

УДК 669.01, 621

№ держреєстрації 0122U201187

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з науково-дослідної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»



Володимир КУХАР
«29» червня 2023 року

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
«Керування показниками енергозбереження металургійних агрегатів та
якості металопродукції на завершальних
переділах металургійного циклу »

(остаточний)

Науковий керівник, д.т.н., професор

Володимир КУХАР
«26» червня 2023 року

2023

Рукопис закінчено «26» червня 2023 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», протокол
№ 10 від «29» червня 2023 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,
д-р техн. наук, професор



Володимир КУХАР
(вступ, розділи 1-2,
висновки)

Відповідальний виконавець,
канд. техн. наук



Христина МАЛІЙ
(вступ, п. 1.1, 1.3,
висновки)

Відповідальний виконавець,
канд. техн. наук, доцент



Максим ШТОДА
(вступ, п. 2.3, висновки)

Виконавець, д-р техн. наук,
професор



Едуард ГРИБКОВ
(п. 2.2)

Виконавець, д-р техн. наук,
професор



Костянтин НІЗЯЄВ
(п. 1.1)

Виконавець, канд. техн.
наук, доцент



Олександр СТОЯНОВ
(п. 1.1)

Виконавець,
ст.гр. 136С-22-1м



Філіп ХАРЧУК
(п. 1.3)

Виконавець,
ст.гр. 136С-22-1м



Максим САВЕНОК
(п. 1.2)

Виконавець,
ст.гр. 136П-22-1м



Андрій ПОЖИДАЄВ
(п. 1.2 узагальнення
результатів)

Виконавець,
ст.гр. 132-22-1м



Олександр СПІЧАК
(п. 1.1 узагальнення
результатів)

РЕФЕРАТ

ЗВІТ про НДР: 77 с., 98 джерел.

Ключові слова: металургійні процеси та агрегати, якість металопродукції, сталеплавильне виробництво, рафінування сталі, прокатка, енергоспоживання.

Об'єкт дослідження – металургійні агрегати та технологічні процеси металургійного прокатного виробництва.

Мета роботи – зменшення енергоспоживання металургійних агрегатів та підвищення та якості металопродукції на завершальних переділах металургійного циклу.

Предмет дослідження: показники енергозбереження та параметри якості металопродукції на завершальних переділах металургійного циклу.

Результати та їх новизна: узагальнення інформації з наявних та нових вогнетривких матеріалів, рекомендації з використання диференційного футерування з підвищеними експлуатаційними характеристиками; вперше розроблено методики оцінки енергосилових параметрів при холодній прокатці з емульсолами в умовах прокатки на 4-х клітьовому стані з використанням емульсолу «Quakerol»; вперше розроблено методологію керування якістю прокатної продукції; вперше розроблено таблицю для вибору швидкісного режиму прокатки з урахуванням температури підкату при виробництві круглих профілів.

Назва продукції: рекомендацій з розробки металургійних процесів та агрегатів сталеплавильного виробництва, методики керування якістю прокату, практичні рекомендації з підвищення продуктивність прокатних станів.

Опис продукції: Узагальнення рекомендацій з розробки металургійних процесів та агрегатів сталеплавильного виробництва; на прикладі ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» розглянуто раціональність застосування автоматизованих систем контролю та керування, систем штучного інтелекту при розпізнаванні та обробці візуальної та звукової інформації; розроблено методики оцінки енергосилових параметрів при холодній прокатці з емульсолами, вперше встановлені закономірності впливу технологічних умов прокатки на 4-х клітьовому стані з

використанням емульсолу «Quakerol» на енергосилові параметри прокатки; вперше розроблено методологію керування якістю прокатної продукції, в основу якої покладено комплекс методів статистичної обробки даних, зв'язків між технологічними параметрами прокатки та механічними властивостями готового ТМСП прокату; вперше на основі експериментальних досліджень розроблено таблицю для вибору швидкісного режиму прокатки з урахуванням температури підкату при виробництві круглих профілів діаметром від 40 до 110 мм, що дозволило підвищити продуктивність стану.

Інформація щодо впровадження – впроваджено в навчальний процес ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» за спеціальністю 136 Металургія ОПП «Металургія сталі» та ОПП «Сучасні технології прокатного виробництва», дисципліни професійного ядра «Рециклінгові технології та підвищення енергоефективності виробництва сталі», «Наукові основи поєднання процесів лиття та прокатки», «Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному виробництві» та «Сучасні техніко-технологічні аспекти прокатного виробництва».

Рекомендації щодо використання – на підставі отриманих результатів

Сфера застосування: металургійні підприємства сталеплавильного та прокатного виробництва, навчальний процес, науково-дослідна робота.

Соціально-економічна спрямованість: Металургія.

Умови одержання ЗВІТУ: доступ за запитом.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТА АГРЕГАТІВ З ВИРОБНИТЦВА СТАЛІ	7
1.1. Підвищення ефективності застосування вогнетривких матеріалів для сталерозливного ковшу	7
1.2. Пошук ефективних рішень з відсікання шлаку при випуску сталі з кисневого конвертеру	16
1.3. Моделювання процесу переробки ванадієвого чавуну в конверторі газокисневого рафінування	20
2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТА УСТАТКУВАННЯ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА	22
2.1. Енергоспоживання та витрати емульсолу при холодній прокатці смуг безперервному 4-х клітьовому стані	22
2.2. Розвиток системи керування якістю термомеханічно обробленого товстолистого прокату	29
2.3. Розробка та впровадження температурно-швидкісного режиму прокатки круглих профілів на ТЗС ПрАТ «Камет-Сталь»	47
ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	63
ДОДАТКИ	76

ВСТУП

Однією з необхідних умов розвитку машинобудівних і металургійних підприємств України є забезпечення конкурентоспроможності металопродукції, яка на них виготовляється, за рахунок підвищення якісних показників та зниження собівартості продукції за рахунок економії енергоносіїв. У машинобудуванні і металургії широко розповсюджені процеси прокатки листового матеріалу, оптимізація яких дозволить підвищити конкурентоспроможність металопродукції.

Актуальною науково-технічною проблемою є розробка технологій, які забезпечать підвищення якісних характеристик як металопродукції на всіх металургійних переділах, так і навантажених елементів системи охолодження металургійних агрегатів на основі отримання прогнозованого хімічного і фазово-структурного складу сталей, геометрії виробів, інструменту та підвищення використання ресурсу пластичності металу при деформації.

Крім того, є необхідним розробка системних підходів до превентивного керування якістю термомеханічно обробленого товстолистого прокату.

Розробка рекомендацій з підвищення якості листового прокату на етапі правки на основі уточнених математичних моделей та на етапах отримання виробів з листа для забезпечення потрібного рівня допусків і механічних властивостей.

1. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТА АГРЕГАТІВ З ВИРОБНИТЦВА СТАЛІ

1.1. Підвищення ефективності застосування вогнетривких матеріалів для сталерозливного ковшу

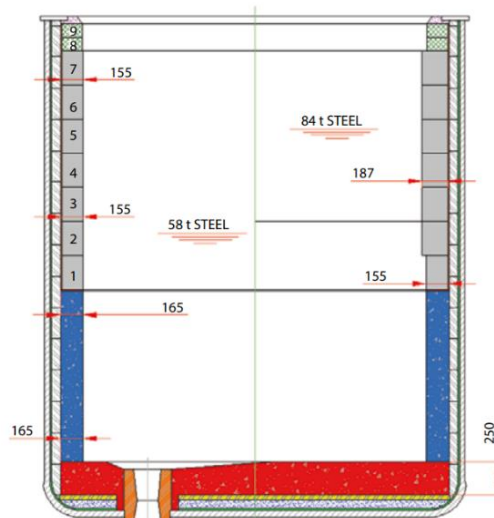
Стрімкий розвиток на металургійних підприємствах позапічної обробки та пов'язане з цим перенесення частини операцій з плавильного агрегату до сталерозливного ковша призвело до того, що ківш став одним з основних технологічних агрегатів. Внаслідок цього суттєво збільшилася тривалість перебування рідкого металу та шлаку в ковші, у зв'язку з чим зросло теплове навантаження на футерування ковша та збільшився його знос. Це послужило імпульсом для інтенсифікації досліджень створення нових вогнетривких матеріалів і використанням диференційної футерування з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Одним із лідерів з виробництва високоякісних матеріалів для футеровок сталеплавильних агрегатів традиційно вважається Японія [1], а також деякі європейські країни, такі як Німеччина, Австрія, Франція [2–5]. Успіхи Японії пов'язані, перш за все, з розробкою монолітних футеровок для сталюковшів (рис. 1.1). У Європі, зокрема в Україні, продовжують домінувати футерування з формованих вогнетривів, хоча надалі не виключена можливість переходу на монолітні футерування через їх більш високу ефективність [6].

