактичні параметри виробництва листового прокату розмірами 25 × 2150 мм зі сталі марки ЕН36 в чистовій кліті стану 3600

№ проходу	Цільові параметри				Фактичні параметри									
					партія № 7052					партія 7053				
	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Температура, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	75					76,1					75,2			
1	71	5,3	2427,1	760	66	66,8	12,2	3450	768	65	65,6	12,8	3370	767
2	65	8,5	3419,2	756	56	58,2	12,9	4300		57	58,4	11,0	3820	
3	59,5	8,5	3322,9	754	48	50,3	13,6	4370		51	52,6	9,9	3950	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	54	9,2	3452,6	752	42	44,2	12,1	4320		45	46,6	11,4	3950	
5	49	9,3	3345,3	750	38	39,1	11,5	3670		40	41,5	10,9	3900	
6	44	10,2	3501,9	747	34	35,1	10,2	3650		36	37,3	10,1	3750	
7	39,5	10,2	3393,9	744	31	31,6	10,0	3370		32	33,3	10,7	3770	
8	35	11,4	3570,2	741	29	29	8,2	3020		29	30	9,9	3570	
9	31	11,4	3458,9	737	29	26,6	8,3	1550	738	27	27,3	9,0	3200	
10	27,5	11,3	3274,6	736						26,5	25,6	6,2	2470	721
11	25	9,1	2654,1	734										

<sup>а</sup> фактична товщина розкату, перерахована з урахуванням пружини кліті.

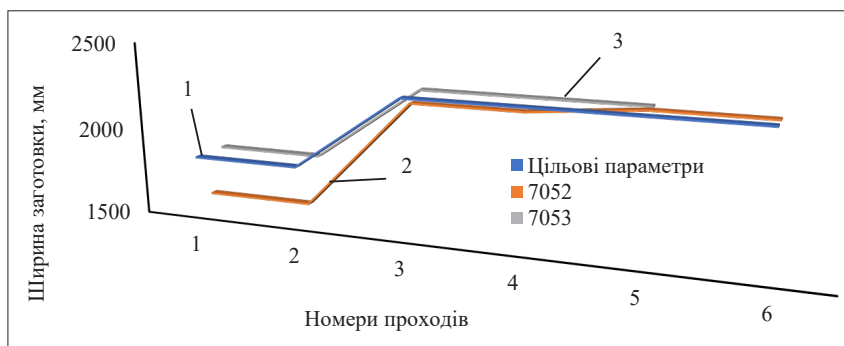
Фактичні параметри прокатки, у тому числі ступінь деформації після розбивання в чорновій кліті, та температурний режим в чистовій кліті, були витримані.

Схема прокатки в чорновій кліті, яка була застосована при виробництві партії 7053, є більш раціональною, оскільки дозволяє при збільшенні ступеню деформації знизити кількість проходів, зменшити цикл прокатки в чорновій кліті при незначному збільшенні сили прокатки в 3 та 4 проходи, та більш наближена до цільової.

Схема прокатки при виробництві партії 7052 за рахунок фази поздовжньої прокатки (проходи 1, 2) та, в наслідок цього, збільшення ступеню деформації по проходах 3, 5 та 6 призвела до підвищення сили прокатки, отже є більш енерговитратною.

Змінення ширини заготовки в чорновій кліті при реалізації різних комбінацій поперечної та поздовжньої схеми прокатки наведено на рис. 6.27.

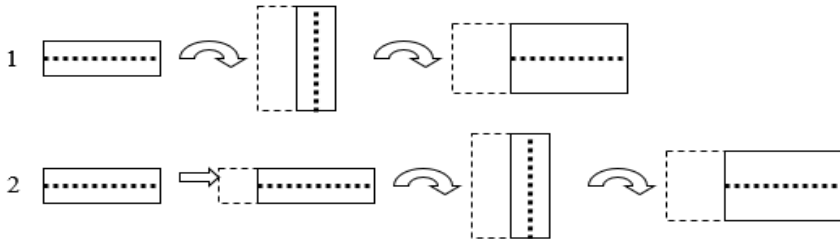
Після прокатки та остаточного охолодження, від прокату було відібрано проби для здійснення комплексу механічних випробувань (основних та додаткових), відповідно до вимог Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480 «Схвалення процесу виготовлення металопродукції». Результати випробувань наведені в табл. 6.45, 6.46. Для порівняння чинної технології з дослідною прокаткою,



**Рисунок 6.27** – Змінення ширини заготовки в чорновій кліті при реалізації цільової схеми прокатки (1), схеми при виробництві партії 7052 (2), схеми при виробництві партії 7053 (3)

в табл. 6.45 наведені результати випробувань прокату виробленого з нормалізацією та за технологією ТМСР.

Схеми прокатки в чорновій кліті, які були застосовані, наведені на рис. 6.28.



**Рисунок 6.28** – Схема прокатки в чорновій кліті цільова та фактично застосована на партії № 7053 (1), фактично застосована на партії № 7052 (2)

**Таблиця 6.45** – Результати основних випробувань прокату згідно з вимогами Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480

Вид випробувань	Вимоги BV	Результати випробувань		Порівняльні дані зі станом після термічної обробки – нормалізації
		Партія 7052	Партія 7053	
1	2	3	4	5
Товщина прокату, мм		25	25	23–27
Границя плинності, $R_{eH}$ , МПа, не менше	355	437	450	367–426
Тимчасовий опір, $R_m$ , МПа	490–630	550	560	496–540
Відносне видовження, $A_5$ , %, не менше	21	30	30	25–36
Середня робота удару, Дж				
$KVL_{-40}$ (поздовжнє випробування)	34	144/166/155	142/125/149	194/204
$KVT_{-40}$ (поперечне випробування)	24	99/105/107	116/107/117	

**Таблиця 6.46** – Результати додаткових випробувань прокату згідно з вимогами Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480

Вид випробувань	Результати випробувань	
	Партія 7052	Партія 7053
Випробування на розтягнення (зі зняттям напруження) при 600 °С (2 хв/мм) хв 1 час		
Границя плинності, $R_{eH}$ , МПа, не менше	435	459
Тимчасовий опір, $R_m$ , МПа	548	556
Відносне видовження, $A_5$ , %, не менше	30	31
Випробування на ударний вигін на не зістарених зразках, Дж		
KVL <sub>0</sub>	171/192/187	149/177/182
KVL <sub>-20</sub>	185/187/192	173/188/146
KVT <sub>-20</sub>	143/135/132	132/142/136
KVL <sub>-40</sub>	144/166/155	142/125/149
KVT <sub>-40</sub>	99/105/107	116/107/117
KVL <sub>-60</sub>	113/127/117	104/112/115
KVT <sub>-60</sub>	80/72/81	77/96/86
Випробування на ударний вигін на зразках деформаційна зістарених, Дж		
KVL <sub>-20</sub>	158/153	184/166
KVL <sub>-40</sub>	107/113	140/116
KVL <sub>-60</sub>	48/10	70/84
Волокно <sub>.60</sub> , %	40/0	90/100
Неметалеві вclusions середній / максимальний		
Силікати крихкі СХ, бал	2,1/2,5	0,8/1,5
Силікати недеформовані, СН, бал	2,0/2,5	1,5/2,0
Сірчані відбитки	В осевій зоні скупчення сірки у вигляді крапок та окремих коротких переривистих ліквацийних стежок	
Дослідження мікроструктури	Ферит-перлітна, зі збільшенням доли перлітної складової в осевій зоні	
Визначення розміру зерна	9; 10	9; 10
Випробування на розтягнення у напрямку товщини, Z, %	61/67	60/52

Таким чином, результати основних механічних випробувань прокату виробленого по режимам термомеханічної прокатки, повністю задовольняють вимогам Правил BV. Додаткові випробування в цілому також показали позитивний результат. Виняток склали результати випробувань зразків партії 7052 на ударний вигін з деформаційним зістаренням і оцінка частки волокна в зламі при температурі « $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ », які показали більш низький рівень властивостей. Дані результати вимагають проведення додаткових випробувань та дослідження мікроструктури.

Невелике збільшення властивостей, отриманих при розтягувальних випробуваннях партії 7053, може бути пов'язано з використанням більш напруженого режиму прокатки у чорновій кліті. Прокатка, здійснена по режимах термомеханічної прокатки, забезпечила отримання більш дрібного зерна фериту 10; 9 бал в порівнянні з нормалізацією 8; 9 бал, для порівнянного сортаменту.

У порівнянні з результатами випробувань на розрив на порівнянному сортаменті, зробленому з нормалізацією, при термомеханічній прокатці отримано більш вищий рівень границі плинності та тимчасового опору, що дозволяє зробити висновок про можливість оптимізації технології та хімічного складу стали.

Таким чином, підтверджена технічна можливість виробництва товстолистового прокату зі сталі марки EN36 для суднобудування способом термомеханічної прокатки, в умовах стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»».

Вперше для умов стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»» способом ТМСР вироблена дослідна партія прокату зі сталі марки EN36, згідно з вимогами Правил BV, проведено комплекс основних та додаткових випробувань, що підтверджує можливість подальшого засвоєння технології та сертифікації продукції.

Впровадження технології термомеханічної прокатки замість нормалізації дозволить знизити собівартість прокату за рахунок виключення витрат природного газу на термообробку.

Для підготовки сертифікації, згідно з Правилами BV, необхідно додатково провести низку досліджень прокату зі сталі марки EN36 різних товщин.

### **6.3 Обґрунтування можливості виробництва прокату за технологією термомеханічної прокатки на станах з існуючим рівнем устаткування**

Розроблені та впроваджені технологічні процеси із засвоєння термомеханічної прокатки, на підставі сучасного попиту, реалізовано на існуючому устаткуванні заводу Ferriera Valsider, Trameal, стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІІЧА» та стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» без проведення додаткових реконструкційних впроваджень.

Різний технічний рівень та комплекtnість устаткування перелічених виробництв підтверджує можливість розширення їх поточних можливостей із впровадження технології термомеханічної прокатки у всіх її різноманітних варіаціях (термомеханічна прокатка та термомеханічна прокатки з прискореним охолодженням).

Безумовно, використання найсучаснішого устаткування з відповідними технічними характеристиками це є інший рівень технології. Вітчизняні та деякі іноземні підприємства знаходяться тільки на етапі модернізації та намагаються наздогнати. Постійна внутрішня боротьба вітчизняних компаній (підприємств) між економічними показниками проектів та якістю, яка лежить на поверхні та гальмує рівень їх технологічності, не дає бачити процеси які знаходяться глибше, наприклад стабільність параметрів якості, виробництво найвищих категорій міцності, впровадження найновітніших продуктів та технологій на рівні з найкращими світовими виробниками. Для цього потрібно встановлювати відповідне устаткування, яке перевищує сучасні потреби виробництва. Інакше вітчизняні підприємства будуть постійно наздоганяти. Як приклад, встановлення на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» установки прискореного охолодження, яка на момент встановлення у 2012 р. була вже застаріла, швидкість охолодження не перевищує 45 °C/c, що обмежує як можливості по виробництву сортаменту так і знижує економічні показники поточного виробництва, тоді як сучасні швидкості для охолодження товстолистого прокату сягають 100 °C/c, або встановлення в 2018 р. на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІІЧА» пневматичної моталки з максимальною вагою змотування рулонів 27 т, та застарілими показниками по якості змотування, серед

яких телескопічність 30 мм, тоді як сучасні вимоги до ваги рулонів знаходяться в межах 32–36 т. Також, заміна на стані 1700 в 2019 р. чорнової групи на сучасну реверсивну кліть, встановлення CoilBox та часткова модернізація чистової групи, без заміни установки прискореного охолодження, що не тільки знижує ефективність виробництва, а взагалі ставить питання по можливостях виробництву проєктного сортаменту модернізованого стану.

Таким чином, вперше розроблені та впроваджені на вітчизняних підприємствах технологічні процеси термомеханічної прокатки, безумовно, є найкращими досягнутими результатами, подальший розвиток яких має різні обмеження відповідно до можливостей поточного устаткування, що і встановлено шляхом промислових досліджень.

## Висновки до розділу 6

1. На підставі проведених досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату, уточнення розрахунку теплових втрат, аналізу технічних параметрів устаткування товстолистових станів 3600, 3200, 3000, широкоштабового стану 1700 та стану Стеклеля визначено технічну можливість впровадження технології ТМСР товстолистового та рулонного прокату в поточних умовах.

2. На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату розроблено технологію термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на широкоштабовому стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІПЧА» та засвоєно виробництво рулонного прокату конструкційного сортаменту зі сталей марок S355MC, S460MC, згідно з вимогами стандарту EN 10149-2, рулонного прокату для подальшого виробництва труб зі сталей категорій міцності В, Х52М, згідно з вимогами стандарту API-5L. Визначено, що додаткове додавання 0,014% Nb при виробництві штаби

товщиною 8 мм зі сталі категорії міцності X52M дозволяє підвищити границю плинності на 40 МПа, тимчасовий опір на 20 МПа, зменшує бал смугастість мікроструктури на поверхні та в центрі на 1–2 бали відповідно, що частково дозволяє компенсувати вплив недостатньої потужності установки прискореного охолодження на формування механічних властивостей.

4. Для товстостістового стану 3600 розроблено технологію термомеханічної прокатки з завершенням деформації у двофазній  $\gamma$ - $\alpha$  області та виготовлено дослідну партію прокату для суднобудування зі сталі підвищеної міцності марки EN36, згідно з вимогами Правил BV, на підставі урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату. Встановлено, що при порівняльному хімічному складі сталі, при термомеханічній прокатці отримано вищі механічні властивості, в том числі границя плинності +40 МПа, тимчасовий опір +37 МПа, ніж при термічній обробці нормалізацією.

5. На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату, шляхом аналітичного моделювання, для стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider розроблено технологію виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X65 способом термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням. Для розрахунку температурно-деформаційного режиму прокатки отримано закономірності для розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією, для умов прокатки на стані Стеккеля, і залежність, яка дозволяє визначати змінення температури металу в пічній моталці та додатково враховує усереднену теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей, що нагріваються, радіус барабану моталки та барабану з металом, швидкість прокатки, які включено в аналітичну модель розрахунку технологічного процесу. При перевірці аналітичної моделі, похибка, отримана при розрахунку сили прокатки на стані Стеккеля склала від -4,89% до 6,59%, що підтверджує можливість її подальшого використання. При перевірці технічних можливостей наявного

устаткування встановлено, що фактична потужності головних двигунів стану 3170 та 1780 є відповідно на 50% та 20% нижчою за необхідну для забезпечення максимальної сили прокатки, що враховано при розробці технології прокатки.

6. На підставі аналізу температурно-деформаційних та швидкісних параметрів прокатки, виконаних за допомогою аналітичної моделі для товстолистового стану 3200 заводу Trumetal розроблено технологію виробництва прокату товщиною 4 мм зі слябу товщиною 220 мм, замість слябу 150 мм. При розробці технології досягнуто зменшення кількості проходів з 15 до 13 за рахунок зменшення часу пауз між проходами, що призвело до збереження температури та зниження сили прокатки. Розроблена технологія забезпечує отримання температури закінчення чистової прокатки не нижче 820 °С, що дозволяє надалі виробляти прокат по гарячекатанам, нормалізувальним та термомеханічним режимам.

---

## РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ, ЗАСВОЄННЯ НОВОГО СОРТАМЕНТУ, ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СТРАТЕГІЇ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ В УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ

---

### **7.1 Оцінка сучасних та перспективних вимог до виробництва прокатної продукції, аналіз додаткових вимог**

Як відомо, вимоги до виробництва прокатної продукції, в тому числі і той, що виробляється за режимами ТМСП, у всьому світі регламентовані різноманітними нормативними документами, такими як ДСТУ, EN, ISO, ASTM/ASME, API, CAN, IS, JIS, SAE, Правилами класифікаційних товариств (RINA, IRS, BV, ABS, LR, DNV GL, PCY) та іншими. На підставі цих документів формуються первинні вимоги до способу виробництва та якості продукції.

Але останнім часом, вимоги, що регламентовані нормативними документами є недостатніми для споживачів/Замовників. Для виробників прокатної продукції актуальним стає термін – «додаткові вимоги Замовників», далі додаткові вимоги. Цей термін неможна плутати з додатковими вимогами, що прописані в стандартах та є їх невід’ємною частиною, коли Замовник, відповідно до кінцевого призначення продукції вибирає додаткові параметри якості, що прописані в документі.

Додаткові вимоги, це більш жорсткі вимоги, в порівнянні з відповідним стандартом, що стосуються якості готової продукції.

Під якістю продукції слід розуміти вимоги до хімічного складу, механічних властивостей, мікроструктури та геометричних

параметрів, які можуть застосовуватись всі разом або окремо в залежності від вимог.

Підставою для появи цих додаткових вимог є два фактори:

1. Конкурентна якість продукції, яка є на ринку на підставі якої Замовник формує для себе очікуваний рівень якості.

2. Високі технічні можливості конкурентних виробників, які дозволяють отримувати рівень якості, що перевищує вимоги нормативних документів.

Розглянемо на прикладах додаткові вимоги Замовників до деяких видів продукції прокатного виробництва.

Порівняння вимог Замовника з вимогами стандартів EN 10025-2 та EN 10051 на прикладі виробництва гарячекатаних рулонів з марки сталі S355JO, шириною 1320 мм, табл. 7.1–7.4.

Додаткові вимоги становлять  $\frac{1}{4}$  від вимог стандарту EN 10051 щодо граничних відхилень по товщині (див. табл. 7.1).

**Таблиця 7.1** – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10051 щодо граничних відхилень по товщині

Номінальна товщина, мм	Граничні відхилення по товщині при номінальній ширині, мм	
	Вимоги EN	Вимоги Замовника
$t \geq 2$	$\pm 0,22$	$\pm 0,055$
$2,00 < t \leq 2,50$	$\pm 0,24$	$\pm 0,060$
$2,50 < t \leq 3,00$	$\pm 0,25$	$\pm 0,063$
$3,00 < t \leq 4,00$	$\pm 0,28$	$\pm 0,070$
$4,00 < t \leq 5,00$	$\pm 0,30$	$\pm 0,075$
$5,00 < t \leq 6,00$	$\pm 0,32$	$\pm 0,080$
$6,00 < t \leq 8,00$	$\pm 0,35$	$\pm 0,088$
$8,00 < t \leq 10,00$	$\pm 0,38$	$\pm 0,095$
$10,00 < t \leq 12,50$	$\pm 0,41$	$\pm 0,103$
$12,50 < t \leq 15,00$	$\pm 0,44$	$\pm 0,110$
$15,00 < t \leq 25,00$	$\pm 0,48$	$\pm 0,120$

Додаткові вимоги Замовника є жорсткішими на 40% від вимог стандарту EN 10051 щодо граничних відхилень по ширині (див. табл. 7.2).

**Таблиця 7.2** – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10051 щодо граничних відхилень по ширині

Номінальна ширина, мм	Граничні відхилення по ширині для необрізаної крайки, мм	
	Вимоги EN	Вимоги Замовника
1200 < w ≤ 1850	-0/+20	-0/+12

Застосування Замовниками, що споживають гарячекатані рулони, додаткових вимог до площинності, які, згідно зі стандартом, використовуються тільки при замовленні поставки в листах (див. табл. 7.3).

**Таблиця 7.3** – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10051 щодо граничних відхилень від площинності

Номінальна ширина, мм	Граничні відхилення від площинності, мм		
	Вимоги EN (для листів)	Вимоги EN (для рулонів)	Вимоги Замовника
1200 < w ≤ 1500	23	–	23

Додаткові вимоги Замовника щодо вмісту шкідливих домішок у хімічному складі є жорсткішим до 4-х разів від вимог стандарту EN 10025-2 (див. табл. 7.4).

**Таблиця 7.4** – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10025-2 щодо хімічного складу продукції

Марка сталі	Кількість деяких хімічних елементів зі складу сталі, % <sup>a</sup>			
	Вимоги EN		Вимоги Замовника	
	P	S	P	S
S355JO	≥0,040	≥0,040	≥0,018	≥0,010

<sup>a</sup> кількість інших хімічних елементів згідно з вимогами стандарту EN10025-2.

Слід зазначити, що в наведених вище таблицях вказані тільки ті показники та додаткові вимоги з якими виконувалось порівняння.

Показники та вимоги, що не наведені відповідають вимогам вказаним у відповідному стандарті.

Також, окрім вимог, що вказані в стандартах, Замовники встановлюють додаткові вимоги щодо поставок комплексного сортаменту продукції, тобто без поставок одного сортаменту інший сортамент також не замовляється.

Додаткові вимоги Замовників до сортаменту гарячекатаних рулонів, що є часткою комплексного сортаменту наведені в табл. 7.5.

Вимоги, що вказані в табл. 7.5 не пов'язані між собою, так як залежать від багатьох інших технологічних факторів, наприклад вага залежить від ширини, що замовляється, товщина рулонів має обмеження від категорії міцності сталі по стандарту у відповідності з яким виробляється.

**Таблиця 7.5** – Додаткові вимоги Замовників до сортаменту гарячекатаних рулонів

Параметр якості	Значення параметра	
	поточні вимоги	перспективні вимоги
Вага гарячекатаних рулонів, т	≥32	≥35
Мінімальна товщина, мм	1,2	0,8
Цільова марка сталі, що виробляється (категорія міцності)	S460MC*	S960MC <sup>a</sup>
Якість поверхні	зменшення кількості повітряної окалини	зменшення кількості повітряної окалини

<sup>a</sup> марка сталі вказана у відповідності з вимогами стандарту EN 10149-2.

Порівняння додаткових вимог Замовника з вимогами стандарту API-5L на прикладі виробництва гарячекатаного товстолистового прокату для подальшого виробництва електрозварних труб зі сталі категорії міцності X70, товщиною 18,7 мм, шириною 2390 мм, довжиною 12000 мм наведено в табл. 7.6–7.8.

Замовники суттєво обмежують мінусові допуски по товщині та довжині товстолистової продукції, а також жорстко регламентують вимоги до мікроструктури прокату (див. табл. 7.6).

**Таблиця 7.6** – Додаткові вимоги Замовників щодо розмірів та мікроструктури продукції

Параметр якості	Значення параметра	
	вимоги API-5L	вимоги Замовників по поточних проскатах
Допуски по товщині стінки труби, мм	±1,5	-0,6/+1,3
Допуски по довжині труб, мм	4270–13720 (мінімальна середня 10670)	12000–12025
Мікроструктура	дрібнозерниста	голчастий ферит; ферито-перлітна або ферито-бейнітна з зерном не більш ніж 9 бал

Замовниками обмежений хімічний склад, особливо вміст шкідливих домішок (див. табл. 7.7).

**Таблиця 7.7** – Додаткові вимоги Замовників щодо хімічного складу продукції

Хімічний елемент	Вміст хімічного елементу, %	
	вимоги API-5L (рівень PSL-2)	вимоги Замовників по поточних проскатах
C	≥0,12	≥0,09
Si	≥0,45	≥0,35
Mn	≥1,70	≥1,65
P	≥0,025	≥0,020
S	≥0,015	≥0,005
V	сума елементів ≥0,15	≥0,080
Nb		≥0,110
Ti		≥0,025
Cu	≥0,50	≥0,35
Ni	≥0,50	≥0,30
Cr	≥0,50	≥0,30
Mo	≥0,50	–
B	≥0,001	≥0,0005
CEPW	≥0,43	≥0,42
CEPcm	≥0,25	≥0,23

Звуження границь механічних властивостей та значне підвищення вимог по окремих показниках, що вимагають Замовники (див. табл. 7.8).

**Таблиця 7.8** – Додаткові вимоги Замовників щодо механічних властивостей

Параметр якості	Значення параметра <sup>a</sup>	
	вимоги API-5L (рівень PSL-2)	вимоги Замовників по поточних проєктах
Границя плинності, $\sigma$ , МПа	485–635	$\geq 490$
Тимчасовий опір, $\sigma_b$ , МПа	570–760	565–685
Коефіцієнт $\sigma/\sigma_b$	$\geq 0,93$	$\geq 0,90$
Поглинена енергія, $Kv_0$ , Дж	$\geq 27$	$\geq 150$ (температура випробувань $-20\text{ }^\circ\text{C}$ )
Випробування падаючим вантажем при температурі $0\text{ }^\circ\text{C}$ , %	$\geq 85$	$\geq 85$

<sup>a</sup> При порівнянні не враховано ефект Баушингера, який закладено у вимоги Замовника.

Також до товстостішого прокату поширено застосовуються вимоги по площинності та можливості виробництва підвищених категорій міцності, табл. 7.9.

**Таблиця 7.9** – Додаткові вимоги Замовників до сортаменту товстостішого прокату

Параметр якості	Значення параметра	
	поточні вимоги	перспективні вимоги
Площинність, мм/м довжини, мм	$\geq 10$	$\geq 3$
Допуск по товщині	$\frac{1}{2}$ від вимог стандартів	$\frac{1}{4}$ від вимог стандартів
Мінімальна товщина, мм	6	4
Цільова марка сталі, що виробляється (категорія міцності)	X70M <sup>a</sup>	X120M*

<sup>a</sup> марка сталі вказана у відповідності з вимогами стандарту API-5L.