Застосування комбінованого футерування (рис. 1.2) викликано різними умовами служби вогнетривів у певних ділянках ковша. Як відомо [7], найбільшому руйнуванню піддаються ділянки футерування в районі шлакового поясу та місці удару струменя по дну ківша, тому доцільно на цих ділянках встановлювати високоякісні вогнетриви, здатні протистояти як хімічній, так і фізичній корозії [9]. Як правило, шлаковий пояс ковша виконується з периклазовуглецевих вогнетривів, а стіни ковша – з високоміцних матеріалів, що мають високу температуру деформації.



а



б

Рис. 1.1 – Сталерозливний ківш з монолітною футерівкою (а) [7] і комбінованою футерівкою (б) [8]

На вітчизняних та закордонних металургійних комбінатах застосовують диференційне футерування сталерозливних ковшів, яке складається з периклазовуглецевих (шлаковий пояс) та алюмопериклазовуглецевих вогнетривів (стіни). Вогнетриви шлакового поясу виготовлені на основі плавленого периклазу чистотою не менше 98%, який має високу опірність як до первинних конвертерних, так і до вторинних ковшових шлаків [12]. Ще однією з переваг даного типу вогнетривів є їх слабка змочуваність шлаком.

Руйнування футерівки в процесі роботи на початковому етапі пов'язане з зневуглицюванням. Подальшою стадією зношування є перехід корунду в шлак при його взаємодії з вапняною, залізистою та силікатною складовими шлакового розплаву [13].

Також застосовують і більш складну схему футерування, яка виглядає наступним чином: днище – алюмопериклазовуглецева (робочий шар у „бійній” частині) та периклазохромітова цегла (в іншій частині); стіни – високоглиноземна набивна маса (робочий шар); шлаковий пояс – периклазовуглецева цегла (робочий

шар). Такий варіант футеровки забезпечує стійкість понад 50 наливів за умов повного циклу позапічної обробки сталі [14].

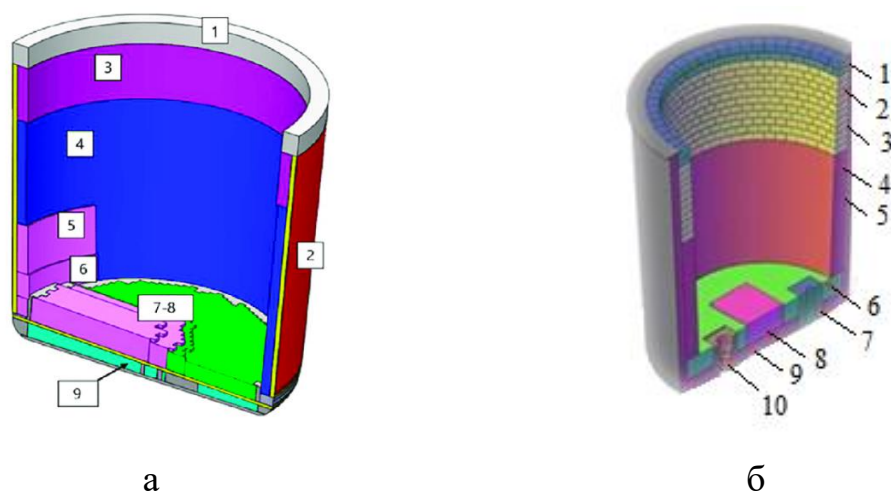


Рис. 1.2 – Варіанти диференційного (комбінованого) футерування ківша:
 (а) – за джерелом [10]: 1 – верхній шар бетону; 2 – боковий теплоізоляційний шар; 3 – шлаковий пояс; 4 – робочий шар; 5–6 – пристінна цегла; 7–8 – донний шар; 9 – нижній теплоізоляційний шар; (б) – за джерелом [11]: 1, 4, 6 – робочий шар; 2 – шлаковий пояс; 3, 5 – боковий теплоізоляційний шар; 7 – блок для подачі газів; 8 – «бійне» місце; 9 – нижній теплоізоляційний шар; 10 – гніздова цегла

Можливе використання спечених периклазовуглецевих вогнетривів при футеруванні сталерозливного ковша [15]. Для футерування ділянки шлакового поясу застосовується крупнокристалічний периклаз з вмістом MgO близько 98%. Для днища ковша застосовують вогнетриви алюмопериклазовуглецевого складу з використанням алюмомагнезійної шпінелі, що містить 28% MgO та 72% Al₂O₃. Застосування цих видів вогнетривів дозволило досягти стійкості стін більше 110 плавок (при використанні гарячих ремонтів) [16].

Деякі закордонні металургійні підприємства для кладки стін використовують формовані Al₂O₃–MgO–C вогнетриви [17]. Вибір таких вогнетривів базується на їхніх службових характеристиках за певних умов експлуатації. Перевага даному

виду футеровки надається, в першу чергу, через нижчі витрати на матеріали та футерування.

Як відомо, на термін служби футерівки сталерозливних ковшів істотно впливає ковшовий шлак, що утворюється під час позапічної обробки металу [18]. Багато сучасних металургійних підприємств до етапу позапічної обробки здійснюють відсікання конвертерного шлаку з подальшою добавкою в ківш легкоплавких синтетичних матеріалів на основі CaO , CaF_2 і, в деяких випадках, Al_2O_3 в різних співвідношеннях. Такі синтетичні шлаки виявляють підвищену агресивність по відношенню до основної футеровки сталерозливних ковшів, тому при виборі складу шлакової суміші прагнуть так підібрати матеріали, щоб зберегти високу здатність рафінування шлаку і, в той же час, знизити його негативний вплив на знос вогнетриву. Наприклад, на деяких вітчизняних підприємствах при використанні на етапі позапічної обробки на установці ківш–піч, для наведення рафінувального шлаку вводять не менше 10 кг/т вапна, 1,5 кг/т плавикового шпату та алюмінію. При використанні шлаку, що містить 0,5–0,8% FeO ; 0,1–0,5% MnO ; 0,9–1,2% $\sum(\text{FeO}+\text{MnO})$, основністю не менше ніж 3,0 та попередньому розкисленні шлаку алюмінієвим дротом або катанкою з витратами близько 1,0 кг/т сталі, були покращені можливості з видалення сірки, а також вдалося значно поліпшити умови служби вогнетривкої футеровки.

На заводі «IPSCO Steel» (США) у конструкцію комбінованої футеровки сталерозливних ковшів були впроваджені глиноземомagneзіальнографітові (Al_2O_3 – MgO – C) вогнетриви, які замінили доломітові вогнетриви, що традиційно використовуються при футеруванні днища та стін. На даному заводі для прискореної десульфурації використовується рідкий шлак з заданими параметрами, які досягаються шляхом додавання вапна з невеликою кількістю плавикового шпату і оксиду магнію. Ковшевий шлак має наступний склад: CaO – 51%; SiO_2 – 4,5%; MgO – 9%; Al_2O_3 – 25%; Fe_2O_3 – 0,5%. При роботі зі шлаком такого складу стійкість доломітового футерування не перевищувала 40–45 плавов. При заміні доломітових вогнетривів на глиноземомagneзіальнографітові цей показник значно покращився і становив у середньому 100 плавов.

Гліноземомагнезіальнографітові вогнетриви не тільки дозволили значно збільшити кампанію ковшів, так і знизити глибину проникнення металу до 5% , що було виявлено при перефутеруванні ковшу [19].

Одним з напрямків футерування сталерозливних ковшів є використання монолітних футеровок. Зокрема, майже на всіх підприємствах Японії стальковші переведені на монолітне футерування.

Прогрес в галузі вогнетривів пов'язаний, перш за все, з розробкою та використанням низькоцементних вогнетривких бетонів [20–22], сфера застосування яких значно зросла в останні роки. Низькоцементні вогнетриви – високоміцні матеріали, що мають підвищену корозійну стійкість. Найбільшого поширення набули глиноземошпінельні вогнетриви, що містять до 20% шпінелі, 95% Al_2O_3 і 1,7% CaO , а також глиноземомагнезіальні, що містять 5,5% MgO і 1,36% CaO з добавкою 0,5% тонкодисперсного кремнезему. Корозійна стійкість глиноземошпінельного бетону підвищується зі збільшенням вмісту шпінелі [23, 24]. При зростанні вмісту шпінелі понад 30% знижується стійкість бетону до взаємодії зі шлаком. У глиноземошпінельних бетонах шпінель додають у вогнетривку суміш, у той час як у глиноземомагнезіальних вогнетривах шпінель утворюється в результаті взаємодії між вільними оксидами Al_2O_3 і MgO . Зміна вмісту оксиду магнію у бік збільшення сприяє підвищенню корозійностійких властивостей з одночасним зниженням здатності протистояти проникненню шлаку, що може призвести до розтріскування футеровки. Для цього необхідно чітко регулювати вміст оксиду MgO з урахуванням умов роботи вогнетривів. Останнім часом намітилася тенденція переходу від глиноземошпінельних до глиноземомагнезіальних бетонів, що пов'язано з більш високою стійкістю останніх до корозії та проникнення шлаку, а також нижчою вартістю [25].

Одним з нових матеріалів, що застосовуються при виробництві монолітних футеровок, є шпінельно–периклазовий бетон, створений японською фірмою «Shinagawa Refractories» [26, 27]. Цей матеріал має приблизно такі ж властивості, як глиноземомагнезіальний, але відрізняється тим, що здатний поєднувати як

підвищену корозійну стійкість, так і протистояти проникненню шлаку завдяки наявності грубозернистої шпінелі [28].

Останнім часом викликає інтерес застосування в сталеплавильному виробництві матеріалів на основі алюмомагнезійної шпінелі, які мають ряд переваг у порівнянні з магнезійними та корундовими матеріалами з точки зору їх експлуатації.

Істотних успіхів у розробці та застосуванні бетонів для монолітного футерування сталерозливних ковшів, що містять шпінель, досягнуто фірмою «Plibrico» (Німеччина). Низькоцементний бетон, що містить 93% Al_2O_3 ; 4,8% MgO ; 1,2% SiO_2 ; 0,5% CaO був застосований для футерування не тільки стін і днища, а й для шлакового поясу. З використанням проміжних ремонтів стійкість футерівки перевищила 500 плавов [29].

Шпінельні бетони з добавкою металевого волокна виявилися придатними і для монолітного футерування днища сталерозливних ковшів. При експлуатації у шлаковому поясі бетони, що містять шпінель, не мають достатньої стійкості до зносу. З метою підвищення стійкості футерування в районі шлакового поясу в Японії розроблені магнезійноцирконові бетони, що містять 84–85% MgO , 6–8% ZrO_2 , що забезпечило підвищені корозійностійкі властивості.

В Австрії активно застосовують монолітне корундове футерування сталерозливних ковшів на основі табулярного глинозему високої якості [30, 31]. Стійкість стінок ковша перевищила 350 плавов при використанні ремонтів у вигляді підливу тієї ж маси. Після видалення формувальних шаблонів (при виготовленні нового футерування) просушка ковша здійснюється протягом 36–48 годин з наступним розігрівом перед початком експлуатації до 1100–1200°C.

Удосконалення магнезійношпінельних вогнетривів, призначених для футерування ковшів, здійснила японська фірма «ТҮК Corp». В першу чергу було досліджено ефективність добавки до магнезійношпінельного матеріалу оксиду титану (TiO_2). Зі збільшенням добавки оксиду титану значно знижувалася пористість вогнетриву, і це стримувало проникнення в нього шлаку. При добавці 2% TiO_2 стійкість футерівки сталерозливного ковша зросла на 10% [32].

Випробування добавки оксиду хрому (Cr_2O_3) у кількості 2 і 3% також викликало зниження пористості. За результатами фізико–механічних досліджень та вивчення структурного розтріскування для промислових випробувань вибрали матеріал із добавкою 3% оксиду хрому (есколайт). Порівняльний хімічний склад вогнетриву робочої поверхні показав, що добавка Cr_2O_3 стримує проникнення шлаку у футеровку. Вдосконалений варіант футеровки дає ефект підвищення стійкості на 25%.

Також, однією з проблем під час експлуатації ковшів з основною футеровкою є висока теплопровідність вогнетривких матеріалів і, як наслідок, виникає необхідність знижувати тепловтрати при використанні таких видів вогнетривів. Завдання зниження втрат теплоти металом в сталерозливному ковші може вирішуватися за кількома напрямками: раціональна схема експлуатації сталерозливних ковшів, теплоізоляція дзеркала металу, використання футерованих кришок в період розливання сталі і запобігання втрат тепла через шар футеровки, прогрівання ковшу на спеціально обладнаних стендах під час очікування плавки.

Регулювання втрат тепла через стінку ковша шляхом підбору теплопровідності шарів футерування або збільшення її товщини обмежується місткістю ковша, а також його додатковими функціями [33].

З метою зниження втрат теплоти зазвичай зменшують товщину арматурного шару та додають шар теплоізоляційного матеріалу між арматурним шаром та металевим кожухом ковша. У Німеччині отримано позитивний результат при застосуванні теплоізоляції з волокнистих плит на неорганічній зв'язці теплопровідністю при 300 і 600 °С – 0,08 і 0,16 Вт/(м·К) відповідно, при товщині плити 12 мм. Однак, у процесі розширення футерування при її нагріванні (на стенді розігріву або під час її експлуатації), ці плити можуть стискатися, і достатнє охолодження футеровки ковшу може призвести до утворення зазору між арматурним та теплоізоляційним шарами. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є застосування міцних ізоляційних плит з об'ємною стабільністю, яка виключає деформацію під дією футеровки, що розширюється [34].

Виміри показали, що в останньому випадку при товщині футеровки 287,5 мм (175 мм периклазовуглецева цегла, 25 мм засипка, 75 мм високоглиноземна цегла

– арматурний шар, 12,5 мм ізоляційна плита) втрати теплоти при використанні такої ізоляції виявилися на 20% меншими, ніж без неї.

З метою зменшення тепловтрат через шар вогнетриву фірмами «Nippon Steel» та «Krosaki Harima» проведені дослідження щодо зниження теплопровідності та підвищення термостійкості периклазовуглецевої цегли. Удосконалення здійснені шляхом зниження вмісту графіту з метою зменшення теплопровідності та шляхом нанесення на магнезійні зерна пекового покриття для покращення термостійкості. Пори, що утворилися в результаті цього, сприяли зниженню напруги, пригнічували зростання тріщин і покращували термостійкість.

Нові периклазовуглецеві вироби з 8% графіту були випробувані в промислових умовах з метою визначення їх впливу на падіння температури рідкої сталі в сталерозливному ковші [35, 36]. Величина зниження температури сталі в період між закінченням випуску металу з конвертера і початком розливу впала приблизно на 17 °С при зменшенні вмісту графіту в вогнетривах від 12 до 8%, що супроводжувалось зниженням теплопровідності від 20 до 15 Вт/(м·К) при 550 °С.