Вимоги, що вказані в табл. 7.9 не пов'язані між собою, так як залежать від багатьох інших технологічних факторів, наприклад

вимоги до площинності розповсюджуються на товстолистовий прокат, що застосовується для подальшого виготовлення плоских виробів/деталей, вимоги до зменшення допусків по товщині здебільшого стосуються сортаменту конструкційного прокату з метою зменшення ваги конструкцій та підвищення їх точності, зменшення мінімальної товщини прокату, що виробляється на товстолистових станах до 4 мм є бажанням Замовників отримувати прокат шириною більшою ніж можна зробити на більшості станів безперервної прокатки.

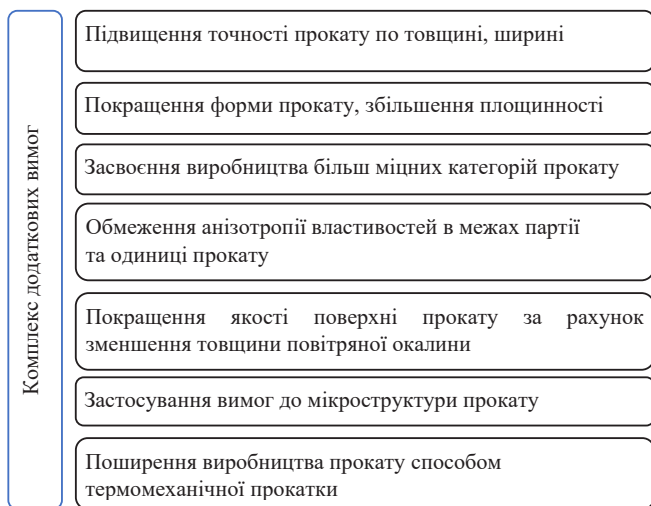
Слід зазначити, що вказані вимоги є актуальними на теперішній час, але високі темпи розвитку техніки, технології, вдосконалення виробничого устаткування та конкурентна боротьба за Замовників вже у найближчий час можуть підвищити вимоги до гарячекатаних рулонів та товстолистого прокату (див. табл. 7.5, 7.9), тим паче, що приклади виробництва такої продукції в світі вже є [51].

Таким чином ми бачимо, що в залежності від кінцевого призначення продукції, вимоги Замовників стосуються різних параметрів якості. Але всі ці параметри можна об'єднати в групи з метою отримання комплексу напрямків по яких формуються підвищені вимоги, рис. 7.1.

Загальне зміння вимог до виробництва прокатної продукції вітчизняними виробниками має декілька етапів, які пов'язані з переходом від виробництва по ГОСТ до засвоєння продукції по зарубіжним стандартам та подальшим збільшенням частки реалізації продукції на експорт. За 2018 рік частка прокатної продукції, що була експортована сягає 43,9 % (по даним ДП «ДЕРЖЗОВНІШІНФОРМ» та УКРІНФОРМ). Також слід враховувати поступову гармонізацію вітчизняних стандартів зі стандартами Євросоюзу відповідно до закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» від 15.01.2015 р.

Таким чином йде поступове вирівнювання вимог до продукції та пропозиції щодо сортаменту, який може бути вироблений на вітчизняних підприємствах.

Аналіз зміння вимог до гарячекатаної рулонної та товстолистової продукції по вказаних етапах зроблено на прикладі виробництва найпоширенішого сортаменту та аналогів марок сталі, табл. 7.10–7.11.



**Рисунок 7.1** – Комплекс додаткових вимог Замовників щодо гарячекатаного рулонного та товстолистого прокату

Таким чином, при майже однаковому рівні вимог ГОСТ та EN для аналогічного товстолистого прокату, що є базовим для виробництва, поточні додаткові вимоги Замовників до сортаменту, вмісту шкідливих домішок та вимоги до суцільності суттєво відрізняються. Ця тенденція свідчить про подальше посилення вимог до виробництва не тільки базового, а і всього сортаменту товстолистого прокату.

**Таблиця 7.10** – Змінення вимог до товстолистого гарячекатаного прокату

Параметр якості	Значення параметра		
	Вимоги ГОСТ	Вимоги EN	Поточні вимоги Замовників
1	2	3	4
Гарячекатаний товстолистий прокат з базової марки сталі СтЗсп, розмірами 16 × 2560 × 12000 мм, крайка обрізана			
Базовий нормативний документ	ГОСТ 14637 ГОСТ 19903 ГОСТ 380	EN 10025–2 EN 10029	EN 10025–2 EN 10029

Продовження таблиці 7.10

1	2	3	4
Базова марка сталі-аналога	Ст3сп	S235JO	S235JO
Вимоги до сортаменту			
Допуски по товщині, мм	+1,0/-0,8	+1,0/-0,6 <sup>a</sup>	½ від вимог
Допуски по ширині, мм	+15	+20	+20
Допуски по довжині, мм	+35	+75	+75
Серповидність, мм	≤10 мм/3 м	–	–
Площинність, мм	покращена 10 мм/1 м	7 мм/1 м <sup>b</sup>	3 мм/1 м <sup>c</sup>
Хімічний склад, %			
C	0,14–0,22	≤0,17	≤0,17
Mn	0,40–0,65	≤1,40	≤1,40
Si	0,15–0,30	–	–
S	0,050	≤0,030	≤0,010
P	0,040	≤0,030	≤0,018
Cr	≤0,30	–	–
Ni	≤0,30	–	–
Cu	≤0,30	≤0,55	≤0,55
N	≤0,010	≤0,012	≤0,012
As	≤0,080	–	–
Вуглецевий еквівалент, CEV, %	–	0,35	0,35
Механічні властивості			
Тимчасовий опір, МПа	370–480	360–510	360–510
Границя плинності, МПа	≥245	≥235	≥235
Відносне видовження, %	≥26	≥24	≥24
Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>			
температура випробувань +20 °С	≥69		
температура випробувань –20 °С	≥29		
після механічного старіння	≥29		
Ударна в'язкість, КСV, Дж/см <sup>2</sup>			
температура випробувань +20 °С	≥34		

## Продовження таблиці 7.10

1	2	3	4
Робота удару, КВ, Дж			
температура випробувань 0 °С		≥27	≥27
Норми суцільності	Зкл по ГОСТ 22727	S0; E0 по EN 10160	S1; E1 по EN 10160

<sup>a</sup> вимоги до Класу А; <sup>b</sup> нормальні відхилення від площинності; <sup>c</sup> спеціальні відхилення від площинності.

Таблиця 7.11 – Зміння вимог до гарячекатаного рулонного прокату

Параметр якості	Значення параметра		
	Вимоги ГОСТ	Вимоги ASTM	Поточні вимоги Замовників
1	2	3	4
Гарячекатаний товстолистовий прокат з базової марки сталі СтЗсп, розмірами 2,5 × 1250 мм, крайка не обрізана			
Базовий нормативний документ	ГОСТ 16523 ГОСТ 19903 ГОСТ 1050	ASTM A1011/A1011M ASTM A568/A568M	ASTM A1011/A1011M ASTM A568/A568M
Базова марка сталі-аналога	08пс (К270В)	CS Type B	CS Type B
Вимоги до сортаменту	–	–	–
Допуски по товщині, мм	±0,20 <sup>a</sup>	-0/+0,26	½ від вимог
Допуски по ширині, мм	+30	+32	+32
Серповидність, мм	–	≤25 мм/ 6000 мм	≤25 мм/6000 мм
Телескопічність, мм	100	–	20
Площинність, мм	–	–	45 мм <sup>b</sup>
Хімічний склад, %	–	–	–
C	0,05–0,11	0,02–0,15	0,02–0,15
Mn	0,35–0,65	≤0,60	≤0,60
Si	0,05–0,17	–	–
S	0,035	≤0,035	≤0,010
P	0,030	≤0,030	≤0,018

Продовження таблиці 7.11

1	2	3	4
Cr	≤0,10	≤0,15	≤0,15
Ni	≤0,30	≤0,20	≤0,20
Cu	≤0,30	≤0,20	≤0,20
Mo	–	≤0,06	≤0,06
V	–	≤0,008	≤0,008
Sb	–	≤0,008	≤0,008
Ti	–	≤0,025	≤0,025
As	≤0,080	–	–
Механічні властивості			
Тимчасовий опір, МПа	270–410	–	–
Границя плинності, МПа	–	205–340	205–340
Відносне видов- ження, %	≥26	≥25	≥25

<sup>a</sup> нормальна точність; <sup>b</sup> нормальні відхилення від площинності.

Таким чином, при схожих вимогах ГОСТ та ASTM, для аналогічного рулонного прокату, що є базовим для виробництва, поточні вимоги Замовників до сортаменту та вмісту шкідливих домішок суттєво відрізняються. Особливо слід зазначити вимоги Замовників щодо площинності та телескопічності прокату в рулонах, які не регламентуються нормативами ASTM, а площинність застосовується тільки для поставки продукції в листах. Ця тенденція свідчить про подальше посилення вимог Замовників до виробництва всього сортаменту рулонного прокату.

Окремо, слід зазначити, що такий стан справ з вимогами Замовників є цілеспрямованим на продукцію Українських виробників. Це пов'язано з поточною якістю продукції та станом існуючого устаткування. Введення додаткових вимог дозволяє Замовнику наближувати якість продукції, яка поставляється з України, до рівня якості продукції відповідних світових виробників.

Таким чином, застосування додаткових вимог Замовниками до продукції, що поставляється з України, дозволяє вітчизняним

виробниками оцінити поточний рівень якості продукції, встановити цільовий рівень якості, а також розробити технологічну стратегію розвитку та модернізації своїх підприємств.

## **7.2 Розвиток системних підходів до превентивного керування якістю термомеханічного прокату. Методологія керування якістю**

Якість продукції – це сукупність властивостей продукції, які обумовлюють її придатність задовольнити певні потреби відповідно до призначення.

Для повноцінного функціонування та досягнення розвитку підприємства/компанії, система якості, відповідно до вимог стандартів ISO 9000 [258] та ISO 9001 [259], повинна бути впроваджена на всіх процесних ділянках, починаючи від постачання сировини, в тому числі включаючи роботу з постачальниками, обслуговування устаткування і закінчуючи процесами роботи з Замовниками-споживачами продукції.

Історично склалося, що система якості на вітчизняних підприємствах працює тільки у сфері технології. Задіяння системи якості в інших сферах, що контактують з технологією є формальним. Слід зазначити, що система якості на підприємстві це не тільки підтвердуючі документи по всіх процесах, це комплексна система, яка повинна працювати на досягнення загальної мети підприємства.

Поєднання системи якості ISO 9001 з інструментами системи ощадливого виробництва Lean (Lean – проривний підхід до менеджменту і керування якістю, який забезпечує довготривалу конкурентоздатність без істотних капіталовкладень. Lean або Ощадливе виробництво – це система організації і управління розробленням продукції, виробництвом, взаємовідношеннями з постачальниками і споживачами, коли продукція виготовляється у точній відповідності із запитами споживачів і з меншими втратами) дозволить отримати найкращий сукупний результат [260, 261].

Мета також повинна бути формалізованої згідно з принципами SMART (Specific, Measurable, Attainable, Relevant, Time-bound – конкретна, вимірювана, досяжна, доцільна, обмежена в часі).

Для моніторингу стану та безперервного поліпшування системи якості, серед інших можуть бути використані такі інструменти аналізу, які поширено використовуються в Lean системі та в методах статистичної обробки:

- бенчмаркінг – система порівняння показників, результатів, параметрів якості тощо з аналогічними виробництвами, виробниками з метою пошуку найкращого досвіду;

- діаграма Ішикави (риб'яча кістка) – графічний спосіб дослідження та визначення найбільш суттєвих причинно-наслідкових взаємозв'язків між чинниками (факторами) та наслідками у досліджуваній ситуації чи проблемі;

- Принцип Парето – емпіричне правило, яке стверджує, що для багатьох явищ 80 відсотків наслідків спричинені 20 відсотками причин.

Одним з формалізованих процесних підходів в стандарті ISO 9001 редакції 2015 року є ризик-орієнтоване мислення, яке дає змогу організації визначати чинники, які можуть спричинити відхилення її процесів та системи управління якістю від запланованих результатів, щоб установлювати запобіжні заходи контролю для унайменшення негативних впливів і якнайбільшого використання можливостей, у міру їх виникнення.

Згідно зі стандартом Системи, необхідно розробляти дії стосовно ризиків для запобігання небажаним ефектам. Безумовно, базою для обробки та створення критеріїв контролю є інформація по вже виробленій продукції та результатах контролю її якості, як безпосередньо на підприємстві, так і в умовах використання у Замовників. Організація повинна планувати у якій спосіб інтегрувати та запровадити дії до процесів її системи управління якістю, та оцінювати їх результативність. Тобто повинен працювати цикл Демінга, або цикл PDCA – планууй (Plan), роби (Do), перевіряй (Check), впливай (Act), який працює і у всій загальній системі якості. Таким чином, дискретні процеси системи повинні працювати таким самим чином, що і загальна система.

Потрібно, щоб дії, які виконуються стосовно ризиків і можливостей, були пропорційні їх потенційному впливу на відповідність продукції [259]. Треба розуміти, що дією не може бути розірвання подальшої взаємодії з клієнтом якому поставлена продукція невідповідної якості, так як ця дія не змінить якості самої продукції.

Кожне підприємство будує свою систему якості, яка враховує особливості його устрою та виробництва [262–265]. На сучасних підприємствах поширено застосовуються різноманітні системи превентивного керування якістю, та методи контролю [266], які спрямовані на попередження появи продукції невідповідної якості. Умовами здійснення термомеханічного процесу прокатки, серед інших, є підвищений контроль технологічних параметрів. Для превентивного керування показниками якості термомеханічного прокату, які є більш чутливими до стабільності технологічного процесу запропоновано впровадження підходу ризик-орієнтовного мислення в технологічному процесі виробництва – методологію керування якістю.

Для здійснення контролю процесу виробництва та забезпечення якості прокатної продукції необхідно встановлення та керування відповідними технологічними показниками.

#### Встановлення показників

Технологічні показники, що впливають на параметри якості (також можуть встановлюватись і інші показники, при необхідності), які необхідно контролювати, можна встановити наступними способами:

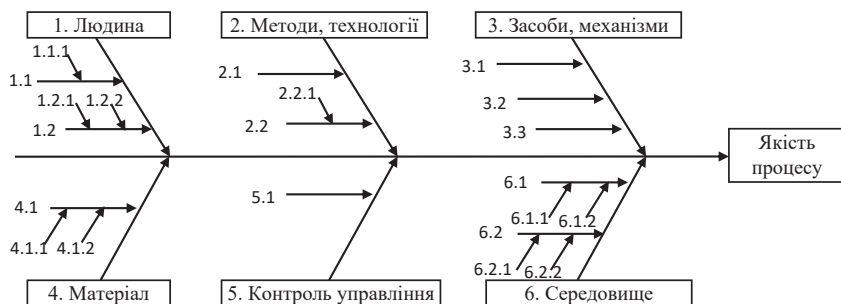
– Встановлення вже відомих показників які вказані в технологічних інструкціях, документації тощо.

– Встановлення показників за допомогою діаграми Ішикави, рис 7.2.

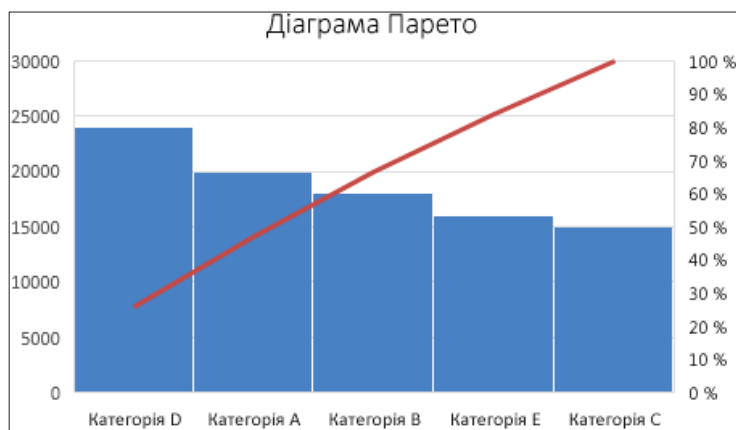
Встановлення показників може бути загалом для комплексу параметрів якості, або для окремих параметрів/груп параметрів якості. Також для первинного встановлення показників може бути використано результати бенчмаркінгу по аналогічних виробництвах, якщо такі дані є відкритими.

Перелік показників може бути нескінченно великим. Тому у деяких випадках можливо та необхідно контролювати тільки

показники, які є дійсно значущими. Визначення переліку значущих показників, які впливають на якість продукції, можливо за допомогою методу Парето, рис. 7.3. Безумовно, для встановлення значущості необхідно мати масив з факторів.



**Рисунок 7.2** – Діаграма Ішикави в загальному вигляді



**Рисунок 7.3** – Діаграма Парето в загальному вигляді

### *Визначення значень показників*

Значення технологічних показників можуть встановлюватись безпосередньо на підставі аналізу виробництва аналогічної продукції, на підставі статистичної обробки наявної інформації, наукових

досліджень, по літературних джерелах та іншими технологічними або статистичними способами.

#### *Накопичення статистичної інформації*

При виробництві прокатної продукції необхідно контролювати значення всіх встановлених показників, зберігати інформацію, яка надалі буде базою для обробки та вдосконалення якості продукції.

Встановлені технологічні або інші показники повинні бути об'єднані з параметрами якості продукції за допомогою системи простежування. Система простежування є обов'язковою вимогою для сучасного виробництва без якої неможливе відстежування та покращення якості.

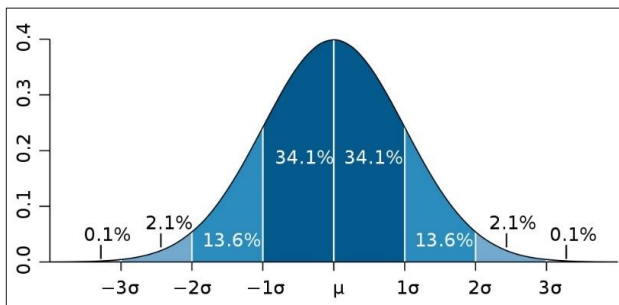
#### *Обробка накопиченої інформації*

Обробка здійснюється як багатофакторний аналіз. Кожен з параметрів якості повинен аналізуватися окремо, або в групі з параметрами аналогічного рівня. Наприклад, в групу можуть бути об'єднані всі або окремі параметри механічних властивостей, деякі параметри геометрії прокату та інші.

Першим кроком аналізу є побудова діаграм розподілу по кожному з параметрів якості з встановленням обмеження згідно з Правилами  $3\sigma$  або  $6\sigma$ , в залежності від процесу, рис. 7.4.

Слід враховувати, що встановлені обмеження повинні відповідати або бути більш жорсткими ніж обумовлені відповідними стандартами на виробництво продукції, або іншими нормативними документами.

Тобто, якщо, наприклад, згідно з розподілом, границя плинності прокату становить 235 МПа зі стандартним відхиленням



**Рисунок 7.4** – Діаграма нормального розподілу в загальному вигляді

+/- 10 МПа, а обмеження згідно з нормативним документом становить 210–255 МПа, то згідно з Правилами 3с розподіл границі плинності становить 205–265 МПа. В даному випадку встановлене обмеження не повинно перевищувати меж згідно з нормативним документом 210–255 МПа.

Якщо процес недостатньо стабільний, обмеження можуть бути встановлені на рівні вимог нормативних документів. Поступове звуження обмежень надалі буде забезпечувати підвищення стабільності процесу виробництва.

Для подальшої обробки масиву використовується тільки ті дані параметру якості, які відповідають встановленому обмеженню.

Далі, для кожного з технологічних показників які впливають на параметр якості, що безпосередньо розглядається, необхідно побудувати діаграми розподілу та встановити обмеження, які забезпечують отримання бажаного результату з якості.

Слід уникати окремого встановлення меж для взаємозалежних технологічних параметрів, а також встановлення різних меж для одного і того ж параметру, який впливає на різні показники якості.

Для встановлення обмежень, у тому числі для параметрів, що мають взаємозалежність, рекомендовано використовувати комплексні статистичні моделі, які побудовані на підставі отриманих масивів даних. Такі моделі зручно побудувати в програмних додатках типу Statistica, або в пакеті аналізу Microsoft Excel.

Останнім часом поширено використовуються кольорові маркери, які допомагають візуально оцінити стан процесу. При встановленні меж технологічних показників/параметрів, кольорові маркери можна застосувати наступним чином, рис. 7.5:

- червоний маркер встановлюють, коли технологічний показник/параметр відхиляється від меж, які забезпечують отримання параметру якості у відповідності зі стандартом;

- жовтий маркер встановлюють, коли технологічний показник/параметр відхиляється від меж, які забезпечують підвищені вимоги, встановлені в межах керування системою якості, при цьому параметр ще знаходиться у межах відповідності стандарту;

- зелений маркер встановлюють, коли технологічний параметр відповідає межам встановлених (підвищених) вимог.

Параметр якості / технологічний показник	Рівні процесу				
	порушення процесу	потребує уваги	стабільний	потребує уваги	порушення процесу
Границя плинності, МПа	<210	210–214	215–250	251–255	>250
Температура закінчення прокатки, °С	<800	800–809	810–830	831–840	>840

**Рисунок 7.5** – Приклад використання кольорових маркерів для оцінки стану процесу

У залежності від поточного стану системи якості та технології, а також на початкових стадіях формування технології, можуть встановлюватись тільки червоний та зелений маркери.

Слід зазначити, що такий підхід допомагає не тільки стабілізувати технологічний процес та підвищити якість продукції, а ще дає можливість знизити витрати на виробництво, в межах поєднання систем ISO та Lean, через застосування обмежень отримання надвисоких рівнів параметрів якості. Наприклад стабільне утримання механічних властивостей прокату на середньому рівні вимог дозволяє економити мікролегуючі елементи.

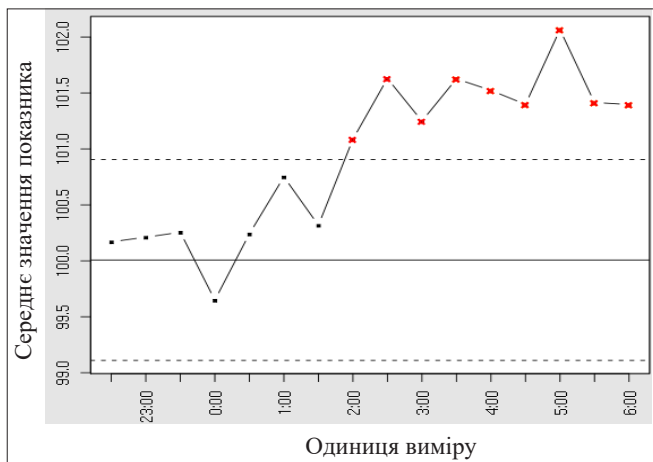
#### *Відстежування результату, карти Шухарта*

Відстежування результату та контроль за дотриманням встановлених обмежень по технологічних параметрах необхідно здійснювати за допомогою будь яких зручних способів, існуючих на підприємстві.

Це може бути безпосередній контроль співробітником відділу контролю якості на місці фіксації параметру, за допомогою системи візуалізації (контролю) технологічних параметрів, або за допомогою автоматичної системи контролю технологічного процесу.

Одним з найвідоміших способів аналізу результатів відстежування стабільності процесу є контрольні карти Шухарта [266], які являють собою графік зміни параметрів вибірки, зазвичай середнього значення і стандартного відхилення, який розраховується в процесі накопичування даних, рис. 7.6.

При перевищенні допустимого рівня відхилення, або при попаданні показника в жовте чи червоне поле, технологічним персоналом виконуються дії по забезпеченню входження показника



**Рисунок 7.6** – Контрольна карта Шухарта в загальному вигляді

в необхідні межі/зелене поле. Одиницю продукції, партію або інше, що вироблено за межами зеленого поля повинно бути відстежено окремо.

*Прийняття рішення по продукції, що вироблена з відхиленнями*

Отримання інформації по відхиленням дозволяє керувати подальшою долею такої продукції відповідно до вимог п. 8.6 та 8.7 ISO 9001 [259].

Продукція, що виробляється партією, при виробництві кожної одиниці якої, всі показники знаходяться в межах зеленого маркера вважається відповідною.

Продукція, що виробляється партією, при виробництві якої, по окремих одиницях продукції є показники, які знаходяться в межах жовтого маркера призначається на додатковий контроль якості. Додатковому контролю/випробуванням піддаються одиниці продукції з показниками в межах жовтого маркера. Продукція з жовтими маркерами вважається відповідною тільки після підтвердження по результатах додаткового контролю. Цей метод може застосовуватись аж до поштучного контролю продукції, якщо це не заперечує Замовник.