Зведені характеристики вогнетривів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Зведені характеристики вогнетривів

Місце застосування	Назва матеріалу	Склад матеріалу	Стійкість (кількість плавок)	Примітка
1	2	3	4	5
дно ковша	алюмопериклазо– вуглецева цегла	70% Al_2O_3 – MgO – 10% С	понад 50	–
	периклазохромітова цегла	MgO від 60 мас.% включ., Cr_2O_3 від 4 до 20 мас.% включ.		
стіни ковша	високоглиноземна набивна маса	Al_2O_3		
ділянка шлакового поясу	периклазовуглецева цегла	MgO близько 98%		
ділянка шлакового поясу	спечена периклазовуглецева цегла	крупнокристалічний периклаз з вмістом MgO близько 98%	110	–
дно ковша	алюмопериклазо– вуглецевий вогнетрив	28% MgO та 72% Al_2O_3		

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
стіни ковша	глиноземомагнезійно-графітові вогнетриви	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$	100	нижчі витрати на матеріали та футерування
дно ковша	доломітові вогнетриви	$\text{MgO}_3,$ CaCO_3	40-45	Для шлаку з хімічним складом: $\text{CaO} - 51\%$; $\text{SiO}_2 - 4,5\%$; $\text{MgO} - 9\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 25\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,5\%$.
монолітне футерування	глиноземошпінельні вогнетриви	до 20% шпінелі, 95% Al_2O_3 і 1,7% CaO	—	Підвищена корозійна стійкість і зниження протистояння проникненню шлаку
	глиноземомагнезійні вогнетриви	5,5% MgO і 1,36% CaO з добавкою 0,5% тонкодисперсного кремнезему	—	
монолітне футерування	шпінельно-периклазовий бетон	28,2% MgO ; 71,8% Al_2O_3	—	Підвищена корозійна стійкість і протистояння проникненню шлаку
дно ковша	низькоцементний бетон	93% Al_2O_3 ; 4,8% MgO ; 1,2% SiO_2 ; 0,5% CaO	500 плавов	—
ділянка шлакового поясу				
ділянка шлакового поясу	магнезійноцирконові бетони	84-85% MgO , 6-8% ZrO_2	—	підвищені корозійно-стійкі властивості
монолітне футерування	корундове футерування	Al_2O_3	350 плавов	—
монолітне футерування	магнезійношпінельні вогнетриви	MgAl_2O_4 , додавання 2% TiO_2	—	стійкість футерування зросла на 10%
монолітне футерування		MgAl_2O_4 , додавання 2-3% Cr_2O_3		зниження пористості, стійкість футерування зросла на 25%
монолітне футерування	периклазовуглецева цегла	MgO з 8% графіту	—	зниження теплопровідності та підвищення термостійкості

1.2. Пошук ефективних рішень з відсікання шлаку при випуску сталі з кисневого конвертеру

Відсікання шлаку є одною з технологічних операцій при випуску плавки зі сталеплавильних агрегатів у ківш та широко застосовується при виробництві сталі конвертерним способом. Для цього металургійним машинобудуванням розробляються механізми і способи, що блокують перехід шлаку у ківш при операціях розливу сталі. Перешкоджання потраплянню шлаку у ківш необхідне для зменшення угару розкислювачів і феросплавів для легування, забезпечення чистоти сталі від потрапляння неметалевих включень, утруднення переходу фосфору і сірки зі шлаку у рідку сталь, тобто підвищення ефективності десульфурзації, збільшення кампанії футеровки ковша і т.п.

Відомі технічні рішення з механічного відсікання шлаку [37], що полягають у тому, що для уникнення потрапляння шлаку на початку випуску при нахилі кисневого конвертору сталевипускний отвір закривають ззовні пробкою, ковзаючим пічним або шибєрним затвором, використовують системи «поплавок» або «стопор» (рис. 1.3). При хімічному відсіканні шлаку використовують здатність шлаку згущуватись (твердіти) за рахунок додавання присадок (наприклад, у вигляді коксу або графіту) [38]. Авторами [39] запропоновано систему газодинамічного відсікання шлаку, що передбачає наявність термокамер або магніточутливих сенсорів для раннього виявлення частинок шлаку в струмені розплаву. Також дієвим технологічним прийомом вважається неповний випуск рідкої сталі з конвертеру, але в такому разі знижується продуктивність сталеплавильного агрегату.

Раціональним є проведення аналізу, пошук і розробка пропозицій з підвищення ефективності відсікання шлаку при випуску сталі з кисневого конвертера шляхом психологічної активізації творчого процесу методами контрольних запитань та мозкового штурму. Зазначимо, що метод контрольних запитань часто комбінують із методом мозкового штурму для ефективної проробки

стану питання, генерування ідей, формулювання відповідей та пошуку раціональних варіантів.

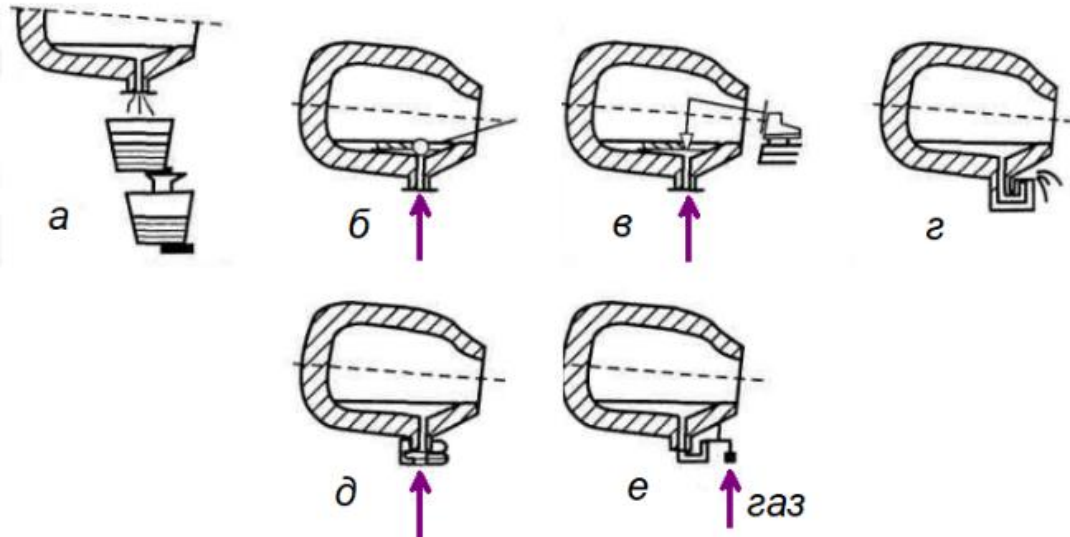


Рис. 1.3 – Способи відсікання шлаку при розливі з кисневого конвертору: а – розлив через промковш; б, в – використання вогнетривких плаваючих куль та стопорів; г – сиффон для стікання заливаного металу; д – шибєрний затвор; е – газодинамічний стопор

Для реалізації методу контрольних запитань використовувати вибіркові питання зі списків А. Осборна та Т. Ейлоарта. Нижче наведено виконаний аналіз у форматі: «Питання» – «Відповідь». Спочатку розглядали питання А. Осборна.

«Що можна додати» – «До системи відсікання шлаку можна додати сучасні пристрої (камери фіксації, датчики, аналізатори), що дозволять оператору або системі автоматизації точно і швидко реагувати на перебіг випуску сталі, досягти ефекту, при якому в сталь буде попадати менше шлаку».

«Що можна продублювати» – «Можна сконструювати шибєр із дублюючим затвором на випадок, якщо основний затвор не спрацює».

«Підібрати іншу форму, забарвлення, звук» – «Можна використати ефект візуальної різниці, коли у шлак добавляють фарбник, який робить його візуально

контрастним, але така реалізація утруднена через високі температури металу та шлаку. Тому доцільно використання тепловізорів та/або термографів для посилення ефекту візуальної різниці кольору, що виникає в наслідок різної температури (через різні властивості тепловіддачі)».

«Підібрати інший компонент» – «Підібрати до складу шлаку нові компоненти, що дозволять використовувати метод згущення шлаку більш ефективно».

«Зробити з іншого матеріалу» – «Плаваючі відсічні пристрої (металева куля з арматурним хвостовиком та вогнетривкою оболонкою, керамічний конус з циліндричною напрямною тощо) виготовити з графену (експериментів із плавлення графену немає, проте комп'ютерні моделі дають температуру плавлення від 4225 до 4625 °С [40]).

Надалі використовували питання з переліку Т. Ейлоарта:

«Бути весь час зануреним у проблему – з нею йти на роботу, на прогулянку, приймати душ, їхати, їсти, грати в теніс чи футбол – весь час бути з нею» – «Реалізації такого підходу буде сприяти набуття практичного досвіду на одному з металургійних підприємств».

«З'ясувати, чи намагався хтось ще вирішити це завдання і що у нього вийшло» – «Проведений пошук у вітчизняних та закордонних періодичних виданнях, патентних джерелах; дещо з результатів наведено вище у огляді»

«Розглянути можливість вживання всіляких матеріалів і енергій: тверде тіло, рідини, газу, гель; електричну, світлову, магнітну енергію; хвилі різного діапазону, поверхневі властивості; різні ефекти (Фарадея, Джоуля–Томсона); різні стани речовини (лід, пара) і інше» – «Використання графену в якості матеріалу для відсічних пристроїв та підібрати до складу шлаку нові компоненти, що дозволять використовувати метод згущення шлаку більш ефективно».

«Поцікавитися думкою людей, що абсолютно не знаються на досліджуваному питанні» – «Фахівці у інших сферах відповіли так: а) купити закордоном найсучасніше обладнання; б) збільшити швидкість обладнання, що

безпосередньо фізично відсікає шлак; в) розробити пристрій/машину, що буде повністю без залишку знімати шлак з поверхні розплавленої ванни металу».

Згенеровані ідеї наведено нижче:

1. Запропоновано використовувати додаткове обладнання, наприклад, пневматичне.
2. В умовах виробництва (на прикладі ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», де шлак визначають візуальним методом) запропоновано побудувати/обладнати систему відсікання шлаку датчиками (розпізнавання температури, кольору), які будуть допомагати визначити, що шлак почав/закінчився виливатися.
3. Обладнати ємність конвертеру пневматичним шиберним затвором.
4. Встановити спектрометр, який дасть змогу чітко відрізнити шлак і метал.
5. Додати присадки, що допоможуть згустити шлак і збільшити контрастність між шлаком і сталлю.
6. Підфарбовувати шлак для кращої візуалізації.
7. Обладнати конвертер плаваючим пристроєм відсікання шлаку, який буде працювати за рахунок різниці в щільності шлаку і сталі.
8. Розробити такий склад шлаку, щоб він в процесі набував газоподібної форми.

Вибір найкращого методу показав те, що більшість зі згенерованих методів вже існують у тій чи іншій формі та широко використовуються на різних виробництвах в усьому світі. Серед основних можна виділити наступні методи:

1. Шлак скачують з поверхні за допомогою гребків, у т.ч. із застосуванням пневматичних механізмів;
2. Існують електронні системи виявлення шлаку в потоці витікаючого металу за допомогою електромагнітного індикатора (різниця в магнітній проникності металу та шлаку), за допомогою термокамери (різниця в інтенсивності випромінювання з поверхні металу та шлаку), за допомогою датчиків раннього виявлення шлаку (вимірює вібрації литьової труби), тощо;
3. Існують пневматичні шиберні затвори.
4. Використовуються методи згущення шлаку (наприклад, введення порції холодного доломіту для ускладнення витікання шлаку з агрегату).
5. Використовуються системи з плаваючими відсічними пристроями.

1.3. Моделювання процесу переробки ванадієвого чавуну в конверторі газокисневого рафінування

Відповідно до теоретичних положень деванадизації чавуну моделювання проводили з виходом на температуру металу не більше 1380°C вмісту оксидів заліза в шлаку на рівні 50% [41]. В якості охолоджувача використовували: окалину, азот, твердий чавун. Джерела надходження оксидів заліза – окалина та окислення Fe чавуну.

Виконано моделювання переробки ванадієвого чавуну в ГКР конвертері за чотирма варіантами:

- 1 - плавка без проміжного скачуванням шлаку;
- 2 - плавка зі скачуванням шлаку;
- 3- плавка зі скачуванням шлаку та залишення кінцевого шлаку під наступну плавку;
- 4 - плавка із застосуванням твердого чавуну та проміжним скачуванням шлаку.

У прибутковій частині теплового балансу плавки враховували теплоту реакцій окислення домішок чавуну та заліза. У витратній частині витрати теплоти на нагрівання окалини, азоту, твердого чавуну та тепловтрати конвертера (8%).

Розрахунок виконаний на 1000 кг чавуну. Прийняті наступні припущення: міксерний шлак відсутній; ступінь засвоєння кисню 100%; залізо окислюється до (FeO), склад твердого чавуну аналогічний рідкому чавуну; частка шлаку, що скачується після першого періоду -1,0; тепловтрати конвертера 8%.

За результатами моделювання, отримані дані щодо коефіцієнту розподілу ванадію по різним варіантам технології (табл.1.2).

Також отримані дані температурних характеристик моделювання, так: $1\text{ м}^3/\text{т}$ азоту, що вдується, призводить до зниження температури ванни на $2,5^{\circ}\text{C}$; $1\text{ м}^3/\text{т}$ кисню на окислення заліза підвищує температуру металу на $50,4^{\circ}\text{C}$; $10\text{ кг}/\text{т}$ твердого чавуну призводить до зниження температури ванни на $7,4^{\circ}\text{C}$; $10\text{ кг}/\text{т}$ окалини призводить до зниження температури ванни на $20,1^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнту розподілу ванадію по різних варіантам технології

№	Варіант технології	Вміст оксидів ванадію в кінцевому шлаку, %	Коефіцієнт розподілу L_v
1	Плавка без проміжного скачуванням шлаку	32,24	403,0
2	Плавка зі скачуванням шлаку	48,85	610,63
3	Плавка зі скачуванням шлаку та залишення кінцевого шлаку під наступну плавку	32,78	409,75
4	Плавка із застосуванням твердого чавуну та проміжним скачуванням шлаку	49,54	619,25

2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТА УСТАТКУВАННЯ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1. Енергоспоживання та витрати емульсолу при холодній прокатці смуг безперервному 4-х клітьовому стані

Чотирьох клітьові безперервні чотиривалкові стани застосовують для холодної прокатки штаб та листів широкого призначення товщиною 0,6-2,5 мм, шириною 1300-1800 мм з гарячої штаби (підкату) товщиною 3-8 мм у рулонах масою 25-50 т. Довжина бочки валків 1500-2000 мм при діаметрі робочих валків 500-550 мм і опорних - 1300-1500 мм. Швидкість прокатки – щонайменше 5-12 м/с, продуктивність – від 0,6-0,8 млн. т на рік [42]. Із зарубіжного сучасного досвіду в області станів холодної прокатки слід відзначити насамперед широке застосування станів з чотиривалковими клітьями тандемного типу у складі чотирьох та п'яти клітей для виробництва смуг і п'яти та шести клітей для виробництва жерсті [43, 44].

Підвищення конкурентоспроможності та виробітки продукції цеху холодної прокатки (ЦХП) досягають використанням сучасних емульсій, які забезпечують належний рівень показників якості холоднокатаних рулонів [45–47]. Використання нового емульсолу «Quakerol» замість «Універсал-1ТС» потребує оцінки впливу цієї мастильно-охолоджувальної рідини на показники якості, технологічності й енергосилові параметри прокатки. Нові результати дозволять розробити та рекомендувати технологічні умови використання емульсолу «Quakerol» в технологіях холодної прокатки, прогнозувати показники якості та витрати емульсолу.

Об'єктом дослідження був процес виробництва холоднокатаних штаб у цеху холодної прокатки. Предметом дослідження стали закономірності впливу технологічних умов виготовлення холоднокатаних штаб на чотирьох клітьовому стані 1680 з використанням емульсолів «Quakerol» та «Універсал-1ТС» на енергосилові параметри прокатки.

У роботі [48] значну увагу приділено підвищенню енергетичної ефективності холодної прокатки на новому двох клітьовому реверсивному стані 1700 (стосовно до умов комбінату «Запоріжсталь»). Шляхом проведення розрахунків показано, що застосування емульсолів «Cold Roller» та «Агрінол ОМ» дозволить знизити розхід електроенергії при холодній прокатці штаб на 1–7 %. Умови силового навантаження на електродвигун реверсивного стану холодної прокатки 1680 розглянуто у роботі [49]. Виявлено важливість забезпечення надійності й стабільності режимів роботи електрообладнання й автоматики для досягнення високої якості та відсутності дефектів прокатки тонких холоднокатаних штаб. Причому, особливо підкреслено необхідність проведення прокатки з емульсіями типу «Універсал-1ТС» і «Cold Roller» для досягнення пом'якшення умов експлуатації електродвигунів прокатного стану.

Дослідження [50, 51] присвячені виявленню впливу характеристик і фізико-хімічних властивостей різних емульсолів на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки. В них визначено, що використання емульсолу з більшою кінематичною в'язкістю дозволяє в деяких випадках знизити питомі витрати електроенергії. У станах тандем режими роботи електродвигунів клітей повинні бути синхронізовані [52] з врахуванням деформаційних явищ (різні витяжки штаби по клітях, нагрівання-охолодження при прокатці тощо), що впливає на показники якості та розхід електроенергії.