Продукція, що виробляється партією, при виробництві якої, по окремих одиницях є показники, які знаходяться в межах червоного маркеру, якщо це не узгоджено з Замовником, вважається невідповідною та переводиться в нижчу якість або брак.

Партія прокату може містити набір одиниць продукції з комбінацією будь яких маркерів, якщо це узгоджено із Замовником, або відокремлюватися в різні партії відповідно до маркерів.

При виробництві нової продукції, базовими межами технологічних параметрів можуть бути параметри аналогів цієї продукції, якщо така є. Загалом, запропонована методика застосовується для продукції, яка пройшла стадію засвоєння та виробляється в промислових об'ємах.

Запропонований принцип може бути застосовано для компаній-партнерів, які займаються наданням продукції підприємства-виробника додаткової доданої вартості (наприклад додаткова обробка поверхні прокату), у разі якщо кінцевий продукт реалізує підприємство-виробник або афілійовані з ним компанії, для обробки інформації про якість продукції по даних наданих Замовниками.

Таким чином, методологія керування якістю, яка передбачає встановлення, визначення значень технологічних показників, які впливають на якість продукції, їх контроль, накопичення, обробка та механізми покращення, як окремий елемент Системи якості, підпорядкована циклу PDCA, та є підтвердженням невід'ємності Системи якості загалом та окремих її елементів.

Період оновлення циклу PDCA може відрізнитися для різних продуктів. Встановлення періоду оновлення даних може бути стаціонарним або динамічним.

Стаціонарним або періодом за планом є встановлення періодичності оновлення для конкретного виду продукції в залежності від об'єму виробництва, наприклад кожні 50 тис. т, або в залежності від часу виробництва, наприклад кожного місяця або кожного кварталу.

Динамічний або оперативний період оновлення застосовується для конкретного виду продукції або сортаменту та може бути розділений по наступних принципах:

– оновлення циклу при перевищення встановленої межі по невідповідній продукції, наприклад 3 %;

– оновлення циклу при перевищенні встановленої межі по кількості показників, що попали в межу жовтого та/або червоного маркерів;

– оновлення циклу при перевищенні встановленої межі по кількості продукції, що потребує додаткового контролю, наприклад більш ніж 10 %.

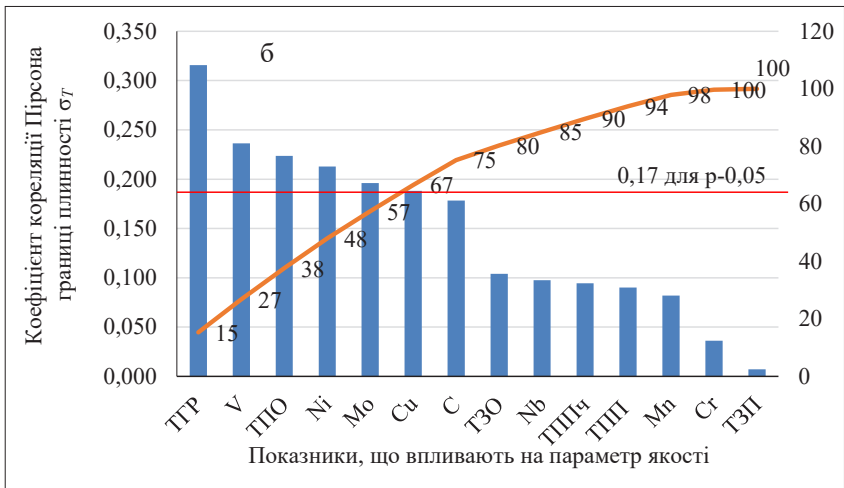
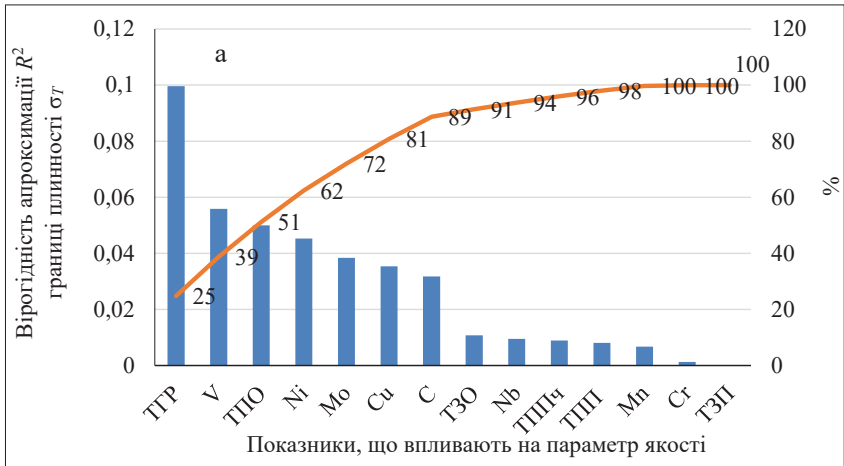
Виконання циклу тісно пов'язане з технологією, так як для покращення якості безперервно виконується моніторинг і аналіз показників та корегується технологія. Технологічна інформація, що використовується та результати її обробки є частиною загальної «Бази знань» підприємства.

Розглянемо застосування розробленої методології для встановлення поточного рівня якості та напрямків для покращення таких показників як границя плинності  $\sigma_T$ , тимчасовий опір  $\sigma_B$  та відносне видовження  $\delta$ , при виробництві товстостісового прокату зі сталі марки К60, товщиною 14 мм, що вироблявся по режимах термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» в період червень-квітень 2017 року.

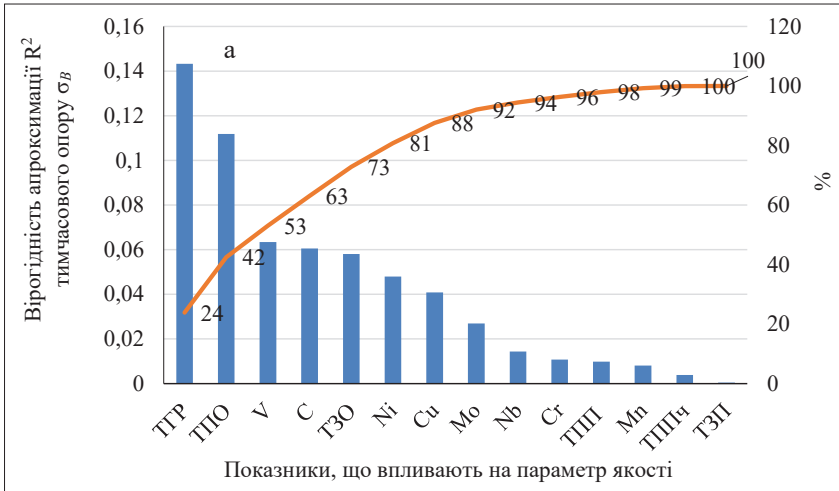
Перелік показників, які впливають на рівень параметрів якості – границя плинності, тимчасовий опір та відносне видовження візьмемо з технологічної документації комбінату. Серед показників – хімічний склад сталі з такими елементами, які впливають на механічні характеристики (С, Мп, Nb, V, Мо, Сг, Ni, Cu), технологічні параметри: температура початку прокатки в чорновій кліті (ТППч), температура початку другої стадії прокатки в чорновій кліті, яка обумовлена початком гальмування рекристалізації (ТГР), температура початку та закінчення прокатки в чистовій кліті (ТПП, ТЗП), температура металу на початку та на закінченні прискороного охолодження в установці УКО (ТПО, ТЗО).

Для визначення показників, які впливають на параметри якості, що досліджуються, з усього вказаного переліку показників, побудуємо діаграми Парето по кожному з параметрів, рис. 7.7–7.9.

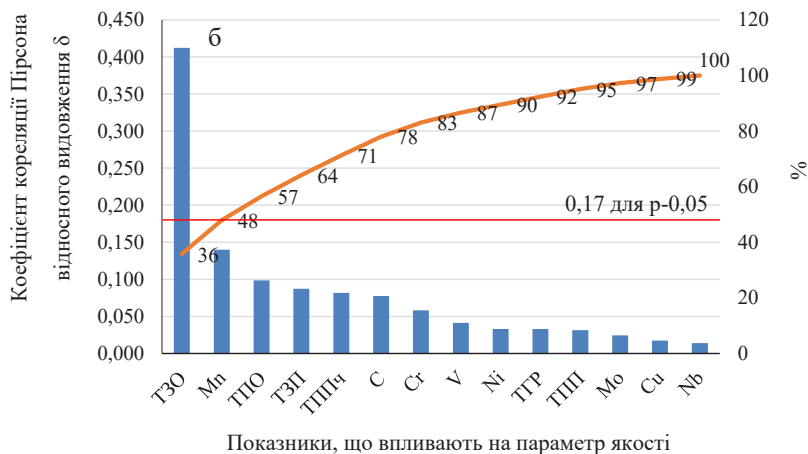
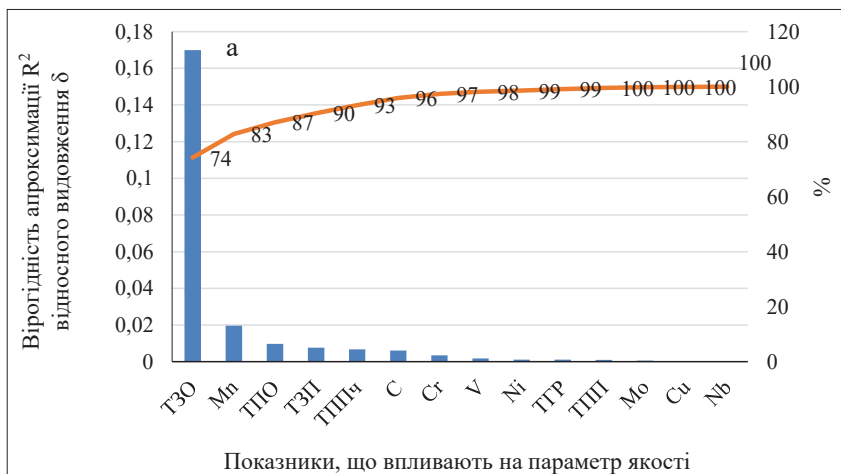
Підставою для побудови діаграм Парето є величина вірогідності апроксимації  $R^2$  та величина коефіцієнту кореляції Пірсона (по модулю), які отримані при визначенні залежності між кожним показником та параметром якості.



**Рисунок 7.7** – Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнта кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на границю плинності прокату зі сталі марки К60



**Рисунок 7.8** – Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнта кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на тимчасовий опір прокату зі сталі марки К60



**Рисунок 7.9** – Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнта кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на відносне видовження прокату зі сталі марки К60

Для масиву, що використовувався в розрахунках, критичне значення кореляції Пірсона становить 0,17, для рівня значимості 0,05. Показники, коефіцієнт кореляції Пірсона яких до відповідного параметру якості є меншим за 0,17, не є значимими.

Таким чином, показники, які по результатах статистичної обробки даних є значимі наведені в табл. 7.12.

**Таблиця 7.12** – Показники, які є значимі при визначенні відповідного параметра якості

Показник	Значення кореляції Пірсона по параметрах якості		
	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$
ТГР	0,316	0,379	–
V	0,236	0,252	–
ТПО	–0,224	–0,334	–
Ni	–0,213	–0,219	–
Mo	–0,196	–	–
Cu	–0,188	–0,202	–
C	0,178	0,246	–
ТЗО	–	–0,241	0,412

У таблиці 7.12, знак «←» встановлено у відповідності зі знаком в отриманих залежностях.

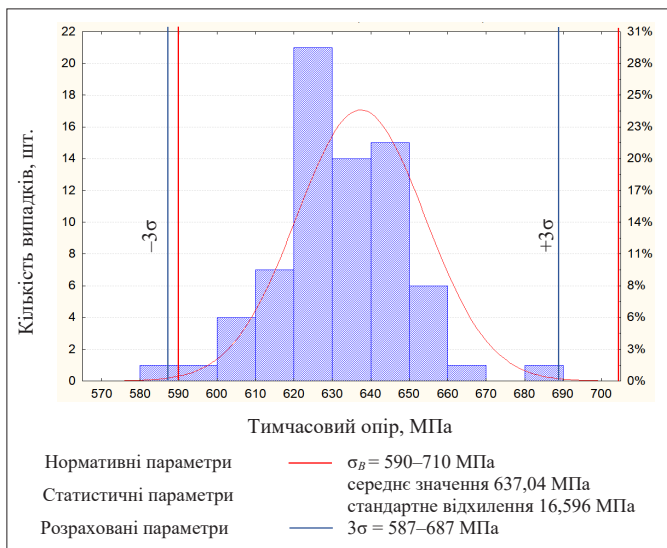
Надалі, дії щодо процесів покращення якості будуть розроблятися тільки для значимих показників.

Незначимі показники залишаються на рівні, який наразі встановлено технологією. Будемо діаграми розподілу по параметрах якості, які розглядаються, для встановлення поточного стану технології виробництва прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60 на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», рис. 7.10–7.12.

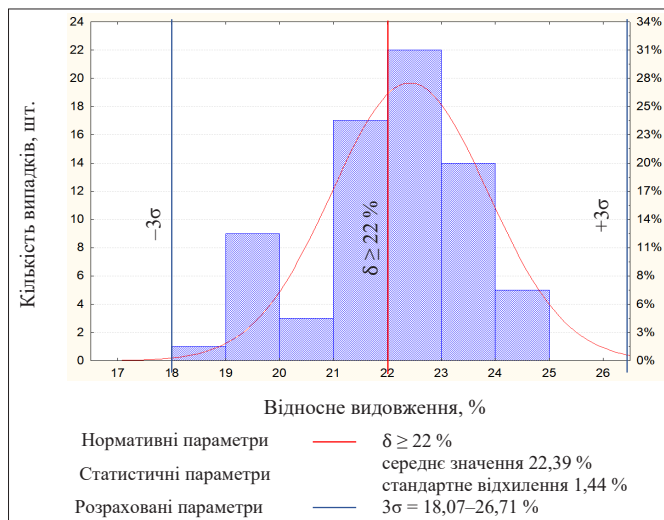
Згідно з діаграмами розподілу (див. рис. 7.10–7.12), маємо наступний стан якості прокату, що досліджується:

– розподіл границі плинності має випадки отримання нижчого за нормативний рівень та граничних з мінімальними нормативними рівнями вимог. Загальний розподіл зміщений до нижнього рівня вимог;





**Рисунок 7.11** – Розподіл тимчасового опору прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60



**Рисунок 7.12** – Розподіл відносного видовження прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60

**Таблиця 7.13** – Встановленні обмеження показників якості

Параметр якості / технологічний показник	Рівні процесу				
	порушення процесу	потребує уваги	стабільний	потребує уваги	порушення процесу
Границя плинності, МПа	<505	505–510	511–570	571–580	
Тимчасовий опір, МПа	<590	590–600	600–660	661–710	>710
Відносне видовження, %	<22	22–22,5	22,5–25	25–26	

Фільтрацію необхідно починати з найбільш нестабільного параметра, в нашому випадку це відносне видовження. Так як перелік значимих показників перетинається між параметрами якості, для всіх трьох параметрів вони будуть однакові.

При встановленні жовтого та червоного рівнів необхідно враховувати негативне або позитивне значення кореляції Пірсона, див. табл. 7.12.

Межами жовтого рівня для показників вибрані дані, які відповідають межах нормативних вимог параметрів якості.

**Таблиця 7.14** – Встановленні обмеження показників та параметрів якості до них

Параметр якості / технологічний показник	Рівні процесу				
	порушення процесу	потребує уваги	стабільний	потребує уваги	порушення процесу
Границя плинності, МПа	<505	505–510	511–570	571–580	
Тимчасовий опір, МПа	<590	590–600	600–660	661–710	>710
Відносне видовження, %	<22	22–22,4	22,5–25	25,1–26	
ТТР	<876	876–908	909–1008		>1008
V	<0,055	0,056–0,059	0,06–0,08		>0,08
ТПО	<717	718–720	721–737		>737
Ni			0–0,29		>0,29
Mo			0–0,07		>0,07
Cu			0–0,28		>0,28
C			0,08–0,11		>0,11
ТЗО	<541	542–595	596–640		>640

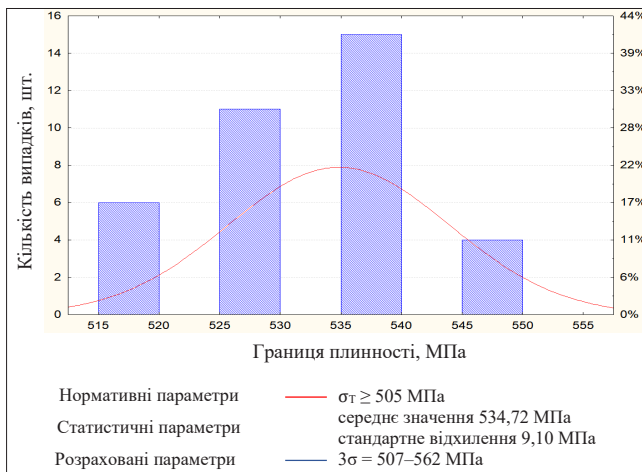
Також, важливу роль при використанні даного методу при встановленні рівнів процесу відіграє якість первинно розробленого технологічного процесу.

У даному випадку комбінатом розроблена помилкова технологія термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням, яка не дозволяє отримувати необхідні механічні властивості за допомогою охолодження, що видно по негативних кореляціях параметрів охолодження. Необхідні властивості досягаються здебільшого за допомогою параметрів процесу прокатки.

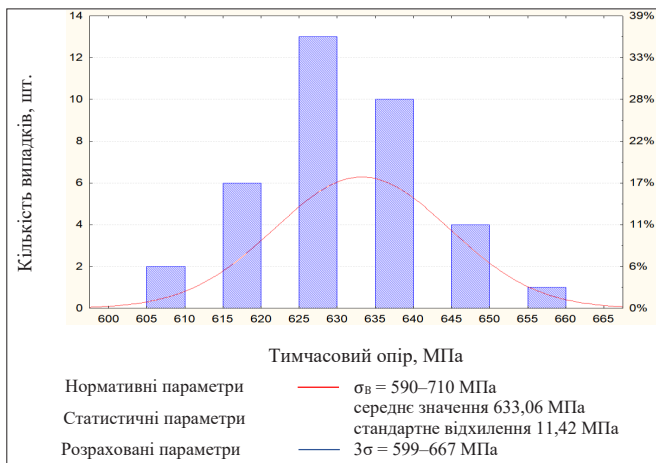
Перевагою запропонованого методу додатково є можливість виявлення помилок в розроблених технологіях.

Після встановлення необхідних рівнів технологічних показників для отримання стабільних параметрів якості, маємо наступний їх розподіл, рис. 7.13–7.15.

Таким чином, зелений рівень процесу забезпечив отримання механічних властивостей в межах нормативних вимог, при цьому зменшилося стандартне відхилення границі плинності, тимчасовому опору та відносному подовженню на 44 %, 31 % та 46 % відповідно, що свідчить про підвищення стабільності технології та отриманих результатів [267].



**Рисунок 7.13** – Розподіл границі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу



**Рисунок 7.14** – Розподіл тимчасового опору прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу



**Рисунок 7.15** – Розподіл відносного видовження прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу

Розподіл відносного видовження не є нормальним, та після впровадження відповідних змін в технологію, його результати повинні стабілізуватися.

Таким чином, в межах превентивного керування якістю вперше запропоновано та формалізовано методологію з встановлення, визначення значень технологічних показників які впливають на якість продукції, їх контроль, накопичення, обробка та механізми покращення в якій використовуються принцип Парето, 3 $\sigma$ , критерій Пірсона, та, яка спрямована на безперервне покращення якості технологічних процесів і продукції.

### **7.3 Методологія освоєння нового сортаменту**

Освоєння нового сортаменту продукції, це безперервний процес, який тісно пов'язаний із Замовником. Особливу актуальність цей процес отримує при освоєнні сортаменту, що виробляється способом термомеханічної прокатки, так як потребує виконання аналізу можливостей існуючого устаткування, визначення аналогів, статистичної обробки даних.

Мобільність компанії в процесах освоєння нових продуктів/сортаменту свідчить про рівень її розвитку.

Процес освоєння нових продуктів може бути реалізовано в умовах існуючого устаткування, або потребувати деяких технічних змінень, модернізації, реконструкції. Від цього залежать строки освоєння продуктів.

Процес освоєння нових продуктів, як окрема процедура, є одним з інструментів, який забезпечує сучасний рівень ефективності компанії, якості та продуктових пропозицій [268], та складається з наступних кроків:

#### *1. Аналіз ринку, або нова потреба/пропозиція від Замовника.*

Потреби в новому продукті можуть формуватися на підставі Технологічної стратегії, результатів опитувань та пропозицій Замовників. Після цього робиться ринковий аналіз та визначається наскільки продукт потрібен, який обсяг ринку і можливий прибуток компанії.

## *2. Техніко-економічний аналіз.*

Аналізується можливість виробництва нового сортаменту на потужностях компанії, розробляється проект технології та виконується підрахунок потреб у додатковому фінансуванні, плановий рівень собівартості прокату.

Якісно та оперативно підготувати цей розділ можливо при наявності сформованої «Бази знань».

При розробці проекту технології виконуються наступні кроки:

- статистична обробка показників якості продукції, що виробляється зараз, бенчмаркінг технології інших виробників, або використання доступних науково-дослідних матеріалів, публікацій;
- формування технологічних вимог/параметрів технології та устаткування для забезпечення параметрів якості нового продукту. При потребі в додатковому устаткуванні необхідно також вказати його цільові параметри;
- безпосередня розробка технологічного документу для виробництва дослідної партії прокату.

Слід зазначити, що у великих металургійних компаніях більше можливостей для виробництва нових продуктів, так як стадії виробництва можуть бути організовані на різних виробничих дільницях/ підприємствах. Так, наприклад, для виробництва гарячекатаної травленої штаби з низьковуглецевої сталі  $C \leq 0,05\%$  з низьким вмістом  $S \leq 0,005\%$  та  $P \leq 0,010\%$  (виробництво сталі такого рівня якості в Україні наразі можливо тільки на «МК «АЗОВСТАЛЬ»») можливо з безперервнолитих слябів які виготовлені в конвертерному цеху «МК «АЗОВСТАЛЬ», прокатані на стані 3600 до необхідних розмірів, або відредуковані на слябінгу «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», прокатані на стані 1700, а потім протравлені на агрегаті цеху холодного прокату.

Порівнюючи результати ринкового аналізу та планових економічних показників, компанія виконує техніко-економічний аналіз на підставі якого приймається рішення про доцільність освоєння нового продукту. Якщо по результатах аналізу виробництво нового продукту є ефективним, процес переходить до наступного кроку.

Почати освоювання нового продукту можливо як по узгодженню із Замовником, так і для перспективних потреб ринку коли по результатах ринкового аналізу підтверджено потенціал продукту. В останньому випадку, коли немає наявного замовлення, продукт може вироблятися як аналог вже засвоєного продукту, але з більш вищим рівнем якості, якщо це не заперечено діючим стандартом.

Наприклад, товстолистовий гарячий прокат товщиною 10 мм згідно зі стандартом EN 10149-2 марки сталі S420MC може бути виготовлено в межах виробництва сталі марки S355JO по EN 10025-2, при однакових вимогах до сортаменту, табл. 7.15. Таким чином, при узгодженні стану постачання, дослідний прокат з марки сталі S420MC згідно зі стандартом EN 10149-2 може бути вироблений в межах поточних замовлень на марку сталі S355JO згідно стандарту EN 10025-2.

Застосування такого методу дозволяє зменшити ризики при освоєнні нових продуктів у випадках коли при дослідних прокатках необхідні більш високі властивості нового прокату не були отримані. Прокат, який вироблено, завжди можна призначити по існуючому замовленню.

**Таблиця 7.15** – Порівняння вимог по стандартах для виробництва нових продуктів

Параметр якості	Значення параметра згідно зі стандартом		
	1	2	3
Нормативний документ (технічні вимоги)	EN 10149-2	EN 10025-2	
Марка сталі	S420MC	S355JO	
Стан постачання	термомеханічна прокатка	Нормалізувальна або термомеханічна прокатка	
Хімічний склад, %			
C	≤0,12	≤0,20	
Mn	≤1,60	≤1,60	
Si	≤0,50	≤0,55	
S	≤0,015	≤0,030	
P	≤0,025	≤0,025	

## Продовження таблиці 7.15

1	2	3
Cr	–	–
Ni	–	–
Cu	–	≤0,55
Mo	–	–
V	≤0,20 <sup>a</sup>	–
Nb	≤0,09 <sup>a</sup>	–
Sb	–	–
Ti	≤0,15 <sup>a</sup>	–
As	–	–
Вуглецевий еквівалент, СЕ, %	–	≤0,45
Механічні властивості		
Тимчасовий опір, МПа	480–620	470–630
Границя плинності, МПа	≥420	≥355
Відносне видовження, %	≥19	≥22

<sup>a</sup>Nb+V+Ti ≤ 0,22 %; «←» вміст елемента не регламентовано.