Умови тертя і змащування, як правило, суттєво впливають на енергосилові режими деформації [53]. Коефіцієнт деформаційного тертя визначають різноманітними способами, серед яких для пластичної деформації найпоширенішим є осаджування заготовок з різними умовами на контактні інструмент-заготовка [54]. Дослідження [55] присвячено аналізу режимів деформації на одноклітьовому стані холодної прокатки 1500. Причому, як за рахунок зміни контактних умов, так і за рахунок варіювання натягами, розроблено енергозберігаючі режими прокатки штаб товщиною 0,4, 0,5 та 0,8 мм.

В роботі [56] представлені результати випробувань трьох прокатних емульсій: «Gerolub 3022», «Gerolub CTS 87-1» та «Gerolub 6528». Визначено, що

застосування цих прокатних емульсолів дозволяє збільшити швидкість прокатки при збереженні якості поверхні виробу та зниженні енергосилових параметрів прокатки порівняно з параметрами, отриманими раніше під час використання мастил «Quakerol 683» та «Quakerol NLM 4.0». В той же час, дослідники [57] відзначають, що за час проведення ними однократних оцінок більш ефективного емульсолу, ніж «Quakerol 671», для умов ЦХП 1700 ВАТ «АМТ» не виявлено.

Метою роботи є оцінка завантаження електродвигунів та споживання електроенергії в умовах безперервного стану холодної прокатки, враховуючі перспективи застосування емульсолу «Quakerol» замість з емульсолу «Універсал-1ТС».

Для проведення дослідно-промислових випробувань було поставлено 11 м³ (~9900 кг) дослідного емульсолу «Quakerol». Для визначення фактичних фізико-хімічних показників було відібрано проби емульсолу. Враховуючи те, що гарячекатаний травлений прокат може перебувати перед прокаткою у відкритому просторі не більше 48 годин, а кампанія випробувань дослідного емульсолу «Quakerol» тривала близько місяця, то розподіл дослідної плавки для порівняльного прокатування частини рулонів на серійному емульсолі «Універсал-1ТС» не виконували. Для порівняння використовували дані, отримані раніше на рулонах, прокатаних на емульсії з емульсола «Універсал-1ТС» більш ранніх поставок.

Проведено вхідний контроль відповідності характеристик емульсолу вимогам ТУ У 24.6-31709624-001:2005. Встановлено, що випробуваний зразок дослідного емульсолу «Quakerol» відповідає вимогам паспорту якості. За своїми фізико-хімічними показниками дослідний емульсол «Quakerol» відрізняється від застосовуваного емульсолу «Універсал-1ТС» тим, що має більш високі змащувальні властивості (число омилення 164,44 мгКОН/г, проти 38,57 мгКОН/г у емульсу «Універсал-1ТС»).

Безперервний чотирьох клітьовий стан 1680 є основним прокатним станом цеху холодної прокатки (ЦХП-1, ПрАТ «Запоріжсталь»). Він складається з 4-х послідовно розташованих клітей кварто, що мають у своєму складі два опорних і

два робочих валка, а також допоміжного обладнання (підвідного приймального пристрою, поворотного столу, розмотувача, моталки барабанного типу та ін.). Характеристика приводу валків наведена у табл. 2.1.

Привід робочих валків від електродвигунів здійснюється через проміжні вали із зубчастою муфтою, шестеренні кліті та шпindelьні з'єднання. Характеристика валків наведена у табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Характеристика приводу валків

№ кліті	Потужність двигуна, кВт	Число обертів якоря, об/хв	Швидкість прокатки, м/с
1	3300	110/200	2,75 - 5,0
2	3300	160/280	4,0 - 7,0
3	3300/2800	220/280	5,8 - 9,5
4	2 x 1650	200/450	5,6 - 10

Таблиця 2.2 – Характеристика валків безперервного стану

Вид валків	Діаметр діжки, мм	Довжина діжки, мм	Маса валка, т	Тип підшипників
Робочі	510	1680	3,12	Роликові
Опорні	1300	1680	23,6	Рідинного тертя

Для поліпшення захоплення першої кліті використовуються насічені робочі валки. У четвертій кліті також використовуються робочі валки з насіченою поверхнею для унеможливлення зварювання витків рулонів при подальшій термообробці. Для кожної марки сталі, а також кінцевого перерізу холоднокатаних смуг, розроблено режими обтиснення.

Стан обладнаний системою подачі технологічного мастила (емульсія з концентрацією емульсолу 2–4%), системами протизгинання робочих валків, контрольно-вимірювальною апаратурою, за допомогою якої здійснювали контролювання енергосилових параметрів прокатки та енергоспоживання.

Аналіз енергосилових параметрів прокатки. Проаналізовані режими роботи електродвигунів клітей і моталки стану "Тандем" при прокатці плавки на мастильно-охолоджувальній рідині (МОР) з дослідного емульсолу «Quakerol», промасленого емульсом «Quakerol» і серійного емульсолу «Універсал-1ТС», промасленого маслом консервації «ОК-2». Результати аналізу навантажень при прокатці смуг перерізом 0,68x1000 мм з підкату завтовшки 3,0 мм узагальнені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Середні сумарні навантаження на двигуни при прокатці

Марка сталі	Розмір	Середнє сумарне навантаження на електродвигуни клітей та моталку при прокатці одного рулону дослідної плавки, кВА	
		Прокат на емульсії з дослідного емульсолу «Quakerol»	Прокат на емульсії з емульсолу «Універсал-1ТС»
08кп	3,0/1,0x1265	10,965	10,505

Як видно з табл. 2.3, середнє сумарне навантаження на двигуни клітей і моталку 4-х клітьового стану 1680 в установленому режимі прокатки при використанні емульсії з дослідного емульсолу «Quakerol» на промасленому емульсом «Quakerol» металі на 4,19 % вище, ніж при прокатці такого ж сортаменту, промасленого в БТА-4 маслом ОК-2 і прокатаного на емульсії з «Універсал-1ТС».

Аналіз спожитої електроенергії. Проаналізовано споживання електроенергії при прокатці однотипного сортаменту при прокатці плавки на МОР з дослідного емульсолу «Quakerol», промасленого емульсом «Quakerol» і серійного емульсолу «Універсал-1ТС», промасленого маслом консервації «ОК-2». Дані про спожиту електроенергію представлені в табл. 2.4.

Як видно з табл. 2.4, сумарна питома витрата електроенергії при прокатці на емульсії, приготованій з дослідного емульсолу «Quakerol» дещо більша (на 2,7 %), ніж витрата при прокатці на емульсії, приготованій з серійного

емульсолу «Універсал-1ТС». При цьому середня концентрація емульсії при прокатці рулонів на емульсолі «Quakerol» складала 1,9 % проти 3,0 % на рулонах, прокатаних на МОР, приготованою з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». Більш висока питома витрата електроенергії при експлуатації МОР з дослідного емульсолу, що має більш високе число омилення, може бути причиною невірно вибраної і заниженої концентрації емульсії з метою зниження витрати емульсолу на прокат.

Витрата емульсолу. Тривалість роботи дослідної емульсії «Quakerol» при випробуваннях склала 521 годину проти 240 годин згідно технологічним інструкціям (у 2,17 рази більше, ніж для емульсолу «Універсал-1ТС»). Випробування були зупинені унаслідок повного вироблення дослідного емульсолу. Дослідний емульсол використовувався як для промаслення гарячекатаних смуг в лінії безперервно-травильного агрегату (БТА-4), так і для приготування прокатної емульсії. Окрім цього, 200 кг емульсолу витрачені на приготування збідненої емульсії (концентрація – 0,5 %) для промивання емульсивної системи стану Тандем.

За перший період випробувань було промаслено емульсомом «Quakerol» 40918,38 т гарячекатаного металу. За вказаний період витрачено 3600 кг емульсолу. Витрата емульсолу склала: $3600 / 40918,38 = 0,088$ кг/т (при нормі для «ОК-2» – 0,1 кг/т). Протягом 12 днів був другий період, коли прокат не промаслювався, що призводило до збільшення витрат емульсолу на прокатному стані, відповідно для розрахунку загальної витрати емульсолу приймаємо витрату емульсолу на промаслення рівним $3600 / 64165 = 0,056$ кг/т.