### 3. Підготовка виробництва нових продуктів.

На цьому етапі планується виробництво дослідної партії, розробляється остаточна технологічна документація, при необхідності, виконується забезпечення устаткуванням, інструментами, сировиною та матеріалами, феросплавами та іншим.

### 4. Виробництво дослідної партії.

Дослідна партія, це мінімальний об'єм продукту який можна виробити без втрат для виробництва. Наприклад мінімальний об'єм – одна конвертерна плавка, або одна партія вагою 60–80 т (у випадках, коли для нового продукту використовується сталь поточного виробництва, але технологічні параметри прокату відрізняються). Виробництво дослідної партії суттєво зменшує ризики як для Виробника так і для Замовника.

Виробництво дослідної партії нового продукту підпадає під вимоги Системи якості, як і вся продукція, що виробляється загалом.

Приймання дослідної партії нового продукту може здійснюватися спільно із Замовником.

Слід зазначити, що необхідний комплекс випробувань, у великих металургійних компаніях, може бути виконано в різних (розташованих на різних підприємствах) атестованих для цього випробувальних лабораторіях, або в спеціалізованих сторонніх лабораторіях.

Прикладом цього може бути випробування товстолистового прокату для труб у сірководневому виконанні, який вироблено на стані 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», в умовах спеціалізованої сірководневої лабораторії «МК «АЗОВСТАЛЬ», яка є найбільшою та найпопулярнішою на території України.

#### *5. Випробування нового продукту в умовах Замовника.*

Маркером який дозволяє зробити висновок про успішність нового продукту, є відгук Замовника. Слід зазначити, що переробка продукту Замовником може відбуватися з представниками виробника, що дозволяє оцінити якість та побачити напрямки для подальшого вдосконалення продукту.

Відгук Замовника по результатах переробки є підставою для подальшого виробництва дослідної, або вже промислової партії з урахуванням побажань Замовника, якщо такі були при переробці.

Виробництво дослідних партій, буде відбуватися доки Замовник не отримає продукт, який задовольняє всі його вимоги.

#### *6. Промислове виробництво.*

Коли технологія відпрацьована, а отримана якість задовольняє Замовника, продукт вважається засвоєним та може вироблятися в промислових об'ємах.

Освоєний продукт включається до загального переліку продуктів та може бути запропонований іншим Замовникам компанії.

Запропоновану схему функціонування Методології освоєння нового сортаменту наведено на рис. 7.16.

Продукт може надалі вдосконалюватися в залежності від вимог (індивідуальних особливостей переробки) конкретних Замовників з отриманням зворотного зв'язку.



**Рисунок 7.16** – Схема функціонування методології освоєння нового сортаменту

## 7.4 Технологічна стратегія та її реалізація

### 7.4.1 Обґрунтування вибору підприємства для реалізації технологічної стратегії

Технологічна стратегія, це є перспективний план розвитку компанії/підприємства (далі компанії), який засновано на розвитку сортаменту, що виробляється, технології, устаткуванні, змінненні питомих витрат металу та ресурсів пов'язаних з цим, який закінчується фінансовим розрахунком.

Побудова технологічної стратегії дозволяє одночасно розуміти стан в якому знаходиться компанія/підприємство та в якому напрямку треба «рухатись» для досягнення мети.

Для формування цього плану задіяні служби компанії майже по всіх напрямках: продажі, забезпечення, виробництво, технічний/технологічний, капітального будівництва та інвестиції, фінансовий.

Головною метою Технологічної стратегії є досягнення фінансового результату компанії за рахунок виконання сучасних та закладання фундаменту для засвоєння перспективних вимог ринку.

Вибір підприємства для реалізації технологічної стратегії, або розставлення пріоритетів з модернізації безумовно є керівним рішенням компанії для прийняття якого необхідно мати відповідний об'єм інженерної інформації. В даному конкретному випадку пропонується розглянути окреме виробництво продукції способом термомеханічної прокатки в межах одного з підприємств металургійної компанії МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ. Для отримання всього переліку можливостей від впровадження системи, що пропонується, необхідно розуміти існуючі та потенціальні зв'язки всередині компанії. Структура МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГУ [269] зі структурою виробництва та можливі зв'язки у загальному вигляді, в межах підприємств, що виробляють плоский прокат, наведено на рис. 7.17.

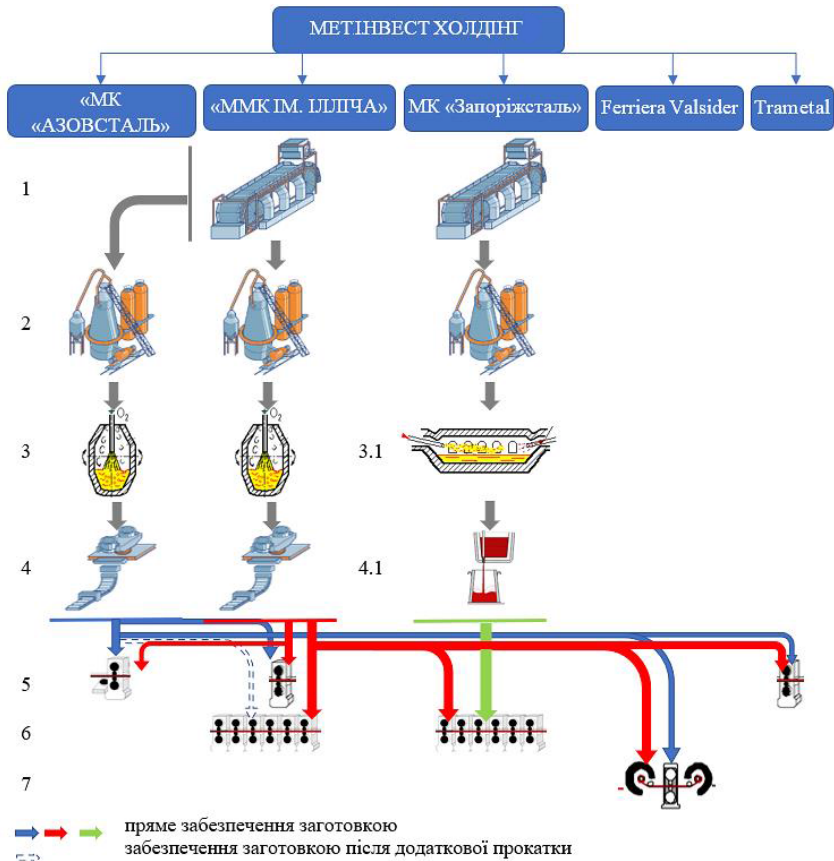
Структуру виробництв показано схематично, без врахування кількості одиниць устаткування та додаткових можливостей виробництва.

Через відносно мале виробництво, 231 тис. т/рік, завод Spartan, UK з реверсивним станом кварто 2200 в даній роботі не розглядається.

Існуюча схема виробництва компанії МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ дозволяє двом підприємствам «МК «АЗОВСТАЛЬ» та «ММК ІМЕНІ ІЛПЧА» забезпечувати якісною заготовкою у вигляді безперервнолитих слябів всі підприємства компанії, з деякими обмеженнями.

Схема забезпечення підприємств компанії слябами, які вироблені на «МК «АЗОВСТАЛЬ» вже відпрацьована.

Можливості конвертерного цеху дозволяють виробляти сляби з обробкою в ківш-печі та вакууматорі, що забезпечує вимоги Замовників щодо сортаменту та якості кінцевої продукції – прокату.



**Рисунок 7.17** – Структура виробництва компанії МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ (1) агломераційне виробництво, (2) доменне виробництво, (3) сталеплавильне виробництво, конвертерне або (3.1) мартенівське, (4) розливка сталі, безперервна або (4.1) в зливки, (5) виробництво товстолистового прокату на реверсивних станах гарячої прокатки, (6) виробництво штаб на безперервних станах гарячої прокатки, (7) виробництво штаб на стані Стеккеля та можливі зв'язки із забезпечення заготовкою між підприємствами

Сляби виробляють в товщинах 220–250–300 мм, які наразі не дозволяють використовувати їх для виробництва на безперервних станах компанії, без додаткового зменшення товщини (яке можливо через попередню прокатку слябів на стані 3600 або в кліті Слябінгу), та на товстолістовому стані 3200 заводу Grametal для виробництва відносно тонкого сортаменту, наприклад товщиною 4,0 мм.

Забезпечення підприємств компанії слябами, які вироблено на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», товщинами 150–250 мм раніше було обмежено через невідповідну якість, обумовлену станом устаткування машин безперервної розливки, відсутністю ківш-печі, використання технології хімічного підігріву Al. Зі встановленням в 2019 році комплексу з новою машиною безперервного лиття слябів № 4, яка дозволяє виробляти сляби товщиною від 170 мм до 250 мм та ківш-піч, суттєво розширилися можливості комбінату. Запропонована схема передбачає можливість забезпечення заготовкою всі підприємства компанії, в тому числі безперервні стани та стан 3200 заводу Grametal для виробництва відносно тонкого сортаменту товщиною 4,0 мм у відповідній якості.

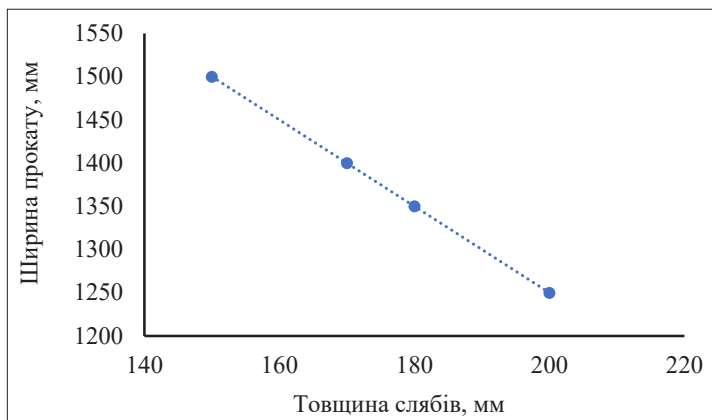
Вперше, запропоновано використовувати безперервнолиті сляби виробництва «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» для виробництва гарячекатаних рулонів на безперервному стані 1680 МК «Запоріжсталь». Такий захід дозволить суттєво розширити сортамент стану 1680 та частково зняти навантаження зі стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Межі сортаменту, який можна передати на стан 1680, потребує окремого технологічного дослідження з оцінкою економічної ефективності.

Забезпечення інших підприємств заготовкою виробництва МК «Запоріжсталь» не розглядається через застарілий спосіб виробництва та розливання сталі, наслідками якого є підвищена анізотропія хімічного складу та властивостей по довжині заготовки та прокату, наявність дефектів в прокаті які властиві тільки зливку.

В даній роботі розглядаються тільки технологічні аспекти зв'язку з метою забезпеченні вимог Замовників, без врахування розподілу об'ємів заготовки та виробництва між підприємствами.

Слід зазначити, що наразі незбалансованим залишається процес виробництва слябів та можливості їх прямого використання

на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Оновлена ливарна потужність комбінату, яка розрахована на виробництво гарячекатаних рулонів, дозволяє виробляти сляби товщиною 150–170–200–250 мм, в той же час можливості стану 1700 обмежені використанням заготовки товщиною не більше ніж 200 мм. Використання заготовки товщиною від 150 мм до 200 мм пов'язане з виникаючими обмеженнями сортаменту по ширині, рис. 7.18.



**Рисунок 7.18** – Залежність ширини прокату від товщини слябів при виробництві на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

Залежність, яка наведена на рис. 7.18, отримана шляхом розрахунку режиму прокатки слябів зі сталі марки S355MC, згідно зі стандартом EN 10149-2, при виробництві підкату товщиною 24 мм в чорновій групі клітей при максимальному їх навантаженні.

Додатковим обмеженням є існуючі відстані між клітями чорнової групи, яка не дозволяє використовувати сляби вагою більшою за 12–16 т через відсутність можливості синхронізувати роботу клітей, в залежності від сортаменту. Таким чином, обґрунтовано вибір підприємства «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» для реалізації проєкту модернізації устаткування на стані 1700.

## 7.4.2 Цільовий сортамент стану 1700 після модернізації, існуючі обмеження

Поточний сортамент стану 1700 суттєво відрізняється від сортаменту сучасних аналогічних станів. Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування наведені в розділі 1.3.2.1. На підставі додаткових вимог Замовників та ринкового аналізу виробництва гарячекатаних рулонів, які є складовою технологічної стратегії, сформовано загальні вимоги щодо рулонів та цільовий сортамент, який необхідно виробляти після модернізації стану 1700, табл. 7.16, 7.17, серед якого термомеханічний прокат категорії міцності до X70 та S700MC.

**Таблиця 7.16** – Загальні вимоги та цільовий сортамент стану 1700 після модернізації

Марка сталі	Нормативний документ	Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Розміри (товщина×ширина), мм	Вага, т
DD11-DD14	EN 10111	≥170	≤440	1,2–12,7× 900–1600	До 32 <sup>b</sup>
-----	-----	-----	-----		
S460MC	EN 10149-2	≥460	520–670		
X70	API-5L <sup>a</sup>	485–635	570–760		

<sup>a</sup> мається на увазі вимоги до прокату для виготовлення труб по стандарту API-5L; <sup>b</sup> максимальна вага рулонів.

У таблиці позначкою «-----» вказана наявність проміжного сортаменту.

**Таблиця 7.17** – Розширений цільовий марочний сортамент стану 1700 після модернізації

Клас міцності	Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Стандарт	Марка сталі
1	2	3	4	5
1	>170	≤440	EN 10130	DC01-07
			EN 10209	DC01-06EK/ED
			EN 10111	DD11-DD14
			ASTM A568/A568M	SAE 1006-1010
2	>185	290–540	EN 10025-2	S185
			API 5L	A

## Продовження таблиці 7.17

1	2	3	4	5
3	>235	360–510	EN 10025-2	S235 JR, JO, J2
			EN 10155	S235
			EN 10028-2	P235GH+N, P265GH+N
4	>235	370–580	EN 10025-2	S275 JR, JO, J2
			EN 10028-2	P295GH+N
			EN 10028-2	P275N, NL1, P275NH, NH1
			API 5L	B, X42, X46
			EN 10208-2	L245, L290
			EN 10113-2	S275N/NL
			EN 10149-2	S315MC
5	>355	430–680	EN 10025-2	S355 JR, JO, J2
			EN 10025-2	E295
			EN 10155	S355
			EN 10028-2	P355GH+N
			EN 10028-3	P355N/NH/NH1/ NH2
			API 5L	X52, X56
			EN 10208-2	L360
			EN 10113-2	S355 N/NL
6	>420	480–620	EN 10149-2	S355MC
			API 5L	X60
			EN 10208-2	L415
			EN 10113	S420 N/NL
7	>460	520–670	EN 10149-2	S420MC
			EN 10025-2	E335
			API 5L	X65, X70
			EN 10208-2	L450, L485
			EN 10113-2	S460N/NL
8	>500	550–760	EN 10149-2	S460MC
			EN 10025-2	E360
9	>650	700–950	EN 10149-2	S500MC, S550MC
			EN 10149-2	S650MC, S700MC

Для забезпечення виробництва рулонів максимальної ваги для кожного розміру, у якості заготовки повинен використовуватись сляб товщиною 250 мм та довжиною 10500 мм, згідно з технічним завданням.

Виробництво вказаного в табл. 7.16 сортаменту, масою до 32 т з заготовки товщиною 250 мм має наступні обмеження в умовах існуючого устаткування дільниці стану, табл. 7.18 [270, 271].

**Таблиця 7.18** – Існуючі обмеження дільниці стану 1700 з виробництва рулонів масою до 32 т

Цільові вимоги		Існуючі обмеження
Показник	Значення показника	
Маса рулонів	до 32 т	Максимальна допустима вага рулонів на 2-х діючих моталках 9 т, на моталці № 3 – 27 т
Товщина заготовки	250 мм	Кліть «01» з максимальним валковим проміжком – 250 мм, максимальним обтисненням – 34 мм; Кліть «1» з максимальним валковим проміжком – 200 мм, максимальним обтисненням – 46 мм
Довжина заготовки	10 500 мм	Відстань між клітьями: «01» та «1» становить 10150 мм; «1» та «2» становить 18500 мм
Категорія міцності рулонів	До X70	Тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа
Мінімальна товщина рулонів	1,2 мм	Мінімальна товщина рулонів 1,5 мм
Температурний клин	Максимум 25 °С	60 °С на поточній довжині (для розміру 4 × 1310 мм) яка становить 206 м

На підставі оцінки поточних технічних можливостей існуючого устаткування, опрацювання пропозиції щодо проведення реконструкцій для виробництва цільового сортаменту та виконання необхідних об’ємів, ланцюг існуючих обмежень з початку технологічного процесу прокатки виглядає наступним чином:

– Максимальне обтиснення в кліті «01» не дозволяє отримати потрібну товщину заготовки для задачі її в кліть «1».

– Відстань між клітью «01» та «1» менша ніж довжина прокатонової заготовки, що призведе до перебування розкату одночасно

у двох клітках. Кліті чорнової групи мають асинхронні двигуни з швидкістю обертів, яка не регулюється, що унеможлиблює впровадження такого варіанту роботи.

– Існуючі теплозберігаючи панелі не забезпечують потрібного температурного клину, особливо при збільшенні довжини розкату.

Схема розміщення основного устаткування стану 1700 та його характеристики наведено в розділі 1.3.2.1.

Існуючі технологічні обмеження при розрахунку процесу термомеханічної прокатки поширеного сортаменту рулонів розмірами  $2,65 \times 1500$  мм зі сталі марки S355MC згідно з EN 10149-2 з цільовими вимогами – маса рулонів 31т, розміри слябів, які використовуються  $250 \times 1500 \times 10500$  мм, в умовах існуючого устаткування стану 1700, виглядають наступним чином, табл. 7.19.

**Таблиця 7.19** – Результати розрахунків та обмеження виробництва великовагових рулонів на стані 1700

№ кліті	Показники						
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Валковий проміжок, мм	Довжина розкату <sup>b</sup> , мм	Відстань між клітками, мм	Температура, °C	Сила прокатки, МН $\times 10^{-2}$	Максимальна сила прокатки, МН $\times 10^{-2}$
0 <sup>c</sup>	250		10 500		1260		
01	228	250	11 630	10 150	1243	631	800
1	198	200	13 400	18 500	1228	926	2500
2	165	200	16 080	22 980	1211	1112	2500
3	137	150	19 360	35 420	1195	1056	2000
4	110	150	24 110	53 000	1172	1160	2000
4а	85 (30)	150	31 210	87 000	955 (1092)	1352	2000
5	19	150	139 610	5800	941	2016	2400
6	12	150	221 050	5800	934	1951	2400
7	7,7	150	344 490	5800	927	1796	2000
8	5,2	150	510 110	5800	915	1529	1800
9	3,5	150	757 870	5800	900	1460	1700
10	2,65	150	1 000 960	5800	888	1069	1500

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> розмір вказано у гарячому стані; <sup>c</sup> початкові дані; в дужках (...) вказано потрібне значення показника.

На підставі виконаного аналітичного моделювання процесу прокатки рулонів з урахуванням технічних обмежень існуючого устаткування стану 1700 не вдалось отримати наступні технологічні параметри:

- неможливо збільшити обтиснення в кліті 01, так як сила прокатки перевищить максимальну силу, що призведе до порушень природніх умов захоплення розкату валками, в наслідок чого неможливо задати підкат товщиною 228 мм в кліть 1, так як валковий проміжок становить 200 мм;

- товщина заготовки після чорнової групи становить 85 мм, замість потрібної 30 мм внаслідок недостатньої обтискної здатності клітей 01-4а;

- температура початку прокатки в чистовій групі становить 955 °С, що нижче за потрібну 1092 °С внаслідок недостатньої теплозберігаючої можливості існуючих екранів при збільшенні довжини розкату з вагою 31 т.

Таким чином, існуючі технічні обмеження не дозволяють забезпечити виробництво рулонів цільового сортаменту, вказаного в табл. 7.15.

### **7.4.3 Комплекс устаткування, що підлягає модернізації, аналіз вузьких місць, визначення необхідних технічних характеристик**

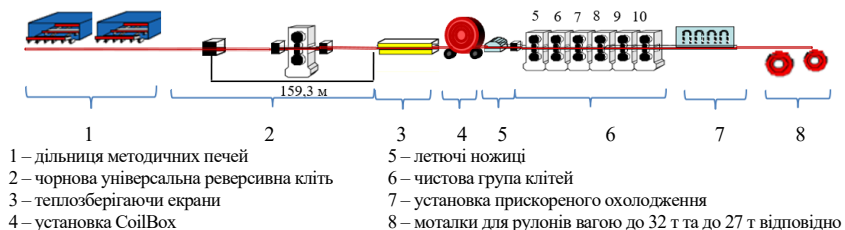
Для усунення вузьких місць треба реконструювати наступні дільниці стану, рис. 7.19:

- чорнова група – замість клітей 01-4а встановити одну реверсивну кліть, що дозволить використовувати сляб товщиною 250 мм та регулювати товщину заготовки для чистової групи в залежності від технологічних потреб;

- встановити, додатково, після теплозберігаючих екранів установку CoilBox, яка дозволить додатково зберегти температуру та суттєво зменшити температурний клин по довжині заготовки.

За допомогою аналітичної моделі шляхом декількох ітерацій виконано розрахунок технологічного процесу термомеханічної прокатки рулонів розмірами 1,8 × 1500 мм зі сталі марки S355MC

(розміри слябів  $250 \times 1500 \times 10500$  мм), з метою визначення необхідних технічних характеристик устаткування, яке необхідно реконструювати. Вибраний сортамент рулонів є найбільш показовим у сукупності розмір / марка сталі. Результати розрахунку наведені в табл. 7.20.



**Рисунок 7.19** – Схема розміщення основного устаткування стану 1700 після реконструкції

**Таблиця 7.20** – Результати розрахунку процесу термомеханічної прокатки рулонів розмірами  $1,8 \times 1500$  мм зі сталі марки S355MC в умовах реконструйованого устаткування

№ проходу / кліті	Показники				
	Товщина <sup>а</sup> , мм	Довжина розкату <sup>б</sup> , мм	Температура, °С	Швидкість, м/с	Сила прокатки, МН $\times 10^{-2}$
1	2	3	4	5	6
0°	250	10 500	1220		
1	218	12 110	1211	2,39	1209
2	184	14 350	1203	2,98	1346
3	150	17 610	1195	3,58	1502
4	115	22 970	1184	3,58	1703
5	80	33 010	1167	3,58	1966
6	45	58 690	1130	3,58	2460
7	23	110 820	1034	4,18	2708
CoilBox	23		1004,5		
5	19	139 610	941	1,36	2016

## Продовження таблиці 7.20

1	2	3	4	5	6
6	12	221 050	934	2,38	1951
7	7,7	344 490	927	3,92	1796
8	5,2	510 110	915	5,70	1529
9	3,5	757 870	900	7,83	1460
10	2,65	1 000 960	888	9,61	1069

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> розмір вказано у гарячому стані; <sup>c</sup> початкові дані.

У запропонованому варіанті модернізації три штовхальні методичні печі замінюються на одну нову крокуючого типу. Таким чином, на дільниці буде дві схожі методичні печі, що забезпечить підвищення продуктивності, уніфікацію технології та нагрівання слябів розмірами до  $250 \times 1600 \times 10500$  мм, вагою до 32 т.

Мінімально необхідний рівень технічних характеристик, які повинно мати нове устаткування після реконструкції, отриманих на підставі розрахунку процесу прокатки наведені в табл. 7.21.

**Таблиця 7.21** – Мінімально необхідні характеристики устаткування після реконструкції

Устаткування	Показник	Характеристика
Чорнова реверсивна кліть	Діаметр робочих валків, мм	1140
	Оберти головного двигуна, об/мін	40–80
	Потужність головного двигуна, кВт	$2 \times 7000$
	Максимальна сила прокатки, МН $\times 10^{-2}$	3000
	Максимальна швидкість прокатування, м/с	5
CoilBox	Вага заготовки, яка перемотується, т	32
	Формований внутрішній діаметр, мм	700
	Товщина заготовки, мм	20–40
Моталка	Вага рулонів, які змотуються, т	32
	Товщина рулонів, мм	1,2–12,7

Таким чином, по результатах розрахунку з використанням аналітичної моделі мінімально необхідні характеристики основного реконструйованого устаткування стану 1700, а також його розташування забезпечують гнучкість технології чорнової прокатки.