Всього за два періода випробувань було прокатано 64165,73 т (у тому числі: 1932,15 т нагарттованих рулонів, 1115,7 т для подальшого виготовлення жерсті, 61117,88 т для подальшого виготовлення холоднокатаних рулонів і листів). Для прокатки холоднокатаного прокату на стані витрачено 6300 кг емульсолу. Питома витрата емульсолу склала: $6300 \text{ кг} / 64165,73 = 0,095$ кг/т (норма 0,45 кг/т для емульсолу «Універсал-1ТС»). Загальна витрата емульсолу склала: $0,056 + 0,095 = 0,151$ кг/т прокату.

Таблиця 2.4 – Споживання електроенергії при прокатці на стані тандем

Розмір штаб, мм	Кількість рулонів, шт	Концентрація емульсії при прокатці, %	Розходування електроенергії, КВт×год	Маса рулонів, т	Питомий розхід електроенергії, КВт×год/т	Сумарний розхід електроенергії при прокатці, КВт×год/т
«Quakerol»						
0,5×1000	10	1,5	9063,9	98	92,49	504
1,5×1250	4	1,8	1746,9	53,06	32,92	
0,5×1000	13	1,9	12852	143,16	89,77	
1,5×1250	9	1,8	4236,3	117,23	36,14	
0,5×1000	6	1,7	5595,3	68,13	82,13	
1,5×1250	9	2	3919,5	113,76	34,45	
0,5×1000	5	2,4	5344,2	56,89	93,94	
1,5×1250	10	2	4609,8	109,75	42,00	
Середнє значення концентрації емульсії		1,9				
«Універсал-1ТС»						
0,5×1000	4	3,1	3800,7	44,21	85,97	490
1,5×1250	4	2,6	1693,8	54,74	30,94	
0,5×1000	7	3,8	6930,9	78,58	88,20	
1,5×1250	8	3	3631,5	93,95	38,65	
0,5×1000	9	2,7	8404,2	101,23	83,02	
1,5×1250	11	3,3	4701,6	147,54	31,87	
0,5×1000	9	2,2	9208,8	96,94	94,99	
1,5×1250	6	3	2781,9	76,58	36,33	
Середнє значення концентрації емульсії		3,0				

2.2. Розвиток системи керування якістю термомеханічно обробленого товстолистового прокату

Якість металопродукції, виробленої гарячою прокаткою, формується технологічними засобами як комплекс механічних, екологічних, поверхневих та інших експлуатаційних властивостей прокату, що обумовлюють його придатність задовольнити певні потреби замовників [58, 59]. Для отримання підвищеного рівня механічних властивостей товстолистового прокату використовують низку ефективних але енергоємних технологічних схем термічної обробки із попередньою модифікацією складу легуючих елементів та забезпеченням формування багатофазних структур [60]: ART-обробка сталей із середнім вмістом марганцю, ізотермічне гартування наноструктурованих сталей з безкарбідним бейнітом, Q&P-обробка і D&P-обробка. У більшості цехів гарячої товстолистової прокатки придатні до реалізації більш енергоефективні технології контрольованого термомеханічного процесу, але для отримання прокату із підвищеними показниками якості система контролю якості повинна безперервно удосконалюватись [58]. Для цього, з метою повноцінного функціонування та досягнення розвитку підприємства або компанії, система якості, відповідно до вимог стандартів ISO 9000 [61] та ISO 9001 [62], актуальна до впровадження 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 дозволить отримати найкращий сукупний результат [63, 64]. Lean — це система ощадливого виробництва спрямована на проривний підхід до менеджменту і

керування якістю, який забезпечує довготривалу конкурентоздатність без істотних капіталовкладень, організації і управління розробленням продукції, виробництвом, взаємовідношеннями з постачальниками і споживачами, коли продукція виготовляється у точній відповідності із запитами споживачів і з меншими втратами. Система превентивного керування якістю повинна бути формалізованою згідно з принципами SMART (Specific, Measurable, Attainable, Relevant, Time-bound – конкретна, вимірювана, досяжна, доцільна, обмежена в часі) [65]. 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% наслідків спричинені 20% причин.

Одним з формалізованих процесних підходів в стандарті ISO 9001:2015 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 зменшення 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 який спосіб інтегрувати та запровадити дії до процесів її системи управління якістю, та оцінювати їх результативність. Тобто повинен працювати цикл Демінга, або цикл

PDCA — планує (Plan), роби (Do), перевіряй (Check), впливай (Act). Такий цикл працює у всій загальній системі якості, в тому числі стосовно виробництва товстолистового металопрокату [58]. 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 [62]. При цьому 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 [66–69]. На сучасних підприємствах поширено застосовуються різноманітні системи превентивного керування якістю, та методи контролю [58, 59, 70], 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, перспективним є впровадження підходу ризик-орієнтовного мислення в технологічному процесі виробництва – методологію керування якістю. Таким чином, для здійснення контролю процесу виробництва та забезпечення якості прокатної продукції необхідно встановлення та керування відповідними технологічними показниками.

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. 2.1.

Встановлення показників може бути загальною 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. 2.2. Безумовно, для встановлення значущості необхідно мати масив з факторів.

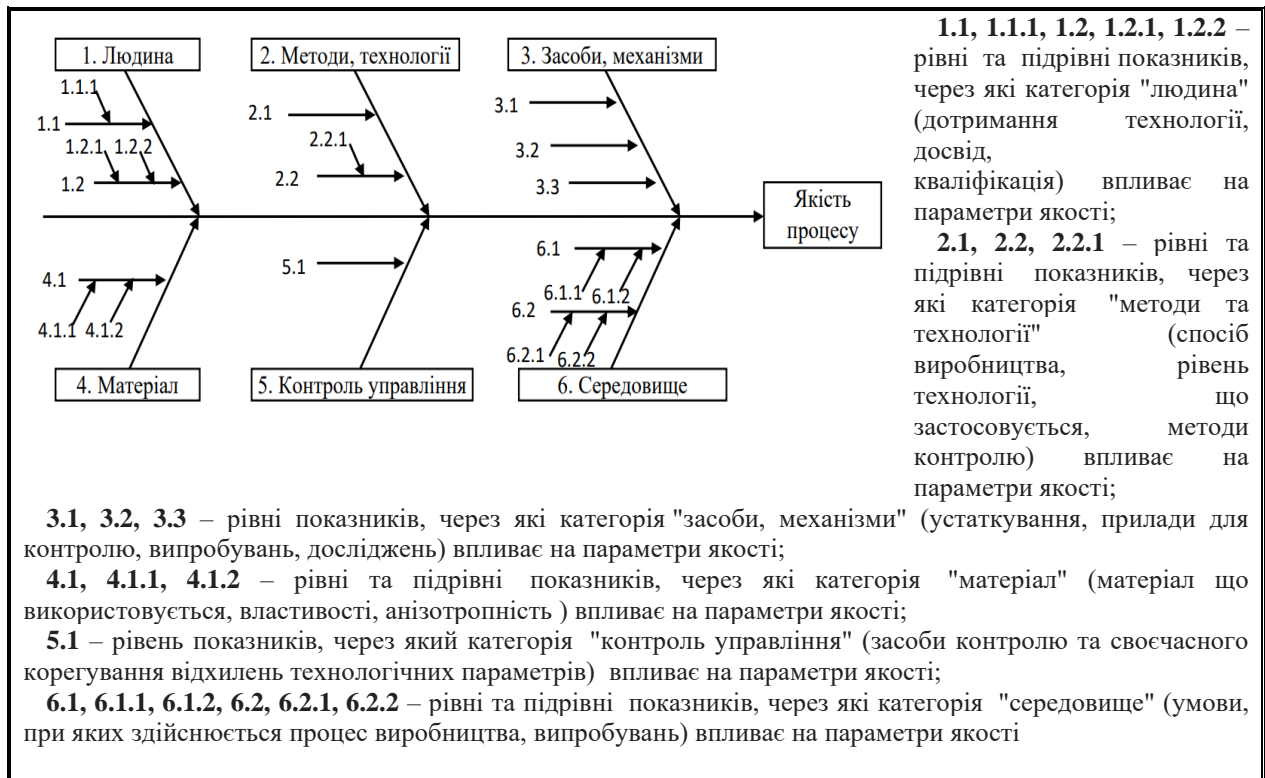


Рис. 2.1 - Діаграма Ішикави в загальному вигляді

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 3σ або 6σ , в залежності від процесу, рис. 2.3.