Серед отриманих переваг такі як можливість керування товщиною заготовки для чистової групи, можливість використання слябів товщиною до 250 мм та довжиною до 10 500 мм, що забезпечить виробництво рулонів вагою до 32 т, відсутність обмежень довжини заготовки, обумовленої відстанню між клітьми чорнової групи, зменшенням втрат температури заготовки перед чистовою групою за рахунок встановлення CoilBox.

Виконані розрахунки стали підставою для узгодження між компанією METINVEST та провідною компанією з розробки технології та виробництва металургійного устаткування "Primetals", принципового дизайну проекту модернізації стану 1700 та мінімально необхідного рівня його технічних характеристик.

Також, необхідно виконати модернізацію установки для прискороного охолодження прокату із забезпеченням технічних та технологічних параметрів, необхідних для виробництва цільового сортаменту.

Важливою перевагою запропонованого варіанту модернізації є можливість впровадження технології термомеханічної прокатки, що дасть можливість забезпечити виробництво цільового сортаменту.

Таким чином, виконані розрахунки та встановлені існуючі обмеження, які не дозволяють збільшити вагу гарячекатаних рулонів та виробляти марочний сортамент з тимчасовим опором більш ніж 590 МПа.

Запропоновано перелік основного устаткування, яке треба замінити, що дасть можливість виробляти гарячекатані рулоні категорії міцності до X70 вагою до 32 т, згідно з цільовими вимогами.

Виконано розрахунок найбільш показового сортаменту рулонів, що виробляються способом ТМСР, розмірами  $1,8 \times 1500$  мм із сталі марки S355MC, на підставі якого запропоновані мінімально необхідні характеристики, які повинно мати устаткування стану 1700 після модернізації.

#### **7.4.4 Вдосконалення методології аналітичних розрахунків температурного режиму прокатки на широкоштабовому стані з установкою CoilBox**

З метою розрахунку характеристик технологічного устаткування, в межах розрахунків по проекту модернізації стану 1700, вдосконалено методологію аналітичних розрахунків температурного режиму прокатки на широкоштабовому стані з CoilBox.

Актуальність цих розрахунків обумовлена необхідністю їх врахування при розробці технологічних рекомендацій із застосуванням устаткування CoilBox, у тому числі на МК «Запоріжсталь», а також його установкою в ході майбутньої реконструкції стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» для забезпечення температурних умов виробництва термомеханічного прокату.

Метою дослідження є уточнення методики розрахунку втрат температури металу при використанні устаткування CoilBox, що враховує фактори швидкості руху штаби, довжину рольганга і довжину розкату, з урахуванням умов безперервних станів гарячої прокатки МК «Запоріжсталь» та «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Типова модель розрахунку станів гарячої прокатки включає в себе наступні етапи [57, 129]:

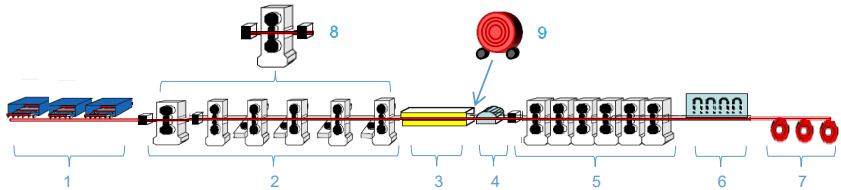
1. Розрахунок розмірів вихідної заготовки, який включає розрахунок питомих витрат металу на прокатку, перерахування розмірів заготовки в гарячий стан.

2. Розрахунок енергосилових параметрів прокатки включає розрахунок температурного режиму прокатки, коефіцієнту тертя, дійсного опору деформації, сили та моменту прокатки.

3. Розрахунок швидкісного режиму прокатки включає розрахунок часу прокатки, в залежності від типу швидкісного режиму, цикл прокатки.

4. Розрахунок середнього квадратичного моменту електродвигуна складається з розрахунку моментів по кожному циклу прокатки, середньоквадратичного інтегралу, а також з розрахунку потужності двигуна прокатного стану.

Типовий проект безперервного стану гарячої прокатки, на прикладі стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведено на рис. 7.20.



- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| 1 – дільниця методичних печей | 6 – установка охолодження прокату                  |
| 2 – чорнова група клітей      | 7 – моталки  |
| 3 – теплозберігаючі екрани    | 8 – реверсивна чорнова кліть (після реконструкції) |
| 4 – летючі ножиці             | 9 – установка CoilBox (після реконструкції)        |
| 5 – чистова група клітей      |  |

**Рисунок 7.20** – Схема розміщення основного устаткування стану 1700 з урахуванням проекту реконструкції

Принципи, що викладені в такій структурі розрахунку є універсальними і можуть бути застосовані для моделювання технології на різноманітних станах гарячої прокатки.

У даному дослідженні розглянуто особливості моделювання технології гарячої та термомеханічної прокатки на безперервних штабових станах на прикладі комплексу устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА, з урахуванням проекту реконструкції (див. позиції 8 та 9, рис. 7.20).

Основне технологічне устаткування безперервних станів може включати одну або декілька універсальних реверсивних клітей або комбінацію реверсивних та нереверсивних замість нереверсивної чорнової групи, проміжний перемотувальний пристрій типу CoilBox перед чистовою групою, також можливі і інші варіанти.

Розрахунок температурного режиму прокатки враховує наступні фактори [122, 124, 127–130]:

1. Зниження температури розкату за рахунок втрат тепла випромінюванням.
2. Втрати тепла конвекцією.
3. Втрати температури при контакті металу з валками.
4. Зниження температури внаслідок втрат тепла при гідрозбиві окалини.
5. Підвищення температури розкату за рахунок енергії деформації.

В нереверсивних клітках чорнової та чистої груп сумарний час, який витрачено на втрати тепла випромінюванням та конвекцією, визначається залежністю:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_t, \quad (7.1)$$

де  $\tau$  – час, який витрачається на прокатку розкату в кліті, с;  $\tau_t$  – час транспортування розкату між клітками чорнової групи, с.

При розрахунку чистої групи, в формулі (7.1) параметр  $\tau_t$  замінюється на  $\tau_{t1}$  – час транспортування розкату між клітками чистої групи, с.

При цьому, для чорнової групи де прокатка здійснюється послідовно в кожній кліті час, що витрачається на прокатку  $\tau$ , визначається розрахунком швидкісного режиму прокатки [57, 129].

Час транспортування розкату між клітками чорнової групи, визначається залежністю:

$$\tau_t = \frac{l_r - l}{v_r}, \quad (7.2)$$

де  $v_r$  – швидкість руху штаби по рольгангу, м/с;  $l_r$  – довжина рольгангу, м;  $l$  – довжина розкату, що транспортується, м, за умов  $l_r > l$ .

Для чистої групи, де прокатка здійснюється одночасно в кількох клітках, час, що витрачається на прокатку в кліті, розраховується за формулою:

$$\tau = \frac{l_g}{v_{roll} \times 1000}, \quad (7.3)$$

де  $l_g$  – довжина дуги контакту, мм;  $v_{roll}$  – швидкість прокатки, м/с.

Час транспортування розкату між клітками чистої групи визначається залежністю:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{v_{roll}}. \quad (7.4)$$

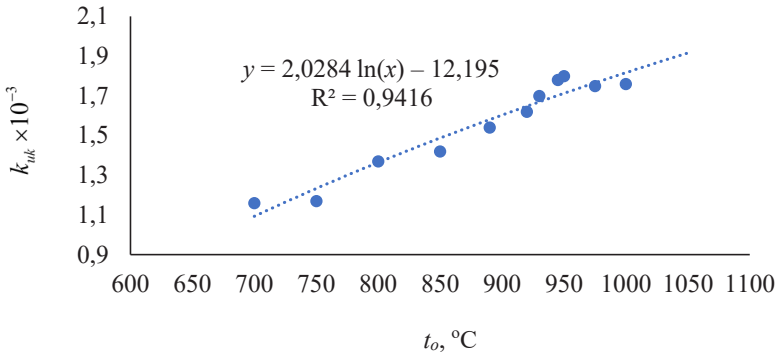
Розрахунок втрат температури металу при змотуванні розкату на установці CoilBox можна визначити з рівняння Ю. В. Коновалова, В. В. Кисіля [129]:

$$\Delta t = k_{uk} \left( \frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \times \tau_c / h_c, \quad (7.5)$$

де  $h_c$  – товщина рулону, мм;  $t_o$  – температура розкату, що поступає на установку CoilBox, °C;  $\tau_c$  – тривалість технологічної операції, с;  $k_{uk}$  – коефіцієнт, що встановлюється, згідно з рекомендаціями авторів, по графіку [129].

Перетворивши графік [129] на вираз, для визначення коефіцієнта  $k_{uk}$ , отримаємо наступну залежність, рис. 7.21:

$$k_{uk} = (2,0284 \ln(t_o) - 12,195) / 1000. \quad (7.6)$$



**Рисунок 7.21** – Залежність коефіцієнта  $k_{uk}$  від температури розкату

З врахуванням залежності (7.6), формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox має вигляд:

$$\Delta t_1 = \left( \frac{\left( \frac{2,0284 \ln(t_o) - 12,195}{1000} \right) \times \left( \frac{\tau_c}{h_c} \right) \times (t_o + 273)}{100^4} \right). \quad (7.7)$$

Тривалість технологічної операції змотування та розмотування рулону встановлюємо наступним чином:

$$\tau_c = \frac{L}{v_w \times 1000} + \frac{L}{v_{uw} \times 1000} + \tau_p, \quad (7.8)$$

де  $L$  – довжина розкату, мм;  $v_w$  – швидкість змотування, м/с;  $v_{uw}$  – швидкість розмотування, м/с;  $\tau_p$  – час знаходження змотаного рулону на установці, с.

Товщину рулону встановлюємо з рівняння:

$$H \times B \times L \times \rho = (\pi R^2 - \pi r^2) B \times \rho, \quad (7.9)$$

де  $H$ ,  $B$ ,  $L$  – товщина, ширина та довжина розкату, що змотується, мм;  $\rho$  – щільність сталі, 7,85 г/см<sup>3</sup>;  $R$  – зовнішній радіус рулону після змотування на установці CoilBox, мм;  $r$  – внутрішній радіус рулону, що формується, згідно з характеристиками устаткування, мм.

Після перетворення рівняння (7.9) отримаємо залежність для визначення зовнішнього радіусу рулону:

$$R = \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2}. \quad (7.10)$$

Товщина рулону, який виходить після змотування, розраховуємо:

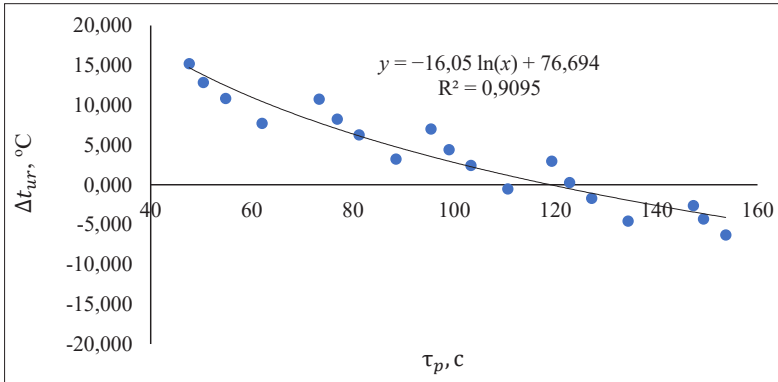
$$h_c = \left( \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2} - r \right) \times 1,05, \quad (7.11)$$

де 1,05 – коефіцієнт нещільності змотування.

З урахуванням залежностей (7.8) та (7.11), формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox набуває вигляду:

$$\Delta t_1 = \left( \frac{(2,0284 \ln(t_o) - 12.195)}{1000} \right) \times \left( \frac{\frac{L}{v_w \times 1000} + \frac{L}{v_{uw} \times 1000} + \tau_p}{\left( \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2} - r \right) \times 1,05} \right) \times (t_o + 273) / 100^4. \quad (7.12)$$

Слід зазначити, що отримана залежність враховує втрати температури металу в стаціонарному стані змотаного рулону. Для урахування додаткових втрат температури металу від неврахованих факторів (вплив товщини підкату, втрати температури на початковому етапі змотування та наприкінці розмотування, вплив ефекту «термосу» при витримці рулону в змотаному стані) виконано обробку масиву розрахункових даних компанії “Primetals”, рис. 7.22.



**Рисунок 7.22** – Залежність втрат температури від неврахованих факторів, відображених через  $\tau_p$

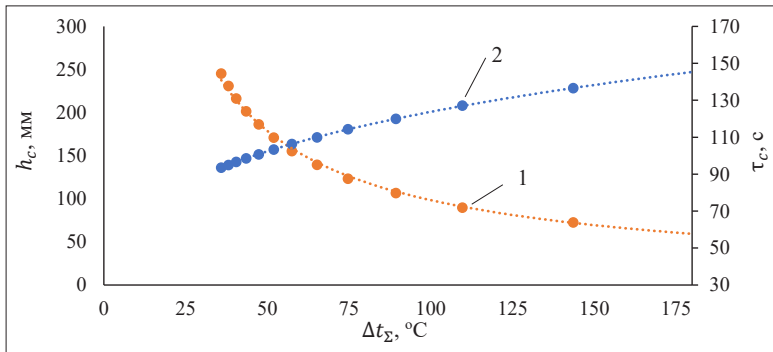
У результаті обробки даних отримано наступну залежність для встановлення втрат температури від неврахованих факторів:

$$\Delta t_{wr} = -16.05 \ln(\tau_p) + 76.694. \quad (7.13)$$

Таким чином, з врахуванням залежності (7.13), сумарні втрати температури металу після установки CoilBox визначаємо як:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_1 + \Delta t_{wr}. \quad (7.14)$$

Змінення температури металу, з початкових 1100 °С, на установці CoilBox в залежності від часу охолодження (змінення швидкості змотування/розмотування) та товщини сформованого рулону  $h_c$ , при інших рівних умовах, які отримано з використанням залежності (7.14) наведено на рис. 3.7.



**Рисунок 7.23** – Залежність втрат температури в CoilBox від товщини змотаного рулону (1), часу охолодження (2)

Отримані формули (7.12–7.14) можна застосовувати в температурному діапазоні 700–1100 °С, з часом охолодження рулону на установці від 30 с до 1000 с, для вуглецевих та мікролегованих марок сталі. Для перевірки результатів розрахунку в інших діапазонах необхідно проведення додаткових досліджень.

Перевірка залежності (7.14) виконувалась на даних отриманих авторами роботи [120]. Відхилення розрахованої температури металу на виході з CoilBox від фактичної склало від –4,2% до –6,4%, табл. 7.22.

Отримані відхилення можуть бути пов’язані з відсутністю інформації щодо додаткових факторів втрат та місць встановлення пірометрів для заміру температур.

Також перевірку виконано на розрахункових даних компанії “Primetals”.

Відхилення температури металу на виході з CoilBox, що визначена згідно з залежністю (7.14), від розрахованих даних компанії “Primetals” склало від –0,91% до 0,39%. Стандартне відхилення склало 2,95 °С.

Перевірка точності розрахунку температурного режиму прокатки з урахуванням залежностей (7.1–7.4) виконано на аналітичній моделі [57], адаптованій для умов безперервного стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», табл. 7.23.

**Таблиця 7.22** – Перевірка залежності для визначення втрат температури металу при змотуванні на установці CoilBox

$r^a$ , мм	$t_0$ , °C	$L$ , мм	$v_{вв}$ , м/с	$v_{лов}$ , м/с	$\tau_p^a$ , с	$H$ , мм	$t_1$ (факт), °C	$h_c$ , мм	$\Delta t_c$ (факт), °C	$T_c$ , с	$\Delta t_c$ (розрахунок), °C	$t_1$ (розрахунок), °C	$\Delta$ , %
700	1096	64558	2,2	1,79	70	23	992	295,2	104,0	135,4	41,0	1055,0	-6,4
700	1018	243417	6,5	6,25	70	6,1	942	295,2	76,0	146,4	36,4	981,6	-4,2
700	1053	228437	6,5	6,25	70	6,5	965	295,2	88,0	141,7	38,6	1014,4	-5,1

<sup>a</sup> дані відсутні в роботі [120], прийняті по характеристиках аналогічного устаткування, встановленого на МК «Запоріжсталь».

У таблиці 3.7,  $t_1 = t_0 - \Delta t_c$  – температура металу на виході з CoilBox, °C.

**Таблиця 7.23** – Перевірка розрахунку температурного режиму прокатки

Параметр	Чорнова група	Чистова група			
	№ кліти				
	кліть 4а	кліть 6	кліть 7	кліть 8	кліть 9
$t_1$ (расчет), °C	1068	972	932	885	854
$t_1$ (факт), °C	1075	963	921	874	845
$\Delta$ , %	-0,66	0,89	1,19	1,21	1,1

У таблиці 7.22,  $t_1$  – температура розкату після прокатки у відповідній кліті.

Відхилення розрахованих температур прокату від фактичних в кліті 4а чорнової групи та в клітках 6–9 чистової групи, по результатах прокатки гарячекатаних рулонів розмірами  $1,2 \times 1000$  мм зі сталі марки 08пс згідно з ГОСТ 9045 (аналог DC01 згідно з EN 10130), плавка № 262753-3 склало від -0,66 % до 1,21 %.

Точність вдосконаленого розрахунку температурного режиму прокатки, в тому числі з використанням устаткування CoilBox, дозволяє його використовувати при проектуванні технології ТМСП.

Таким чином в даному дослідженні уточнені особливості розрахунку часу, що витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на безперервних станах гарячої прокатки при послідовній прокатці та прокатці розкату одночасно в декількох клітках. Похибка розрахунку температурного режиму прокатки на базі фактичних даних отриманих на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» склало від -0,66 % до 1,2 %.

Розроблено залежність для встановлення втрат температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування, часу знаходження рулону на установці, а також додаткові втрати через вплив товщини підкату, температури на початковому етапі змотування і на при кінці розмотування, вплив ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. Похибка запропонованої залежності перевірена на різноманітних фактичних та розрахункових даних та складає від  $-0,91\%$  /  $0,39\%$  до  $-4,2\%$  /  $-6,4\%$ .

## **7.5 Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 з метою збільшення ваги готових рулонів**

З метою часткового виконання вимог Замовників по збільшенню ваги гарячекатаних рулонів на проміжному етапі модернізації стану 1700 розроблено технологію та виконано промислові випробування синхронізації роботи клітей чорнової групи.

Постійне підвищення вимог споживачів та покращення якості провідними світовими виробниками металопродукцій в комплексі формує цільові показники та світовий тренд якості прокату. В даний час вимоги до металопродукції вже перевищили вимоги стандартів на їх виробництво. Так, до підвищених вимог до гарячекатаних рулонів можна віднести обмеження мінімальної ваги, наприклад, деякі переробники використовують рулони вагою від 18 т до 30 т, обмеження телескопічності, наприклад, не більше 20 мм або 10 мм, обмеження толерансу по товщині від  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{1}{4}$  вимог стандартів, підвищені вимоги до механічних властивостей та інші.

Актуальність впровадження технології прокатки з синхронізацією клітей для стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» обумовлена необхідністю збільшення ваги рулонів більшою ніж 9,0 т на проміжному етапі модернізації стану, в умовах діючого устаткування.

Метою цього дослідження є розробка технологічних рекомендацій з синхронізації роботи клітей чорнової групи стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», що забезпечить виробництво рулонів вагою більшою ніж 9,0 т.

Схема розміщення основного устаткування стану 1700 та його характеристики наведено в розділі 1.3.2.1.

В умовах діючого стану 1700 відбувається поетапна модернізація основного устаткування. Цільовий сортамент рулонів після модернізації наведений в табл. 7.16, 7.17. На даний час вже розпочала роботу піч для нагрівання слябів довжиною до 10500 мм та встановлена моталка для рулонів вагою до 27 т, що є першим етапом модернізації. Другим етапом модернізації є заміна клітей чорнової групи на реверсивну чорнову кліть. Період часу між двома етапами становить від одного до двох років. Тож дуже важливо у цей перехідний час налагодити виробництво рулонів вагою більшою за 9 т.

Суттєвим технічним обмеженням збільшення ваги рулонів є мала відстань між клітями 01 та 1, яка не дозволяє збільшити довжину сляба до 10 500 мм. Існуючі відстані між клітями чорнової групи наведені в таблиці 7.24.

**Таблиця 7.24** – Відстань між клітями чорнової групи стану 1700

№ кліті	01	1	2	3	4	4а
Відстань між клітями, мм	10 150	18 500	22 980	35 420	53 000	87 000
Швидкість прокатування, м/с	0,84	1,27	1,35	1,74	1,74	2,9

У таблиці 7.24, відстань між клітями є відстанню між вказаною та наступною прокатною кліттю.

Наступним обмеженням є неможливість керування швидкістю прокатки, яка є постійною по клітях, згідно з проектом (див. табл. 7.24). Таким чином в існуючих умовах збільшити вагу рулонів можливо тільки синхронізацією деформаційно-швидкісних параметрів клітей чорнової групи [272, 273].

При цьому необхідно розрахувати довжину сляба, який можна використовувати, з метою синхронізації роботи тільки двох клітей. Використання для цієї технології більшої кількості клітей обмежена їх силовими характеристиками, які не дозволяють витримати необхідний режим деформації. Розрахунок режимів прокатки розкатів з синхронізацією у чорновій групі виконувався для найбільш важкого сортаменту, таблиця 7.25. Загальними умовами розрахунку було дотримання встановлених технологічних та експлуатаційних параметрів устаткування.

**Таблиця 7.25** – Сортамент розкатів після чорнової групи стану 1700

Переріз розкату після чорнової групи, мм	Марка сталі	Стандарт на марку
23 × 1500	S355	EN 10025-2

На підставі розрахунку [46], отримали наступні показники, таблиця 7.26.

**Таблиця 7.26** – Технологічні та експлуатаційні показники режиму синхронізації клітей чорнової групи стану 1700

№ кліті	Показники									
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Довжина розкату <sup>b</sup> , мм	Відстань між клітьями, мм	Швидкість перед кліттю, м/с	Швидкість за кліттю, м/с	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Максимальна сила прокатки, МН × 10 <sup>-2</sup>	Розрахована необхідна потужність двигуна, кВт	Проектна потужність двигунів, кВт <sup>d</sup>
0 <sup>c</sup>	150	9320								
01	132	10550	10 150	0,74	0,85	1260	672	800	1215,7	2 × 4000
1	95	14660	18 500	0,91	1,26	1238	1400	2500	4791,4	
2	62	22470	22 980	0,89	1,37	1218	1540	2500	5400,5	
3	42	33 170	35 420	1,21	1,79	1180	1312	2000	5123,5	
4	29	48030	53 000	1,24	1,80	1132	1266	2000	4017,1	
4a	23	60560	87 000	2,33	2,93	1048	1105	2000	3940,9	

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> розмір вказано у гарячому стані; <sup>c</sup> початкові дані; <sup>d</sup> на кожній кліті встановлено по два головних двигуни

Розрахунок синхронізації виконано для кліті № 01 та № 1 при прокатці слябу довжиною 9320 мм. Вага готового рулону становить 15,83 т. Подальше збільшення довжини слябу призведе до необхідності синхронізації роботи клітей № 2–3 та № 3–4, які мають суттєву різницю у швидкостях прокатки.

Перевищення довжини розкату над довжиною міжклітьового проміжку склало 400 мм. Таким чином, розкат знаходився у двох

клітях одночасно. Повної синхронізації досягти не вдалось через наближення до максимальної сили прокатки у кліті № 01 (див. табл. 7.24) та перевищення природнього кута захоплення в кліті № 1. Досягнута швидкість виходу розкату з кліті № 01 – 0,85 м/с, а швидкість входу у кліть № 1 – 0,91 м/с. Таким чином, вдалося зменшити розсинхронізацію з 0,43 м/с (див. табл. 7.22) до 0,06 м/с (див. табл. 7.24).

Слід зазначити, що при неповній синхронізації при прокатці розкату має місце пікове зміння навантаження на двигуни кліті № 01 та № 1, результати розрахунку якого наведені в таблиці 7.27.

Пікове зміння необхідної потужності двигунів для кожної кліті отримано шляхом її розрахунку при зменшенні або збільшенні обертів однієї кліті за рахунок іншої, необхідних для повної синхронізації швидкості розкату.

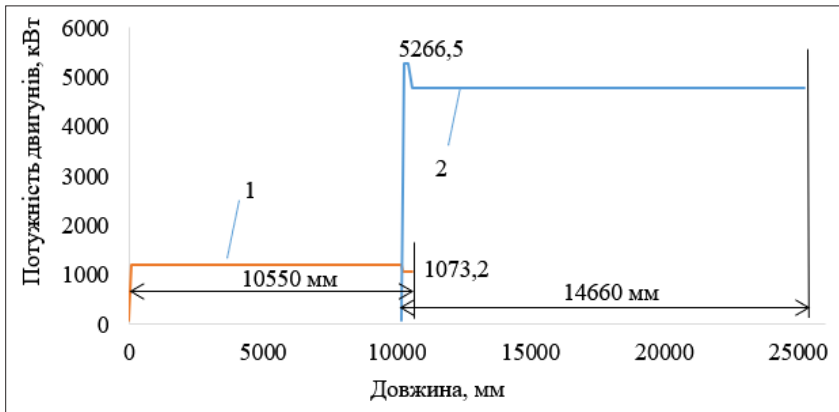
**Таблиця 7.27** – Результати розрахунку пікового зміння необхідної потужності двигунів при неповній синхронізації

№ кліті	Розрахована необхідна потужність двигунів, кВт	Пікове зміння необхідної потужності двигунів, кВт	Проектна потужність двигунів, кВт
01	1215,7	1073,2	2 × 4000
1	4791,4	5266,5	

Зміння необхідної потужності двигунів кліті № 01 та № 1 по довжині розкату з урахуванням пікового навантаження під час знаходження розкату одночасно у двох клітях наведено на рис. 7.24. Таким чином, при синхронізації роботи клітей за рахунок розподілу режиму обтиснення, пікове навантаження на головні двигуни клітей № 01 та № 1, під час знаходження розкату одночасно у двох клітях, не перевищило встановлене проектом обмеження у 8000 кВт, табл. 7.27.

На підставі проведеного дослідження отримано наступні результати:

1. Підтверджена можливість впровадження технології синхронізації за рахунок розподілу режимів обтиснення у чорновій групі клітей стану 1700.



**Рисунок 7.24** – Діаграма змінення потужності двигунів кліти № 01 (1) та кліти № 1 (2) по довжині розкату

2. Розроблена технологія дозволяє збільшити вагу рулонів на проміжному етапі реконструкції стану 1700 з 9 т до 15,83 т.

3. Виконано розрахунок максимальної довжини слябу товщиною 150 мм, яка становить 9320 мм і яку можна використовувати для впровадження технології синхронізації на стані 1700. Подальше збільшення довжини слябу призведе до необхідності додаткової синхронізації роботи клітей №№ 2–3–4.

4. Виконано розрахунок необхідної потужності двигунів синхронізованих клітей з врахуванням навантаження під час знаходження розкату одночасно у двох клітях. Необхідна потужність двигунів не перевищила встановлене проектом обмеження у 8000 кВт.

## Висновки до розділу 7

1. На підставі аналізу встановлено, що додаткові вимоги до прокатної продукції перевищують встановлені нормативними документами та потребують врахування при розробці технологій.

2. Визначено, що на підставі встановлених, за допомогою комплексу методів статистичної обробки даних, зв'язків між технологічними параметрами прокатки та механічними властивостями готового ТМСП прокату, які закладено в методологію керування якістю, можливо підвищити стабільність технологічних процесів прокатки. Перевірка запропонованої методології показала зменшення стандартного відхилення границі плинності, тимчасового опору та відносного подовження на 44 %, 31 % та 46 % відповідно, від первинних даних, отриманих при прокатці сталі категорії міцності К60 на товстолистовому стані 3600, що свідчить про можливість підвищення стабільності технологічного процесу термомеханічної прокатки.

3. На підставі розрахунків, виконаних за допомогою вдосконаленої аналітичної моделі, визначено поточні технічні можливості стану 1700. Виконано розрахунок необхідного рівня технічних характеристик устаткування, яке буде змінено в ході реконструкції стану 1700 серед якого чорнова реверсивна кліть, установка CoilBox, моталка та розраховано його мінімально необхідні технічні характеристики для забезпечення виробництва термомеханічного прокату з категорією міцності до Х70.

4. Обґрунтовано, з метою розширення сортаменту стану 1680 МК «Запоріжсталь» та освоєння технології термомеханічної прокатки, можливість використання безперервнолитих слябів виробництва «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

5. З метою виконання розрахунків температурних режимів прокатки на безперервних станах з різноманітним комплексом основного устаткування уточнені особливості розрахунку часу, що витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на безперервних станах гарячої прокатки при послідовній прокатці та прокатці розкату одночасно в декількох клітях. Похибка розрахунку температурного режиму прокатки на базі фактичних даних по стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» склала від -0,66 % до 1,2 %. Розроблено залежність для встановлення втрат температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування, часу знаходження рулону на установці, а також додаткові втрати через вплив товщини підкату,

вплив температури на початковому етапі змотування і на при кінці розмотування, вплив ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. Похибка запропонованої залежності перевірена на різноманітних фактичних та розрахункових даних та склала від  $-0,91\%$  /  $0,39\%$  до  $-4,2\%$  /  $-6,4\%$ .

6. На підставі аналізу температурно-деформаційних та швидкісних параметрів прокатки, виконаних за допомогою аналітичної моделі та з урахуванням уточненого розрахунку теплових втрат, на проміжному етапі модернізації стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» підтверджена можливість та впроваджена технологія синхронізації роботи клітей № 01 та № 1 за рахунок розподілу режимів обтиску у чорновій групі клітей стану 1700. Розроблена технологія дозволяє збільшити вагу рулонів, що виробляються методом ТМСР з 9 т до 15,83 т.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

---

У роботі вирішена важлива науково-практична проблема розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, що виготовляється на товстостілових, широкоштабових станах та станах Стеккеля на підставі розвитку наукових основ процесу термомеханічної прокатки і розробки методологій удосконалення технологій, що враховують різний конструктивний та структурний склад основного прокатного устаткування.

1. На підставі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що процес термомеханічної прокатки дозволяє підвищити механічні показники міцності, пластичності, покращити зварюваність і зменшити енерговитрати на виробництво. Однак, на даний момент існує ряд проблем, що стримують його широке впровадження, серед яких невизначеність розподілу температур у прокаті, ефекту впливу деформації на чорновій стадії прокатки на властивості металу, що успадковуються, вирішення яких можливе через поглиблене вивчення умов теплообміну та уточнення градієнту температур по ширині розкату, встановлення зв'язків між розміром зерна аустеніту ( $a$ , відповідно, і між опором деформації) від значень температури та обтиснення в процесі прокатки.

2. Уточнено закономірності розподілу температур при охолодженні підкату після пічних моталок або пристроїв міжклітьового перемотування шляхом скінченно-різницевого розв'язання задачі теплообміну, що уточнює вплив конвекційної складової в загальному тепловому балансі для умов термомеханічного процесу прокатки. Доведено необхідність врахування впливу конвекційного теплового потоку при зниженні температури підкату з 1100 °С до 800 °С, складова якого в загальному тепловому балансі на крайці підкату збільшується з 3,6 % до 83 %. Для стану Стеккеля встановлено, що впродовж кожного етапу нагрівання в пічних моталках та охолодження перед прокаткою в діапазоні температур 830–790 °С різниця між температурами центральної частини та крайки штаби

збільшується відповідно з 8 °С до 43,7 °С перед останнім проходом, що перевищує рекомендований для технології ТМСР перепад у 25 °С. Запропоновано технічне рішення, яке полягає у корегуванні режимів роботи пальників пічних моталок.

3. Встановлено, що ступінь деформацій при чорновій прокатці має суттєвий вплив на розмір зерна аустеніту, який визначає такі успадковані механічні властивості, як границя плинності, тимчасовий опір, енергія удару, доля в'язкої складової. Зокрема встановлено, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту (з 51 мкм до 38 мкм, тобто на 50 % в загально дослідженому діапазоні) сталей категорії міцності Х65 при температурі 1050 °С, яка переує температурі початку гальмування рекристалізації, відбувається при обтисненні від 10 % до 20 %. Подальше збільшення обтиснень з 20 % до 70 % є менш ефективним, через зменшення зерна аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм. Встановлено, що з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованих марок сталей категорії міцності Х65 та подальшого успадкованого зерна фериту ступінь деформації за прохід повинен бути  $\geq 20\%$ , на відміну від відомих результатів, в яких достатнім вважався рівень обтиснень у 10 %.

4. Встановлено на основі результатів лабораторних та теоретичних досліджень, що реологічні властивості сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп при температурі деформації 1200–1000 °С, швидкості деформації  $u = 1\text{с}^{-1}$  та ступеню деформації 0,1–0,54 відн. од. наближені до реологічних властивостей свинцю марки ССу при температурі 20 °С, що обґрунтовано дозволяє його використовувати як основний модельний матеріал для фізичного моделювання процесів гарячої прокатки вказаних матеріалів. На підставі розрахункових поліноміальних моделей отримано коефіцієнти пропорційності  $n_i$  та коефіцієнти зміни істинного опору деформації  $K_\sigma$ , які дозволяють розраховувати опір деформації сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп використовуючи моделі реологічних кривих свинцю марки ССу. Отримані залежності перевірено на фактичних даних силових режимів за результатами чорнової прокатки товстих листів зі сталі категорії міцності Х70

на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», при цьому середня похибка для сили прокатки становить 11,6 %, що підтвердило можливість використання отриманих результатів.

5. Визначено, що комбінування температурно-деформаційних умов дозволяє підвищити рівномірність розподілу деформації по товщині підкату. Встановлено методом скінченно-елементного моделювання, що підвищення рівномірності деформації по товщині підкату при чорновій прокатці конструкційних марок сталі типу S355 досягається при ступенях деформації 14–20 %, що забезпечує підвищення рівномірності розподілу успадкованих механічних властивостей по товщині. Запропоновано коефіцієнт  $K_{нд}$  для оцінку рівномірності деформації по товщині прокату, який розраховують як відношення мінімального до максимального значення еквівалентної деформації (інтенсивності деформації). Встановлено, що при обтисненнях 14–20 %, температурі  $\leq 1150$  °C та показнику осередку деформації  $l_d/h_{cp} \geq 0,83$  значення коефіцієнту  $K_{нд}$  становить 0,70–0,92 (70–92 %). Визначено, що обтиснення  $\geq 20$  % дозволяє досягти значення коефіцієнту  $K_{нд}$  на рівні 0,92 (92 %), що забезпечує найкращу рівномірність деформації в дослідженому діапазоні. Отримані результати дозволяють підвищити рівномірність розподілу механічних властивостей в готовому прокаті.

6. На підставі результатів дослідження температурно-деформаційних та швидкісних режимів прокатки, виконаних за допомогою аналітичної моделі, підтверджено технічну можливість виробництва відносно тонкого прокату розмірами  $4 \times 3125 \times 16000$  мм за технологією гарячої, нормалізувальної та термомеханічної прокатки на товстолистовому стані 3200 заводу Tramtal (Італія) зі слябу товщиною 220 мм замість слябу 150 мм. При розробці технології враховано скорочення часу пауз між проходами, що дозволило зберегти температуру розкату по проходах та температуру кінця прокатки не нижче 820 °C та, відповідно, отримати силові характеристики прокатки у встановлених обмеженнях.

Підтверджено шляхом промислового експерименту можливість впровадження технології термомеханічної прокатки товстого листа для суднобудування зі сталі марки EN36 згідно з Правилами Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» на підставі урахування

результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату. Встановлено, що при застосуванні термомеханічної прокатки отримано більш високі механічні властивості (для границі плинності на 40 МПа, для тимчасового опору на 37 МПа), ніж при прокатці з термічною обробкою нормалізацією.

7. Отримано закономірності для розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією в умовах прокатки на стані Стеккеля, і залежність, яка дозволяє визначати зміну температури металу в пічній моталці та додатково враховує усереднену теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей, що нагріваються, радіус барабану моталки та рулону, довжину штаби і швидкість прокатки. Це дало змогу зменшити похибку розрахунків зазначеної температури металу на 11,25 % (з 9,15 % до -2,1 %). На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату шляхом аналітичного моделювання підтверджено можливість впровадження технології термомеханічної прокатки рулонів товщиною 12 мм зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу *Ferriera Valsider* (Італія). Режими розроблено з урахуванням обмеженої потужності двигунів робочих клітей.

8. На підставі проведених досліджень розроблено та впроваджено на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» технологію термомеханічної прокатки рулонів зі сталей марок S355MC та S460MC конструкційного сортаменту згідно зі стандартом EN 10149-2 та трубного сортаменту зі сталей марок B та X52M для подальшого виробництва електрозварних труб згідно зі стандартом API-5L. Визначено, що додаткове додавання 0,014 % Nb при виробництві сталі марки X52M та прокатки з неї штаби товщиною 8 мм дозволяє підвищити границю плинності на 40 МПа, тимчасовий опір на 20 МПа, зменшує бал смугастості мікроструктури на поверхні та в центрі на 1–2 бали відповідно, що частково дозволяє компенсувати вплив недостатньої потужності установки прискореного охолодження на формування механічних властивостей. Очікуваний економічний ефект від виробництва нового сортаменту складає 1,75 млн грн/рік.

9. Для виконання проектних розрахунків при реконструкції стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» з метою визначення необхідного рівня технічних характеристик нового устаткування розроблено залежність для встановлення втрат температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування та часу знаходження рулону на установці. Крім того враховуються додаткові втрати, пов'язані з впливом товщини підкату, температури на початковому етапі змотування і наприкінці розмотування, ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. На основі перелічених факторів вдосконалено аналітичну модель для розрахунку параметрів термомеханічної прокатки на широкоштабових станах. Встановлено, що похибка запропонованої моделі розрахунку втрат температури металу у CoilBox у порівнянні з фактичними значеннями температур склала від  $-4,2\%$  до  $-6,4\%$ , що підтвердило можливість її використання. Уточнені необхідні технічні характеристики у проекту реконструкції стану 1700, який прийнято до реалізації на комбінаті «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Очікуваний економічний ефект від реконструкції стану 1700 складає 2,90 млн грн/рік.

Методики і результати теоретичних та експериментальних досліджень використані в навчальному процесі та в науково-дослідних роботах ДВНЗ «ПДТУ».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ \_\_\_\_\_

---

1. Steel Statistical Yearbook 2019. World Steel Association, 2020. URL: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>.

2. Kukhar V., Yelistratova N., Burko V., Nizhelska Y., Aksionova O. Estimation of Occupation Safety Risks at Energetic Sector of Iron and Steel Works. *International Journal of Engineering & Technology (UAE)*. 2018. Vol. 7, № 2.23. Pp. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>.

3. Militzer M. Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive. *Materials Processing*. 2014. Vol. 1. Pp. 191–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.

4. Zinchenko Yu. A., Kurpe A. G., Bagmet O. A. Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine. *Metallurgist*. 2008. Vol. 52, № 7–8. Pp. 461–463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.

5. Li H., Li Z., Yuan G., Wang Z., Wang G. Development of New Generation Cooling Control System After Rolling in Hot Rolled Strip Based on UFC. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013. № 20 (7). Pp. 29–34.

6. Liu E., Zhang D., Sun J., Peng L., Gao B., Su L. Algorithm Design and Application of Laminar Cooling Feedback Control in Hot Strip Mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. № 19 (4). Pp. 39–42. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60085-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60085-5).

7. Kukhar V., Prysiashnyi A., Balalayeva E., Anishchenko O. Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultra-fine sheets and strips correlated with the chilling end-effect. *Modern Electrical and Energy System MEES'2017*. IEEE. Kremenichuk, Ukraine: Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2017. Pp. 404–407. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.

8. Gray M. Technology of microalloyed steel for large diameter pipe. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1974. Vol. 2. Pp. 95–122. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(74\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(74)90019-2).

9. Torres N., Greivel G., Betz J., Moreno E., Newman A., Thomas B. Optimizing steel coil production schedules under continuous casting and hot rolling. *European Journal of Operational Research*. 2024. Vol. 314 (2). Pp. 496–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.10.005>.

10. Meng L., Ding J., Li X., Cao G., Li Y., Zhang D. Novel shape control system of hot-rolled strip based on machine learning fused mechanism mode. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 255. Article № 124789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124789>.

11. Xu S., Gao J., Huang Y., Cao R., Wang S., Zhao H., Wu G., Wu G., Zhang C., Mao X. Effect of hot rolling process on the microstructure and mechanical properties of a high-strength strip casting microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. Vol. 914. P. 147130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147130>.

12. Chaudhary A., Biswas S., Prince R., Pal A. Failure analysis of bullnose refractory in reheating furnace of Hot Strip Mill. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 60. Pp. 341–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.042>.

13. Laurinen P., Rönning J. An adaptive neural network model for predicting the post roughing mill temperature of steel slabs in the reheating furnace. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 168 (3). Pp. 423–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.12.002>.

14. Panjkovic V. Model for prediction of strip temperature in hot strip steel mill. *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27 (14–15). Pp. 2404–2414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.009>.

15. Зінченко Ю. А., Пісмарьов К. Є., Курпе О. Г., Бердник В. П., Ізотов Б. В., Лаштун А. І., Кшевицька Т. С., Негрій С. Д., Чабан В. В. Кришка рекуперативного нагрівального колодязя: пат. 109260 Україна. МПК C21D 9/70. № и 2015 12829; заявл. 25.12.2015; опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16.

16. Зінченко Ю. А., Пісмарьов К. Е., Курпе О. Г., Мурашкін О. В., Васильченко С. Є., Горбачов І. А., Чаленко О. Г., Бердник В. П., Ізотов Б. В., Лаштун А. І., Негрій С. Д., Кочура О. О. Спосіб

редукування безперервнolitих заготовок: пат. 109976 Україна. МПК В21В 1/02. № у 2016 00859; заявл. 08.02.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18.

17. Зінченко Ю. А., Пісмарьов К. Е., Курпе О. Г., Негрій С. Д., Медведєв В. В., Ізотов Б. В., Лаштун А. І., Коткова О. Ю. Методична штовхальна піч: пат. 113959 Україна. МПК F27В 9/00, F27В 9/10, F27В 9/20, F27В 9/22, F27В 9/28. № у 2016 08057; заявл. 20.07.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. № 04.

18. Yunbo X., Yongmei Y., Xianghua L., Guodong W. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels. *Journal of University of Science and Technology, Beijing*. 2008. Vol. 15. Pp. 396–401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).

19. Korczak P., Dyja H. Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 109. Pp. 112–119. ПІІ: S0924-0136(00)00784-6.

20. Xiangwei K., Liangyun L. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. Pp. 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.

21. Bhadeshia S. H. Thermomechanical treatment of steels. *Microstructure and Properties (Fourth edition)*. 2017. Pp. 271–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.

22. Carretero Olalla V., Bliznuk V., Sanchez N., Thibaux P., Kestens L. A.I., Petrov R. H. Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters. *Materials Science & Engineering: A*. 2014. Vol. 604. Pp. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>.

23. Zhao J., Hu W., Wang X., Kang J., Cao Y., Yuan G., Di H., Misra R. D.K. A novel thermo-mechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560 MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling. *Materials Science & Engineering: A*. 2016. Vol. 673. Pp. 373–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.089>.

24. Zhao J., Hu W., Wang X., Kang J., Yuan G., Di H., Misra R. D. K. Effect of microstructure on the crack propagation

behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling. *Materials Science & Engineering: A*. 2016. Vol. 666. Pp. 214–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.073>.

25. Tan W., Liu Z. Y., Wu D., Wang G. D. Artificial neural network modeling of microstructure during C-Mn and HSLA plate rolling. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009. Vol. 16 (2). Pp. 80–83. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60032-7).

26. Dong R. F., Sun L. G., Liu Z., Wang X. L., Liu Q. Y. Microstructures and properties of X60 grade pipeline strip steel in CSP plant. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2008. Pp. 71–75. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60035-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60035-7).

27. Gervasyev A., Carretero Olalla V., Sidor J., Sanchez Mouriño N., Kestens L. A. I., Petrov R. H. An approach to microstructure quantification in terms of impact properties of HSLA pipeline steels. *Materials Science & Engineering: A*. 2016. Vol. 677. Pp. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.043>.

28. Liu G., Li Y., Liao T., Wang S., Lv B., Guo H., Huang Y., Yong Q., Mao X. Revealing the precipitation kinetics and strengthening mechanisms of a 450 MPa grade Nb-bearing HSLA steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 884. P. 145506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145506>.

29. Лівшиц Д. А., Зінченко Ю. А., Шахпазов Є. Х., Матросов Ю. І., Ганошенко І. В., Гоман С. В., Шалімов С. Я., Кумуржи Є. В., Володарський В. В., Лоскутов О. Ю., Койфман О. А., Курпе О. Г. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів: пат. 98214 Україна. МПК В21С 37/08, В21В 1/32, С22С 38/00, С21D 8/02, С21D 8/10, В23К 9/025. № а 201011473; заявл. 27.09.2010; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

30. Лівшиц Д. А., Зінченко Ю. А., Шахпазов Є. Х., Матросов Ю. І., Ганошенко І. В., Гоман С. В., Шалімов С. Я., Кумуржи Є. В., Володарський В. В., Лоскутов О. Ю., Койфман О. А., Курпе О. Г. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів: пат. 96097 Україна. МПК В21С 37/08, С22С 38/00, С21D 1/00,

B21B 1/22, B23K 9/00. № а201011469; заявл. 27.09.2010; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

31. Ghosh S., Mula S. Thermomechanical processing of low carbon Nb–Ti stabilized microalloyed steel: microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 646. Pp. 218–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.072>.

32. Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichyk A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 466. 142675. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142675>.

33. Курпе О. Г., Кухар В. В., Шебаніц О. М. Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА». *Машини і пластична деформація металу* : тези IV Міжнар. наук.-техн. конф., Дніпровський державний технічний університет НТУ «Дніпровська політехніка». Кам'янське – Дніпро, 2018. С. 22–23.

34. Kurpe O., Kukhar V., Shebanitc O. Development of pilot batch and grade estimation of coils of steel grade S355MC at rolling mill “1700”, PJSC “ILYICH IRON AND STEEL WORKS”. *Physical & Chemical Geotechnologies – 2018: Materials of the International Scientific & Practical Conference (Program of report)*. Дніпро, 10–11 жовтня 2018 р. С. 107–109.

35. Курпе О. Г., Кухар В. В., Шебаніц О. М. Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА». *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки), Тематичний випуск Машини і пластична деформація металу*. Кам'янське. С. 36–44.

36. Курпе О. Г., Кухар В. В. Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC на широкосмуговому стані 1700. *Проблеми трибології = Problems of Tribology*. 2018. № 3. С. 61–69.

37. Javaheria V., Khodaieb N., Kaijalainen A., Portera D. Effect of niobium and phase transformation temperature on the microstructure and texture of a novel 0.40% C thermomechanically processed steel. *Materials Characterization*. 2018. Vol. 142. Pp. 295–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.056>.

38. Bright G. W., Kennedy J. I., Robinson F., Evans M., Whittaker M. T., Sullivan J., Gao Y. Variability in the mechanical properties and processing conditions of a High Strength Low Alloy steel. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. Pp. 106–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.020>.

39. Tan W., Han B., Wang S. Z., Yang Y., Zhang C., Zhang Y. K. Effects of TMCP parameters on microstructure and mechanical properties of hot rolled economical dual phase steel in CSP. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. Vol. 19 (6). Pp. 37–41. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60124-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60124-1).

40. Tang S., Liu Z. Y., Wang G. D., Misra R. D.K. Microstructural evolution and mechanical properties of high strength microalloyed steels: Ultra Fast Cooling (UFC) versus Accelerated Cooling (ACC). *Materials Science & Engineering: A*. 2013. Vol. 580. Pp. 257–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.016>.

41. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Prysiaznyi A. Thermo-mechanical controlled rolling of hot coils of steel grade S355MC at the wide-strip rolling mill 1700. *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 291. Pp. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.63>.

42. Kurpe O., Kukhar V. Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600. *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium: Collective monograph*. Stalowa Wola, Poland. 2018. Vol. 1. Pp. 281–298. ISBN 978-9934-571-63-3.

43. Зінченко Ю. А., Пісмарьов К. Є., Курпе О. Г., Мурашкін О. В., Васильченко С. Є., Меркулова Н. О., Чаленко О. Г., Негрій С. Д., Куліш С. В. Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності: пат. 110812 Україна. МПК В21В 1/46. № u201603353; заявл. 31.03.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

44. Зінченко Ю. А., Пісмарьов К. Є., Курпе О. Г., Мурашкін О. В., Васильченко С. Є., Меркулова Н. О., Чаленко О. Г., Негрій С. Д., Куліш С. В. Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності: пат. 121374 Україна. МПК В21В 1/46. № u201701785; заявл. 24.02.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.

45. Singh G., Singh P. Effect of process parameters on roll separating force, driving torque and end crop length during grooved hot rolling of SAE 1020 steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 79. Pp. 1003–1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.015>.
46. Quan-Ke P., Qing-da Ch., Tao M., Bing W., Liang G. A mathematical model and two-stage heuristic for hot rolling scheduling in compact strip production. *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 48. Pp. 516–533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.03.067>.
47. Курпе О. Г., Кухар В. В., Змазнєва Є. В. Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля. *Проблеми трибології = Problems of Tribology*. 2018. № 1. С. 78–84.
48. Кухар В. В., Курпе О. Г. Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametall SpA. *Металургічна і гірнорудна промисловість*. 2018. № 2. С. 24–29.
49. Kukhar V., Artiukh V., Prysiaznyi A., Pustovgar A. Experimental research and method for calculation of ‘upsetting-with-buckling’ load at the impression-free (dieless) preforming of workpiece. *E3S Web of Conference (HRC 2017)*. 2018. Vol. 33. Art. № 02031. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.
50. Lenard J. G. Primer on flat rolling. Second edition. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering University of Waterloo, Elsevier Ltd, Canada, Ontario. 2014. 404 p.
51. Ilmer Q., Haeussler S., Missbauer H. Optimal synchronization of the hot rolling stage in steel production. *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52 (13). Pp. 1615–1619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.431>.
52. Lenard J. G. Mathematical and physical modelling of the flat rolling process. *Primer on Flat Rolling*. Elsevier Ltd. 2007. Chapter 3. Pp. 36–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>.
53. Mantyla P., Korhonen R., Jonsson N. G. Improved thickness and shape accuracy with advanced pass scheduling in plate rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 1992. Vol. 34. Pp. 255–263. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90115-9).
54. Yue S. The mathematical modelling of hot rolling of steel. *Metal Forming Science and Practice*. Elsevier Science Ltd. 2002. Chapter 11. Pp. 213–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008044024-8/50011-4>.

55. Galantucci L. M., Tricarico L. Thermo-mechanical simulation of a rolling process with an FEM approach. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. Vol. 92–93. Pp. 494–501. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00242-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00242-3).

56. Hanoglu U., Šarler B. Multi-pass hot-rolling simulation using a meshless method. *Computers and Structures*. 2018. Vol. 194. Pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.08.012>.

57. Wan L., Hu S., Yin Z., Tian W., Li W. Adaptive modeling of rolling force for hot rolled plate based on industrial data. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 129. Pp. 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.08.053>.

58. Старченко Д. І. Динаміка поздовжньої прокатки: навчальний посібник. Київ: ІСДО, 1995. 384 с.

59. Awatade S. M., Suhane R. Effect of roller diameter on the production rate in hot rolling process: Mathematical modeling and experimentation approach. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 58 (2). Pp. 744–748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.460>.

60. Курпе О. Г., Кухар В. В., Присяжний А. Г. Перевірка математичної моделі процесу прокатки на стані Стеккеля щодо умов заводу Feeriera Valsider SpA. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти* : матеріали ІХ Міжнародної технічної конференції. Київ : Київський політехнічний інститут, 2018. С. 152–156.

61. Kuribayashi K., Kayama M., Saitou Y., Iida Y. Automatic profile and flatness control for Steckel mill: Self-tuning mechanism and interactive bender setup. *IFAC Proceedings Volumes*. 2001. Vol. 24 (18). Pp. 149–152. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33197-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33197-X).

62. Курпе О. Г., Кухар В. В. Математична модель зміни температурного поля смуги перед прокаткою на стані Стеккеля. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту* : тези І Міжнародної науково-технічної конференції. Вінниця : ВНТУ, 2019. С. 88–89.

63. Курпе О. Г., Кухар В. В. Оцінка впливу конвекційного теплообміну в розрахунках зміни температурного поля смуги при термомеханічній прокатці. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти* : тези Х Міжнародної

науково-технічної конференції. Київ – Херсон : КПІ ім. Ігоря Сікорського, ХНТУ, 2019. С. 65–66.

64. Курпе О. Г., Кухар В. В. Математичне моделювання зміни температурного поля смуги на стані Стеккеля. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії* : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. Харків, 2019. С. 88–89.

65. Kurpe O. H., Kukhar V. V., Klimov E. S., Chernenko S. M. Improvement of process parameters calculation for coil rolling at the Steckel mill. *Materials Science and Metallurgical Technology II. Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. Pp. 609–614. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609>.

66. Курпе О. Г., Кухар В. В., Присяжний А. Г. Перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. № 3 (84). С. 98–105.

67. Курпе О. Г., Кухар В. В. Вдосконалення математичної моделі зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2019. № 11 (1336). С. 31–35.

68. Linkens D. A., Ibrahim M., Tanyi E. B. Modelling and simulation of a laboratory-scale multipass experimental rolling mill. *IFAC Proceedings Volumes*. 2000. Vol. 33 (22). Pp. 295–300. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37009-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37009-X).

69. Duk M. L. Applications to improve rolling force prediction ability in a plate mill. *Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*. Nancy, France, 2004. Pp. 65–70. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31001-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31001-7).

70. Yuen W. Y. D., Dixon A., Nguyen D. N. The modelling of the mechanics of deformation in flat rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. № 60. Pp. 87–94. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02312-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02312-6).

71. Zhang J. L., Cui Z. S. Prediction of velocity and deformation fields during multipass plate hot rolling by novel mixed analytical-numerical method. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2011. № 18 (7). Pp. 20–27. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60085-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60085-X).

72. Matruprasad R., Surjya K. P., Shiv B. S. Finite element simulation of a cross rolling process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016. Vol. 24. Pp. 283–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.09.012>.

73. Wang M. T., Zang X. L., Li X. T., Du F. S. Finite element simulation of hot strip continuous rolling process coupling microstructural evolution. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2007. Vol. 14 (3). Pp. 30–36. DOI: [https://doi.org/S1016-706X\(07\)60039-9](https://doi.org/S1016-706X(07)60039-9).

74. Hu X. L., Zhao Z., Wang J., Wang Z. D., Liu X. H., Wang G. D. Optimization of holding temperature and holding thickness for controlled rolling on plate mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2006. № 13 (3). Pp. 21–25. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(06\)60055-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60055-1).

75. Qi X. D., Wang T., Xiao H. Optimization of pass schedule in hot strip rolling. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. № 19 (8). Pp. 25–28. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60135-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60135-6).

76. Collins L. E. Processing of niobium-containing steels by Steckel mill rolling. *Niobium: Science and Technology*. Bridgeville, PA, USA: TMS-AIME and Niobium 2001 Limited, 2001. Pp. 527–542.

77. Li X. T., Wang M. T., Du F. S. Coupling thermomechanical and microstructural FE analysis in plate rolling process. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2008. Vol. 15 (4). Pp. 42–50. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60142-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60142-9).

78. Schausberger F., Steinboeck A., Kugi A. Mathematical modeling of the contour evolution of heavy plates in hot rolling. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. Vol. 39. Pp. 4534–4547. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.017>.

79. Pourazizi R., Zadeh Davani R. K., Mohtadi-Bonab M. A., Szpunar J. A. Evolution of microstructure and texture in pipeline steels at different TMCP procedures with regard to hydrogen induced cracking. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (78). Pp. 38741–38754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.232>.

80. Zhuang L. Effect of thermomechanical controlled processing on mechanical properties of 490 MPa grade low carbon cold heading steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009. Vol. 16 (3). Pp. 43–48. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60042-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60042-X).

81. Jingwei Zhao, Zhengyi Jiang. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*. 2018. Pp. 174–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.01.006>.

82. Roccisano A., Nafisi S., Stalheim D., Ghomashchi R. Effect of TMCP rolling schedules on the microstructure and performance of X70 steel. *Materials Characterization*. 2021. Vol. 178. P. 111207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111207>.

83. Jiang J., Wu M., Xu T. T., Bao W., Li Z. H. Study on impact toughness of TMCP and quenched and tempered high strength steels. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. e02795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02795>.

84. Kang J., Liu D., Wang Y., Yuan G., Wang G. A prediction model of brittle crack arrest toughness in TMCP heavy plates. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 32. Pp. 2422–2432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.039>.

85. Xiangwei Kong, Liangyun Lan. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. Pp. 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.

86. Muszka K., Dziejczak D., Madej L., Majta J., Hodgson P. D., Palmiere E. J. The development of ultrafine-grained hot rolling products using advanced thermomechanical processing. *Materials Science & Engineering: A*. 2014. Vol. 610. Pp. 290–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.051>.

87. Mohammad Masoumi, Cleiton Carvalho Silva, Hamilton Ferreira Gomes de Abreu. Effect of crystallographic orientations on the hydrogen-induced cracking resistance improvement of API 5L X70 pipeline steel under various thermomechanical processing. *Corrosion Science*. 2016. Vol. 111. Pp. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.003>.

88. Wei Yu, Gaosheng Li, Qingwu Cai. Effect of a novel gradient temperature rolling process on deformation, microstructure and mechanical properties of ultra-heavy plate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 217. Pp. 317–326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.011>.

89. Xie Bao-Sheng, Cai Qing-Wu, Yun Yang, Li Gao-Sheng, Ning Zhen. Development of high strength ultra-heavy plate processed with

gradient temperature rolling, intercritical quenching and tempering. *Materials Science & Engineering: A*. 2017. Vol. 680. Pp. 454–468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.119>.

90. Hua Jun, Du Lin-Xiu, Dong Ying, Meng Qing-Wang, Misra R. D. K. Effect of Ti variation on microstructure evolution and mechanical properties of low carbon medium Mn heavy plate steel. *Materials Characterization*. 2019. Vol. 152. Pp. 21–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.04.004>.

91. Omale J. I., Ohaeri E. G., Szpunar J. A., Arafin M., Fateh F. Microstructure and texture evolution in warm rolled API 5L X70 pipeline steel for sour service application. *Materials Characterization*. 2019. Vol. 147. Pp. 453–463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.12.003>.

92. Li X.-L., Lei C.-S., Deng X.-T., Wang Z.-D., Yu Y.-G., Wang G.-D., Misra R. D.K. Precipitation strengthening in titanium microalloyed high-strength steel plates with new generation-thermomechanical controlled processing (NG-TMCP). *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 689. Pp. 542–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.010>.

93. Masoumi Mohammad, Herculano Luis Flavio Gaspar, Hamilton Ferreira Gomes de Abreu. Study of texture and microstructure evaluation of steel API 5L X70 under various thermomechanical cycles. *Materials Science & Engineering*. 2015. Vol. 639. Pp. 550–558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.020>.

94. Indrajit Dey, Swarup Kumar Ghosh, Rajib Saha. Effects of cooling rate and strain rate on phase transformation, microstructure and mechanical behaviour of thermomechanically processed pearlitic steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8 (3). Pp. 2685–2698. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.006>.

95. Wang Bingxing, Guo Xitao, Xie Qian, Wang Zhaodong, Wang Guodong. Heat transfer characteristic research during jet impinging on top/bottom hot steel plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 101. Pp. 844–851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.083>.

96. Ohaeri Enyinnaya, Szpunar Jerzy, Fazeli Fateh, Arafin Muhammad. Hydrogen induced cracking susceptibility of API 5L

X70 pipeline steel in relation to microstructure and crystallographic texture developed after different thermomechanical treatments. *Materials Characterization*. 2018. Vol. 145. Pp. 142–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.034>.

97. El-Shenawy Eman, Reda Reham. Optimization of TMCP strategy for microstructure refinement and flow-productivity characteristics enhancement of low carbon steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8 (3). Pp. 2819–2831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.021>.

98. Зінченко Ю. А., Пісмарьов К. Є., Курпе О. Г., Годинський О. А., Левтерова І. А., Олійник В. В. Трубоелектрозварювальний стан. *Патент 113589 Україна: МПК В21С 37/08*. № у 2016 06688; заявл. 21.06.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 03.

99. Lan Liang-yun, Qiu Chun-lin, Zhao De-wen, Gao Xiu-hua, Du Lin-xiu. Dynamic and static recrystallization behavior of low carbon high niobium microalloyed steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2011. Vol. 18 (1). Pp. 55–60. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60011-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60011-3).

100. Natarajan V. V., Challa V. S. A., Misra R. D. K. The determining impact of coiling temperature on the microstructure and mechanical properties of a titanium-niobium ultrahigh strength microalloyed steel: Competing effects of precipitation and bainite. *Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 665. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.007>.

101. Venkatsurya P. K. C., Jia Z., Misra R. D. K., Mulholland M. D., Manohar M., Hartmann Jr. J. E. Understanding mechanical property anisotropy in high strength niobium-microalloyed linepipe steels. *Materials Science and Engineering*. 2012. Vol. 556. Pp. 194–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.078>.

102. Zhang J. M., Sun W. H., Sun H. Mechanical properties and microstructure of X120 grade high strength pipeline steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17 (10). Pp. 63–67. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60185-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60185-9).

103. Wengui Zhao, Meng Chen, Shaohui Chen, Jinbo Qu. Static strain aging behavior of an X100 pipeline steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 550. Pp. 418–422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.095>.

104. Hillenbrand H. G., Gräf M., Kalwa C. Development and production of high strength pipeline steels. *Niobium 2001*. EUROPIPE GmbH. 2001. Pp. 1–29.

105. Gräf M., Schröder J., Schwinn V., Hulka K. Production of large diameter pipes grade X70 with high toughness using acicular ferrite microstructures. *International Conference on Application and Evaluation of High Grade Linepipes in Hostile Environments*. Yokohama, Japan. 2002. Pp. 1–14.

106. Omale J. I., Ohaeri E. G., Tiamiyu A. A., Eskandari M., Mostafijur K. M., Szpunar J. A. Microstructure, texture evolution and mechanical properties of X70 pipeline steel after different thermomechanical treatments. *Materials Science & Engineering: A*. 2017. Vol. 703. Pp. 477–485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.086>.

107. Zhang J. M., Huo C. Y., Ma Q. R., Feng Y. R. NbC-TiN co-precipitation behavior and mechanical properties of X90 pipeline steels by critical-temperature rolling process. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018. Vol. 165. Pp. 29–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.05.007>.

108. Wu J. Y., Wang B., Wang B. X., Misra R. D.K., Wang Z. D. Toughness and ductility improvement of heavy EH47 plate with grain refinement through inter-pass cooling. *Materials Science & Engineering: A*. 2018. Vol. 733. Pp. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.001>.

109. Carretero Olalla V., Bliznuk V., Sanchez N., Thibaux P., Kestens L. A.I., Petrov R. H. Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters. *Materials Science & Engineering: A*. 2014. Vol. 604. Pp. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>.

110. Schaupt T., Schroepfer D., Kromm A., Kannengiesser T. Welding residual stresses in 960 MPa grade QT and TMCP high-strength steels. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 27. Pp. 226–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.006>.

111. Tsay L. W., Chern T. S., Gau C. Y., Yang J. R. Microstructures and fatigue crack growth of EH36 TMCP steel weldments. *International Journal of Fatigue*. 1999. Vol. 21. Pp. 857–864. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00021-3).

112. Huo X. D., Li L. J., Peng Z. W., Chen S. J. Effects of TMCP schedule on precipitation, microstructure and properties of Ti-microalloyed high-strength steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016. Vol. 23 (6). Pp. 593–601. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30093-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30093-0).

113. Masoumi M., Echeverri A. A., Silva C. C., Aguiar W. M., Abreu H. F.G. Improvement of formability and tensile mechanical properties of SAE 970X steel by controlled rolling process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8 (1). Pp. 1353–1365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.024>.

114. Zheng Y., Li N., Li S. Hot-rolled strip laminar cooling process plant-wide temperature monitoring and control. *Control Engineering Practice*. 2013. Vol. 21. Pp. 23–30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.09.004>.

115. Xie H. B., Jiang Z. Y., Liu X. H., Wang G. D., Tieu A. K., Yang M., Manabe K. Application of fuzzy control of laminar cooling for hot rolled strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 187–188. Pp. 715–719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.166>.

116. Imanari H., Inami H. Flexible coiling temperature control system in hot strip mills. *IFAC Proceedings*. 2012. Vol. 45 (23). Pp. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.3182/20120910-3-JP-4023.00013>.

117. Li H. J., Li Z. L., Yuan G., Wang Z. D., Wang G. D. Development of new generation cooling control system after rolling in hot rolled strip based on UFC. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013. Vol. 20 (7). Pp. 29–34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60122-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60122-3).

118. Zhang Y. T., Wang C. Z., Li D. Z., Li Y. Y. Prediction of carbon concentration and ferrite volume fraction of hot-rolled steel strip during laminar cooling. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. 2007. Vol. 20 (4). Pp. 251–257. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(07\)60035-0](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(07)60035-0).

119. Motomura T., Ueda K., Imazeki T., Fukui Y., Yahiro K. Coiler control in endless hot strip rolling. *IFAC Proceedings*. 2005. Vol. 38 (1). Pp. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01688>.

120. Shen S., Guye D., Ma X., Yue S., Armanfard N. Multistep networks for roll force prediction in hot strip rolling mill. *Machine*

*Learning with Applications*. 2022. Vol. 7. Art. № 100245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100245>.

121. Peng W., Liu Z., Yang X., Cao J., Zhang D. Optimization of temperature and force adaptation algorithm in hot strip mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014. Vol. 21 (3). Pp. 300–305.

122. Speicher K., Steinboeck A., Wild D., Kiefer T., Kugi A. Estimation of plate temperatures in hot rolling based on an extended Kalman filter. *Mineral and Metal Processing. 16th IFAC Symposium on Automation in Mining*. August 25–28, 2013. San Diego, California, USA. Pp. 409–414.

123. Sui F., Chen L., Liu X., Wang L., Li S. W. Temperature field analysis and its application in hot continuous rolling of Inconel 718 superalloy. *Acta Metall. Science Direct (Engl. Lett.)*. 2009. Vol. 22 (2). Pp. 81–90.

124. Mori K., Oketani N. Prediction of coiling conditions of plate in coilbox by controlled FEM simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1999. Vol. 39 (3). Pp. 403–413. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00043-1).

125. Yildiz S. K., Fraser Forbes J., Huang B., Zhang Y., Wang F., Vaculik V., Dudzic M. Dynamic modelling and simulation of a hot strip finishing mill. *Applied Mathematical Modelling*. 2009. Vol. 33 (7). Pp. 3208–3225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.10.035>.

126. Kim J., Lee J., Hwang S. M. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. Pp. 1864–1874.

127. Kiuchi (I)M., Yanagimoto J., Wakamatsu E. Overall thermal analysis of hot plate/sheet rolling. *Institute of Industrial Science, The University of Tokyo*. 2000. Tokyo, Japan. Pp. 209–212.

128. Moon C. H., Lee Y. An approximate method for computing the temperature distribution over material thickness during hot flat rolling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. Vol. 55. Pp. 310–315.

129. Chen S., Li W., Liu X. Calculation of rolling pressure distribution and force based on improved Karman equation for hot strip mill. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014. Vol. 89. Pp. 256–263. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2014.09.011](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.09.011)

130. Pal S. K., Linkens D. A. Temperature distribution in steel during hot rolling: pseudo-bond graph view. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2002. Vol. 10. Pp. 69–85.

131. Phaniraj M. P., Behera B. B., Lahiri A. K. Thermo-mechanical modeling of two-phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill. Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 170. Pp. 323–335.

132. Weisz-Patrault D. Coupled heat conduction and multiphase change problem accounting for thermal contact resistance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Pp. 595–606. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.091

133. Weisz-Patrault D., Ehrlicher A., Legrand N. Temperature and heat flux fast estimation during rolling process. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.010

134. Weisz-Patrault D. Inverse three-dimensional method for fast evaluation of temperature and heat flux fields during rolling process. *Symposium on Modelling of Rolling Processes*. France, 2012. Pp. 20–22.

135. Li L., Liu H., Xie H., Zhang T., Tian H., Zhang S., Cai J., Sun L., Liu X., Cao H., Liu T., Jiang Z. Finite element analysis of strip shape regulation ability of work roll shifting in a 4-high hot strip mill. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 131. Pp. 1642–1655. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.106.

136. Jang J. H., Kim Sung-Dae. Evolution from clusters to precipitates in niobium-micro-alloyed ferritic steel: A combined in situ scanning transmission electron microscopy and atomistic study. *Scripta Materialia*. 2024. Vol. 243. 115967. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.115967.

137. Witek S., Milenin A. Numerical analysis of temperature and residual stresses in hot-rolled steel strip during cooling in coils. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18. Pp. 659–668. DOI: 10.1016/j.acme.2017.11.002.

138. Cho H. H., Cho Y. G., Im Y. R., Lee J. K., Kwak J. H., Han H. N. A finite element analysis for asymmetric contraction after coiling of hot-rolled steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. Pp. 907–913. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.003.

139. Saboonchi A., Hassanpour S. Simulation-based prediction of hot-rolled coil forced cooling. *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28. Pp. 1630–1637. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.10.029.

140. Cheng J., Liu Z., Dong H., Gun Y. Analysis of the factors affecting thermal evolution of hot rolled steel during coil cooling. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2006. Vol. 13. № 2. Pp. 139–143. DOI: 10.1016/S1005-8850(06)60031-5.

141. Chowdhury A., Iyyappan R., Majumdar D., Singha A. Structural and spectroscopic characterisations of the surface oxide scales and inclusions present on edge-burst hot-rolled steel coils. *Materials Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 148. Pp. 276–283. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2014.07.044.

142. Wang X., Li F., Yang Q., He A. FEM analysis for residual stress prediction in hot rolled steel strip during the run-out table cooling. *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 37. Pp. 586–609. DOI: 10.1016/j.apm.2012.02.042.

143. Wu D., Zhuang L., Lu H. Effect of controlled cooling after hot rolling on mechanical properties of hot rolled TRIP steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2008. Vol. 15. № 2. Pp. 65–70. DOI: 10.1016/S1006-706X(08)60034-5.

144. Liu J., Zhang Z., Zhu F., Li Y., Manabe K. Effect of cooling method on microstructure and mechanical properties of hot-rolled C-Si-Mn TRIP steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. Vol. 19. № 1. Pp. 41–46. DOI: 10.1016/S1006-706X(12)60045-4.

145. Sumit G., Singh A. K., Mula S., Chanda P., Mahashabde V. V., Roy T. K. Mechanical properties, formability and corrosion resistance of thermomechanically controlled processed Ti-Nb stabilized IF steel. *Materials Science & Engineering: A*. 2017. Vol. 684. Pp. 22–36. DOI: 10.1016/j.msea.2016.12.034.

146. Song Y., Xiao W., Wang F., Li J., Li F., He A., Liu C. A physics guided data-driven prediction method for dynamic and static feature fusion modeling of rolling force in steel strip production. *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 151. 106039. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.106039

147. Świątoniowski A. Interdependence between rolling mill vibrations and the plastic deformation process. *Journal of Materials*

*Processing Technology*. 1996. Vol. 61. № 4. Pp. 354–364. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02271-6

148. Carneiro B. C., Rodrigues S. F., Aranas C. J., Siciliano F., Santos Silva E., Silva Reis G., Miranda J. P., Leal V. S., Jahazi M., Jonas J. J. Retransformation of dynamically induced ferrite during physical simulation of Steckel mill hot rolling. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 5. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.042

149. Bohlin A., Nygren H., Jepsen O. et al. New technologies on Avesta Polarit's Steckel rolling mill. *MPT International*. 2002. № 6. Pp. 56–62. / *Прокатное производство, ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом*. 2003. № 3. Pp. 53–55.

150. Collins L. E., Hamad F., Kostic M., Lawrence T. Production of high strength line pipe steel by Steckel mill rolling and spiral forming. *Frontier Pipe Research Unit, IPSCO*. P. O. Box 1670, 100 Armour Rd, Regina, SK S4P 3C7, Canada. 2013. 17 p.

151. Flávia V. Bragaa D. Pérez Escobarb T. J. Ávila Reish N. J. Lucinda de Oliveirab M. Spangler Andradeb M. Recrystallization of niobium stabilized ferritic stainless steel during hot rolling simulation by torsion tests. *Journal of Materials Research and Technology*. 2016. № 5 (1). С. 92–99.

152. Gray M. Niobium bearing steels in pipeline projects. *Niobium science and technology: Proc. Int. Symposium on Niobium*. Orlando, Florida, 2–5 грудня 2001 р. С. 23–45.

153. Otavio L. Berger D. Djumlija G. Reiter F. Marples A. Berger K. Continuous Steckel mill improvements at ACESITA SA Brazil. *La Revue de Métallurgie*. 2005. С. 583–588. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal:2005175>.

154. Stalheim D. G. Optimisation considerations for new or revamped plate. Steckel mills. *Ironmaking and Steelmaking*. 2009. Vol. 36, № 4. С. 259–264. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/174328109X439252>.

155. Paulo de Oliveira A. Mendonça Gonzalez B. The engineering behind the mechanical properties enhancement on HSLA steels, microalloyed with niobium. Effects of boron and titanium. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9 (4). С. 9372–9379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.075>.

156. Cesconetto Silveira C., José Gomes Landgraf F., Costa Paolinelli S. Effect of primary grain size and nitrogen content on the magnetic properties of a grain-oriented electrical steel obtained by Steckel Mill. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Vol. 503. Pp. 166629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166629>.

157. Knutsen R. D., Parker S.-A. Analysis of microstructure evolution during Steckel Mill rolling of AISI304 stainless steel. *ISIJ International*. 2008. Vol. 48 (2). Pp. 200–207. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.200>.

158. Hinton J. S., Beynon J. H. A laboratory Steckel Mill simulation. *Steel Research International*. 2008. Vol. 79 (4). Pp. 278–286. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200806352>.

159. Xiao B., Yu Y., Hu B., Wang H., Wang W., Liu S., Misra R. D. K., Liu W. On balanced strength and ductility synergy in low alloy steels through multiphase heterostructure involving cumulative process of hot rolling, coiling and tempering. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. Vol. 891. Pp. 145987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145987>.

160. Shimmin E. W., Oxley P. L. B. Steckel rolling of a strain hardening material. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1984. Vol. 26 (3). Pp. 217–223. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(84\)90054-7](https://doi.org/10.1016/0020-7403(84)90054-7).

161. Kukhar V., Kurpe O., Klimov E., Balalayeva E., Dragobetskii V. Improvement of the method for calculating the metal temperature loss on a coilbox unit at the rolling on hot strip mills. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). Pp. 35–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19548>.

162. Курпе О. Г., Кухар В. В. Освоєння виробництва прокату товщиною 1,2 мм на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ПЛІЧА». *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 5 (265). С. 171–175.

163. Rule Note NR 216 DT R09 E. Rules on materials and welding for the classification of marine units. *Bureau Veritas*. January 2017. 260 p.

164. EN 10149-1. Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming. Part 1: General technical delivery conditions. *CEN*. September 2013. 18 p.

165. API SPECIFICATION 5L. Specification for line pipe. Forty-five edition. *American Petroleum Institute (API)*. December 2012. 142 p.
166. ASTM A841/A841M. Standard specification for steel plates for pressure vessels, produced by thermo-mechanical control process (TMCP). *ASTM International, United States*. 2017. 7 p.
167. EN 10025-4. Hot rolled products of structural steels. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels. *CEN*. November 2004. 25 p.
168. EN 10149-2. Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming. Part 2: Delivery conditions for thermomechanically rolled steels. *CEN*. September 2013. 11 p.
169. EN 10025-2. Hot rolled products of structural steels. Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. *CEN*. November 2004. 33 p.
170. EN 10025-1. Hot rolled products of structural steels. Part 1: General technical delivery conditions. *CEN*. November 2004. 32 p.
171. Cochrane R. C. 6 – Phase transformations in microalloyed high strength low alloy (HSLA) steels. *Phase Transformations in Steels. Diffusionless Transformations, High Strength Steels, Modelling and Advanced Analytical Techniques*. 2012. Vol. 2. Pp. 153–212. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857096111.2.153>.
172. Li Y., Li W., Min N., Liu W., Jin X. Effects of hot/cold deformation on the microstructures and mechanical properties of ultra-low carbon medium manganese quenching-partitioning-tempering steels. *Acta Materialia*. 2017. Vol. 139. Pp. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.003>.
173. ДСТУ 8940. Труби сталеві профільні. Технічні умови. ДП “УкрНДНЦ”. 2019. 22 с.
174. ДСТУ 8943. Труби сталеві електрозварні. Технічні умови. ДП “УкрНДНЦ”. 2019. 20 с.
175. ДСТУ 8936. Труби сталеві водогазопроводні. Технічні умови. ДП “УкрНДНЦ”. 2019. 9 с.
176. ASTM A53/A53M. Standard specification for pipe, steel, black and hot-dipped, zinc-coated, welded and seamless. *ASTM International, United States*. March 2012. 39 p.

177. ASTM A500/A500M. Standard specification for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes. *ASTM International, United States*. November 2013. 6 p.

178. Plate mill – power meets precision. *Primetals Technologies*. Available at: <https://www.primetals.com/ru/portfolio/gorjachaja-prokatka-lista/tolstolistovye-stany>.

179. Ian R. Recent applications of the Mulpic plate cooling technology. *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*. 2017. Issue 02. № 2. No. 111. Pp. 62.

180. Laurent D. Hot-flat-product surface inspection – latest developments. *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*. 2017. Issue 02. № 2. Paper number 117. Pp. 67.

181. Andreas J., Bernd L. Through thick and thin with Arvedi ESP. *Metals Magazine. Technology. Linked Casting and Rolling*. 2018. Issue 02. № 2. Pp. 66–73.

182. Hot strip mill – highest performance for new and existing steel mills. *Primetals Technologies*. Available at: <https://www.primetals.com/portfolio/hot-rolling-flat/hot-strip-mill>.

183. Schmoller F. X. The most unique hot-strip mill in the world. *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*. 2017. Issue 02. № 2. Paper number 38. Pp. 63.

184. Jiro H. Mill stabilizing device for reduction of mill vibration in hot rolling. *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*. 2017. Issue 02. № 2. Paper number 108. Pp. 64.

185. Chuanfang Z., Kaixiang P., Jie D. A P-t-SNE and MMEMPM based quality-related process monitoring method for a variety of hot rolling processes. *Control Engineering Practice*. 2019. Vol. 89. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.05.006>.

186. Takashi S., Seigo M., Osamu Y. Development of automatic rolling scheduling system for synchronized operation of casting and hot rolling. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49 (20). Pp. 250–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.129>.

187. Khramshina V. R., Radionov A. A., Kornilov G. P., Odintsov K. E. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.208>.

188. Karandaev A. S., Kornilov G. P., Khramshin V. R., Khramshin T. R. Improving electric power quality within the power supply system of wide-strip hot-rolling mill stand. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. Pp. 2–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.002>.

189. Shokhin V. V., Permyakova O. V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. Pp. 231–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.038>.

190. Joon-Sik S., Duk-Man L., Ill-Soo K., Seung-Gap C. A study on on-line learning neural network for prediction for rolling force in hot-rolling mill. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 164–165. Pp. 1612–1617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.01.009>.

191. Mirko T., Dr. Matthias K., Helmut H., Viktor S. A common vision for excellence. *Metals Magazine. Technology. Hot Rolling*. 2018. Issue 02. № 2. Pp. 74–79.

192. Dr. Bernd L. Broadening the steel markets by direct application of high-quality ESP strip. *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*. 2017. Issue 02. № 2. Paper number 33. Pp. 61.

193. Jungbauer A. Arvedi ESP: The technological contribution for performance optimization. *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*. 2017. Issue 02. № 2. Paper number 34. Pp. 61.

194. Fuquan S., Binglin Z., Dingwei W. The study and development of production synchronized scheduling system of minimizing the cost flow on steelmaking-hot rolling. *IFAC Low Cost Automation. Shenyang, P. R. China*. 1998. Vol. 31. Pp. 169–172. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36380-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36380-2).

195. Ryoji T., Megumi N., Yoshiyuki N., Takashi T., Hiroshi N. Synchronized scheduling method in manufacturing steel sheets. *International Transactions in Operational Research*. 1998. Vol. 5. Pp. 189–199. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-6016\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0969-6016(98)00016-1).

196. ZHAO D., LI C., REN J. Speed synchronization of multiple induction motors with total sliding mode control. *Systems Engineering – Theory & Practice*. 2009. Vol. 29. Pp. 110–117. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1874-8651\(10\)60077-4](https://doi.org/10.1016/S1874-8651(10)60077-4).

197. Steckel & plate steckel mills – specialized solutions based on engineering experience. *Primetals Technologies*. URL: <https://www.primetals.com/portfolio/hot-rolling-flat/steckel-plate-steckel-mills>.

198. Biondi M., Dr. Saliba S., Dr. Harjunkoski I. Production optimization and scheduling in a steel plant: hot rolling mill. *IFAC Proceedings*. 2011. Vol. 44 (1). Pp. 11750–11754. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01157>.

199. Riches P. Rolling into the future by digitalization. *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*. 2017. Issue 02. № 2. Paper number 78. P. 60.

200. Boyd J. D. Steels, high-strength low-alloy. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*. 2002. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01847-7>.

201. Tang J. J., Xiong Y., Zha X. Q., Du X. J., Li Y., Ren F. Z., Wang S. Effect of warm rolling on microstructure evolution and mechanical properties of a Ni–W–Co–Ta medium-heavy alloy. *Materials Characterization*. 2024. Vol. 218. Pp. 114591. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114591>.

202. Cuddy L. J. Accelerated cooling of steel. *TMS of ASME*. Warrendale (PA). 1986. Pp. 235–243.

203. Xu J., Li B., Qi F. Effect assessment of charging conditions on energy consumption and slab heating quality in an industrial-scale reheating furnace. *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 265. Pp. 125565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125565>.

204. Pavlina E. J., Van Tyne C. J., Speer J. G. Effects of combined silicon and molybdenum alloying on the size and evolution of microalloy precipitates in HSLA steels containing niobium and titanium. *Materials Characterization*. 2015. Vol. 102. Pp. 35–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.013>.

205. Gallager R. H. Finite element analysis. Fundamentals. *Prentice-Hall, Inc*. Endlewood Cliffs, New Jersey. 1975. 416 pp.

206. Ottosen N., Petersson H. Introduction to the finite element method. *Prentice-Hall*. 1992. 422 pp.

207. Gao H., Li H., Jin S., Qin Y., Cao J., Luan F., Zhang D. Strip deviation analysis and prediction based on time series methods in hot

rolling process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 131. Pp. 1143–1157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.012>.

208. Василевський О. В. Вдосконалення процесів протяжки круглих валів у комбінованих бойках на гідравлічних пресах : дис. к-та. т. наук : 05.03.05. *Державний вищий навчальний заклад «Приазовський держ. техн. ун-т»*. Маріуполь. 2016. 276 с.

209. De Boor C. Subroutine package for calculating with B-splines. *Techn. Rep. LA-4728-MS, Los Alamos Sci. Lab.* Los Alamos NM. 1971. 121 pp.

210. Boehm W. Inserting new knots into B-spline curves. *Computer Aided Design*. 1980. Vol. 12. Pp. 199–201. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(80\)90154-2](https://doi.org/10.1016/0010-4485(80)90154-2).

211. Cox M. G. The numerical evaluation of B-splines. *IMA Journal of Applied Mathematics*. 1972. Vol. 10 (2). Pp. 134–149. DOI: <https://doi.org/10.1093/imamat/10.2.134>.

212. Vidilli A. L., Machado I. F., Edalati K., Hirata Ventura C. E., Coimbrão D. D., Zepon G., Botta W. J., Bolfarini C., Koga G. Y. Ultrafine wear-resistant TWIP steel via severe plastic deformation. *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 43. Pp. 111566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111566>.

213. Lippman H. *Bande-Blanche-Roche*. 1962. Vol. 3. Pp. 374–383.

214. Shao J. *Mathematical Statistics*. Springer Science & Business Media. 2008. 592 pp. ISBN 978-0-387-21718-5.

215. Kannan D., Lakshmikantham V., eds. *Handbook of Stochastic Analysis and Applications*. M. Dekker. New York. 2002. ISBN 0824706609.

216. Freedman D. A. *Statistical Models: Theory and Practice*. Cambridge University Press. 2005. ISBN 978-0-521-67105-7.

217. Lu B., Chen D., Chen G., Yu W. An energy apportionment model for a reheating furnace in a hot rolling mill – A case study. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 112. Pp. 174–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.080>.

218. Chen W. H., Chung Y. C., Liu J. L. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 32 (5). Pp. 695–706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.019>.

219. Chakravarty K., Mondal S., Kundu R. Improving the energy efficiency in a walking hearth type reheating furnace by energy balance method and optimizing the resources. *Measurement: Energy*. 2024. Vol. 3. Pp. 100010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meaene.2024.100010>.

220. Jacob A., Sobotka E., Povoden-Karadeniz E. Thermodynamic modeling of multicomponent MX phases (M= Nb,Ti,V; X=C,N) in steel. *Calphad*. 2025. Vol. 88. Pp. 102795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2024.102795>.

221. Курпе О. Г., Кухар В. В. Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Матеріалознавство*. 2020. Вип. 2 (121). С. 122–128. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.122-128.

222. Boretto F., Borbasa R., Yue S., Jonas T. J. *Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials*. Isis, Tokyo. 1988. 49 p.

223. Shin S. Y., Hwang B., Lee S., Kim N. J., Ahn S. S. Correlation of microstructure and Charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2007. Vol. 458 (1–2). Pp. 281–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.097>.

224. Eskandari H., Reihanian M., Alavi Zaree S. R. Constitutive modeling, processing map optimization, and recrystallization kinetics of high-grade X80 pipeline steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 33. Pp. 2315–2330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.217>.

225. Gao R., Xing B., Yang C., Jiang X., Shang J., Hua Z. Synergic effects of temperature and pressure on the hydrogen diffusion and dissolution behaviour of X80 pipeline steel. *Corrosion Science*. 2024. Vol. 240. Pp. 112468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112468>.

226. Wang C., Di X., Dai L., Li S., Zhao H., Wang J., Deng C., Cui S., Li C. Effect of strain aging on mechanical properties and engineering critical assessment of X80 girth weld metal. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023. Vol. 206. Pp. 105071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105071>.

227. Кухар В. В., Курпе О. Г. Фізичне моделювання силових процесів чорнової гарячої прокатки. *Вчені записки Таврійського*

національного університету імені В. І. Вернадського. *Технічні науки*. 2020. № 3. Т. 31 (70). С. 185–190. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/29>.

228. Кухар В. В., Курпе О. Г. Визначення реологічної подоби свинцю та сталей для плоскої гарячої прокатки. *Збірник наукових праць національного гірничого університету. Матеріалознавство та галузеве машинобудування*. 2020. № 61. С. 153–162. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.153>.

229. Chen S., Liu C., Lin S. Modelling and industrial experiment on the dynamic deviation of rolling force during high precision rolling process. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 110. Pp. 37–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.09.106>.

230. Kurpe O., Kukhar V. Investigation of the hot rolling process at the Steckel mill by means of modeling by the finite-element method. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2020. № 2 (98). Pp. 68–79. DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2020.02](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02).

231. Курпе О. Г., Кухар В. В. Визначення умов проникнення деформації по товщині прокату на стані Стеккеля. *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА*. Краматорськ : ДГМА, 2020. № 1 (50). С. 249–258.

232. Курпе О. Г., Кухар В. В. Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*. 2018. № 3. Т. 29 (68). С. 121–126.

233. Kurpe O. H., Kukhar V. V. Development and optimization of flat products manufacturing at rolling mill 3200. *Materials Science and Metallurgical Technology. Materials Science Forum*. 2018. Vol. 946. Pp. 794–799. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.794>.

234. Зінченко Ю. А., Пісмарьов К. Є., Курпе О. Г., Змазнева Є. В. Спосіб визначення параметрів прокатки рулонів на стані Стеккеля. *Пат. 117875 Україна: МПК В21В 1/26 (2006.01)*, № u 2017 01099; заявл. 06.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

235. Лівшиц Д. А., Третьяков О. Б., Шахпазов Є. Х., Матросов Ю. І., Гоман С. В., Кумуржи Є. В., Володарський В. В., Багмет О. О., Курпе О. Г., Койфман О. А., Ганошенко І. В.

Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної контрольованої прокатки. Пат. 54343 Україна: МПК В21В 1/22, С21D 1/00, С22С 38/00, № u 2010 03966; заявл. 06.04.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

236. Курпе О. Г. Проектування технології виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу “FERRIERA VALSIDER” (ІТАЛІЯ). *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 6. Т. 2. С. 53–59.

237. Kukhar V. V., Kurpe O. H., Klimov E. S., Prysiazhnyi A. H., Anishchenko O. S. Research and Improvement of Rolling Parameters at the Steckel Mill. *Intellectual capital is the foundation of innovative development innovative engineering and technology, informatics*. Monographic series “European Science”. Book 3. Part 3. ScientificWorld-NetAkhatAV, Karlsruhe, 2020. ISSN 2709-2313. Pp. 60–78. DOI: 10.21893/2709-2313.2020-03-03-052.

238. Jiang Z. Y., Tang J., Sun W., Tieu A. K., Wei D. Analysis of tribological feature of the oxide scale in hot strip rolling. *Tribology International*. 2010. Vol. 43. Pp. 1339–1345. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.12.070.

239. Jae-min Lee, Wooram Noh, Deuk-Jung Kim, Myoung-Gyu Lee. Spallation analysis of oxide scale on low carbon steel. *Materials Science & Engineering A*. 2016. Vol. 676. Pp. 385–394. DOI: 10.1016/j.msea.2016.09.012.

240. Kurpe O., Kukhar V. Developing of Manufacturing Technology for Hot Rolling Coils (Steel Grade S355MC) at the Wide-Strip Rolling Mill 1700. *Scientific development and Achievements*. Science publishing London, 2018. Vol. 5. Pp. 260–270. ISBN 978-1-9993071-0-3.

241. Lenard J. G., Malinowski Z., Pietrzyk M. Comparison of the predictive capabilities of mathematical models of the flat rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 1992. Vol. 34 (1–4). Pp. 85–92. DOI: 10.1016/0924-0136(92)90093-8.

242. Курпе О. Г., Кухар В. В., Захаров М. П., Пертiк Д. І. Розробка та відпрацювання технології термомеханічної контрольованої прокатки рулонної сталі за європейськими стандартами. *Університетська наука – 2019* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. Маріуполь : ПДТУ 2019. Т. 1. С. 39–41.

243. Курпе О. Г., Кухар В. В., Мирвода К. Ю., Пертiк Д. І., Захаров М. П. Досягнення показників якості рулонного

металопрокату зі сталей за європейськими стандартами, що вироблені в умовах НШПС 1700. *Університетська наука – 2019* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Маріуполь : ПДТУ, 2019. Т. 1. С. 41.

244. Wan L. W., Zhang S. H., Yin Z. Q., Tian W. H., Li W. G. Adaptive modeling of rolling force for hot rolled plate based on industrial data. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 129. Pp. 253–260. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.08.053

245. Курпе О. Г., Кухар В. В., Шебаніц О. М. Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів із марки сталі В для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-L на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). № 6. Ч. 2. С. 56–63.

246. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Chernenko S., Balalayeva E. Implementation of pipe steel grade X52M manufacturing according to API-5L requirements applied to hot rolling mills “1700”. *The Innovation Exchange: 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing. Book of Abstracts*. Lutsk, June 11–14, 2019. Lutsk, Ukraine, 2019. Pp. 101.

247. Курпе О. Г., Кухар В. В., Шебаніц О. М. Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки X52M для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-5L на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*. 2018. Вип. 5 (112). С. 65–74.

248. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Chernenko S., Balalayeva E. Implementation of pipe steel grade X52M manufacturing according to API-5L requirements applied to hot rolling mills “1700”. *2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. Lutsk, Ukraine: Springer Nature Switzerland AG, 2020. Pp. 418–429. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6\_42

249. Лівшиц Д. А., Третьяков О. Б., Ковура О. Б., Зінченко Ю. А., Кумуржи Є. В., Чубань А. М., Койфман О. А., Курпе О. Г., Змазнева Є. В. Спосіб нагрівання і підготовки заготовок перед прокаткою у станах гарячої прокатки. *Пат. 92950 Україна*:

МПК C21D 9/00, F27B 9/00, F27B 9/30, F27D 3/00, № а 2009 00161; заявл. 09.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24.

250. Лівшиц Д. А., Третьяков О. Б., Шахпазов Є. Х., Матросов Ю. І., Гоман С. В., Ганошенко І. В., Кумуржи Є. В., Володарський В. В., Курпе О. Г., Койфман О. А., Чубань А. М. Спосіб виробництва прокату методом нормалізуючої прокатки. Пат. 56651 Україна: МПК C21D 8/00, B21B 1/22, C22C 38/00, № у 2010 07248; заявл. 11.06.2010; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.

251. Лівшиц Д. А., Третьяков О. Б., Шахпазов Є. Х., Матросов Ю. І., Гоман С. В., Ганошенко І. В., Кумуржи Є. В., Володарський В. В., Курпе О. Г., Койфман О. А., Очеретін В. М. Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки. Пат. 54506 Україна: МПК C21D 3/00, C21D 1/00, № у 2010 06311; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

252. Лівшиц Д. А., Третьяков О. Б., Шахпазов Є. Х., Матросов Ю. І., Гоман С. В., Ганошенко І. В., Кумуржи Є. В., Володарський В. В., Курпе О. Г., Койфман О. А., Очеретін В. М. Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки. Пат. 54507 Україна: МПК C21D 3/00, C21D 1/00, № у 2010 06313; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

253. Ming-Xiang Xiong, Peng-Wei Pi, Wei Gong, Min-Feng Yang, Zheng-Feng Ou. Mechanical properties of TMCP high strength steels with different strength grades at elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 48. 103874. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103874

254. Mandal G., Ghosh S. K., Chatterjee S. Effects of TMCP and QT on microstructure and properties of ultrahigh strength steel. *Materials Proceedings*. 2019. Vol. 18 (7). Pp. 5196–5201. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.519

255. Курпе О. Г. Термомеханічна прокатка товстих листів зі сталі марки ЕН36 на стані 3600 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ». *Обробка матеріалів тиском: зб. наук. праць*. Краматорськ : ДГМА, 2018. № 2 (47). С. 146–155.

256. Лівшиц Д. А., Ковура О. Б., Зінченко Ю. А., Ганошенко І. В., Койфман О. А., Володарський В. В., Курпе О. Г., Капланов В. І. Спосіб визначення параметрів прокатки товстих

листів. Пат. 41713 Україна: МПК В21В 1/26, № u 2008 11407; заявл. 22.09.2008; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.

257. Kurpe O. H., Kukhar V. V. Pilot production development of plate, steel grade EN36 applying thermo-mechanical controlled process at the rolling mill 3600. *Проблеми трибології = Problems of Tribology*. Хмельницький, 2019. Vol. 92. № 2. С. 33–41.

258. ДСТУ ISO 9000:2015 (ISO 9001:2015, IDT). Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів [Чинний від 2016–07–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 45 с.

259. ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). Системи управління якістю. Вимоги. [Чинний від 2016–07–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 22 с.

260. Shingo S. A study of the Toyota production system, engineering viewpoint. 1989. 296 p.

261. Ohno T. *Toyota Production System Beyond Large-Scale Production*. Productivity Press, 2019. 176 p. DOI: 10.4324/9780429273018

262. Превентивне керування якістю. ДМКД [Електронний ресурс]. URL: <http://www.dmkd.dp.ua/4316>

263. Система управління якістю. Металургійний комбінат «АЗОВСТАЛЬ» [Електронний ресурс]. URL: <https://azovstal.metinvestholding.com/ua/activity/quality/control>.

264. Якість. Маріупольський МК ІМ. ІЛІЧА [Електронний ресурс]. URL: <https://ilyichsteel.metinvestholding.com/ua/activity/quality>

265. Запоріжсталь сьогодні. Запоріжсталь [Електронний ресурс]. URL: <https://www.zaporizhstal.com/pidpriyemstvo/>

266. ДСТУ ISO 8258-2001 (ISO 8258:1991, IDT). Статистичний контроль. Контрольні карти Шухарта [Чинний від 2003–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 32 с.

267. Курпе О. Г., Кухар В. В., Присяжний А. Г. Удосконалення та апробація методології керування якістю листового металопрокату. *Обробка матеріалів тиском* : зб. наук. праць. Краматорськ : ДГМА, 2020. № 1 (50). С. 228–235.

268. Як в Метінвесті розробляють нові продукти. *METINVEST* [Електронний ресурс]. URL: <https://metinvestholding.com/ru/media/news/how-metinvest-develops-new-products>

269. *METINVEST*. [Електронний ресурс]. URL: <https://metinvestholding.com>.

270. Курпе О. Г., Кухар В. В. Варіант модернізації стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2018. № 23 (1299). С. 33–38.

271. Кухар В. В., Курпе О. Г., Захаров М. П., Калатало А. В. Недоліки та перспективи розвитку технології та устаткування широкосмугових станів гарячої прокатки. *Університетська наука – 2020* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Маріуполь : ПДТУ, 2020. Т. 1. С. 56–57.

272. Курпе О. Г., Кухар В. В. Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 ПрАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. Вип. 37. С. 29–34.

273. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric motors power modes at synchronization of roughing rolling stands of hot strip mill. *25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2020. Pp. 510–513. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240818.

НОТАТКИ

---

---

*Наукове видання*

**КУРПЕ** Олександр Геннадійович  
**КУХАР** Володимир Валентинович

# **МОДЕРНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВ ТА КРАЩІ ПРАКТИКИ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ ПЛОСКОЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ**

**Монографія**

Друкується за авторською редакцією

Дизайн обкладинки В. Савельєва  
Технічний редактор О. Гринюк  
Верстка Ю. Семенченко



Підписано до друку \_\_\_\_\_ р.  
Формат 60×84/16. Папір офсетний.  
Цифровий друк. Гарнітура Times.  
Ум. друк. арк. 20,81. Наклад 300.  
Замовлення № 0225-003.

Видавництво та друк: Олді+  
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1  
тел.: +38 (095) 559-45-45, e-mail: office@oldiplus.ua  
Свідоцтво ДК № 7642 від 29.07.2022 р.

Замовлення книг:  
тел.: +38 (050) 915-34-54, +38 (068) 517-50-33  
e-mail: book@oldiplus.ua