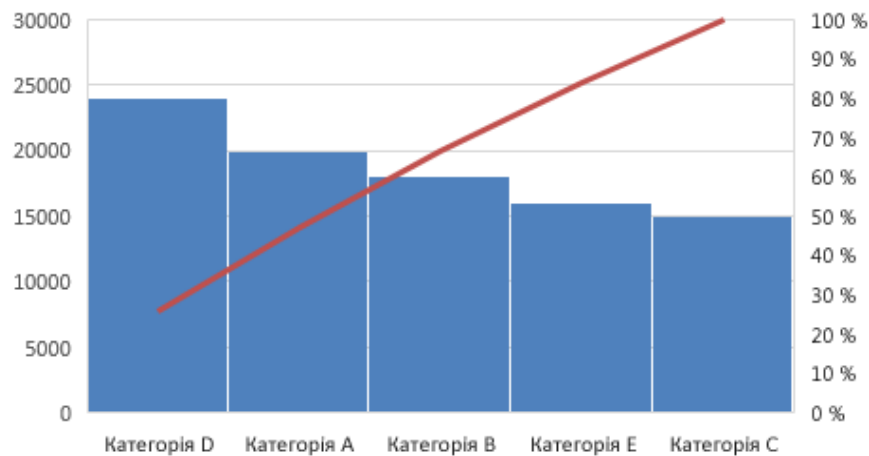


Рис. 2.2 - Діаграма Парето в загальному вигляді

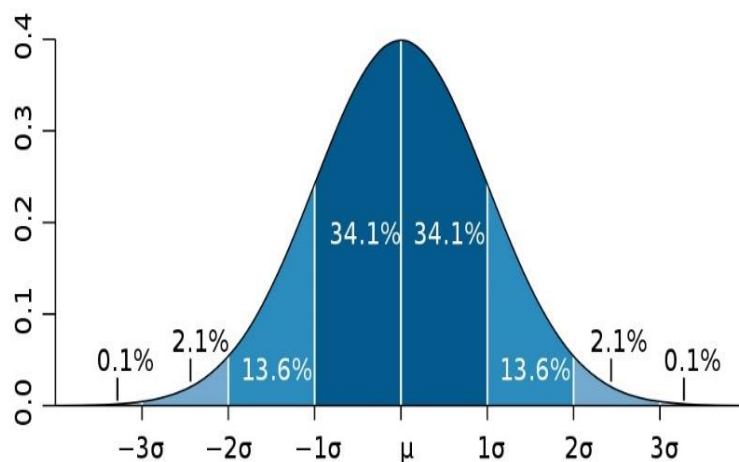


Рис. 2.3 - Діаграма нормального розподілу в загальному вигляді

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 ± 10 МПа, а обмеження згідно з нормативним документом становить 210-255 МПа, то згідно з Правилами 3 σ 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.

Встановлення маркерів та меж. 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. 2.4:

- 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

Рис. 2.4 - Приклад використання кольорових маркерів для оцінки стану процесу

В 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 [70], які являють собою графік зміни параметрів вибірки, зазвичай середнього значення і стандартного відхилення, який розраховується в процесі накопичування даних, рис. 2.5.



Рис. 2.5 - Контрольна карта Шухарта в загальному вигляді

При перевищенні допустимого рівня відхилення, або при попаданні показника в жовте чи червоне поле, технологічним персоналом виконуються дії по забезпеченню входження показника 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 [62]. 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 маркеру призначається на додатковий контроль якості. Додатковому контролю/випробуванням піддаються одиниці продукції з показниками в межах жовтого маркеру. 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.

Удосконалення методології. 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. Відображення запропонованої методології у формі циклу PDCA наведена в роботі [58].

Період оновлення циклу PDCA може відрізнятися 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 місяці 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 перевищенні 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.

Приклад застосування. Розглянемо застосування розробленої методології для встановлення поточного рівня якості та напрямків для підвищення таких показників, як границя плинності σ_T , тимчасовий опір σ_B та відносне видовження δ при виробництві товстолистового прокату зі сталі марки К60 товщиною 14 мм, що вироблявся по режимах термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ». Перелік показників, які впливають на рівень параметрів якості, - границя плинності, тимчасовий опір та відносне видовження брали з технологічної документації комбінату. Серед показників - хімічний склад сталі з такими елементами, які впливають на механічні характеристики (С, Мп, Nb, V, Мо, Cr, 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 прискореного охолодження (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. 2.6–2.8.

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 показником якості. Для масиву, що використовувався в розрахунках, критичне значення кореляції Пірсона становить 0,17 (рівень значимості 0,05). Показники, коефіцієнт кореляції Пірсона яких до відповідного параметру якості є меншим за 0,17, не є значимими. Показники, які по результатах статистичної обробки даних є значимі, наведені в табл. 2.5. Дії щодо процесів покращення якості розробляються тільки для значимих показників.

Незначимі показники залишаються на рівні, який встановлено технологією. Будуємо діаграми розподілу по параметрах якості для встановлення поточного стану технології виробництва прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60 на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»», рис. 2.9–2.11.

Згідно з діаграмами розподілу (див. рис. 2.9–2.11), 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;

- розподіл тимчасового опору також має випадки отримання нижчого за нормативний рівень вимог;

- розподіл відносного видовження має суттєву кількість випадків отримання нижчого за нормативний рівень вимог. Розподіл відносного видовження свідчить про нестабільність технологічного процесу щодо отримання даного параметру якості.

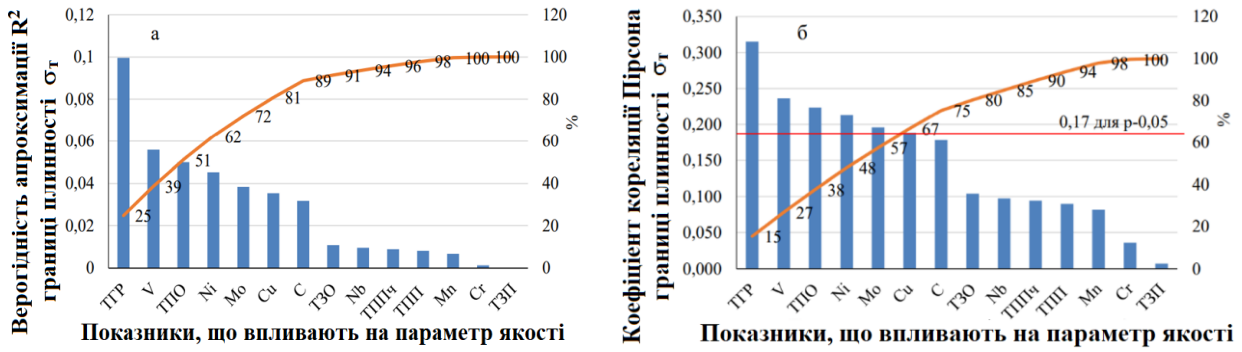


Рис. 2.6 - Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнту кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на границю плинності прокату зі сталі марки К60

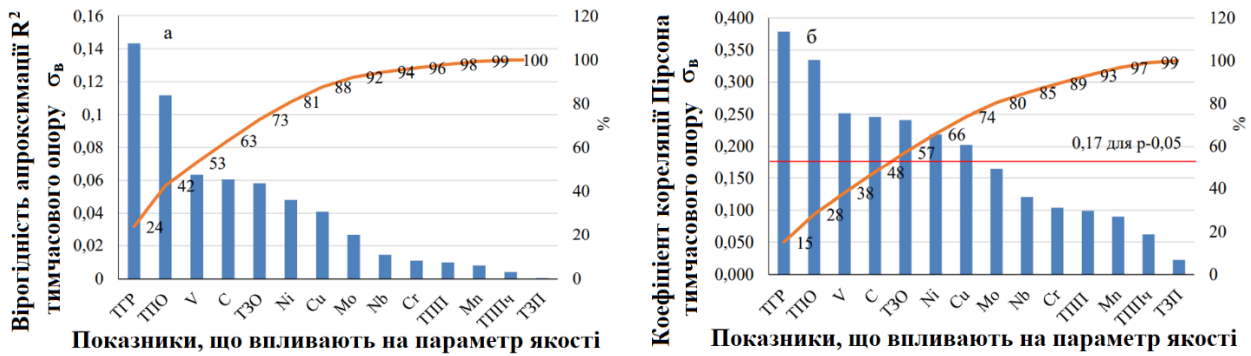


Рис. 2.7 - Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнту кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на тимчасовий опір прокату зі сталі марки К60

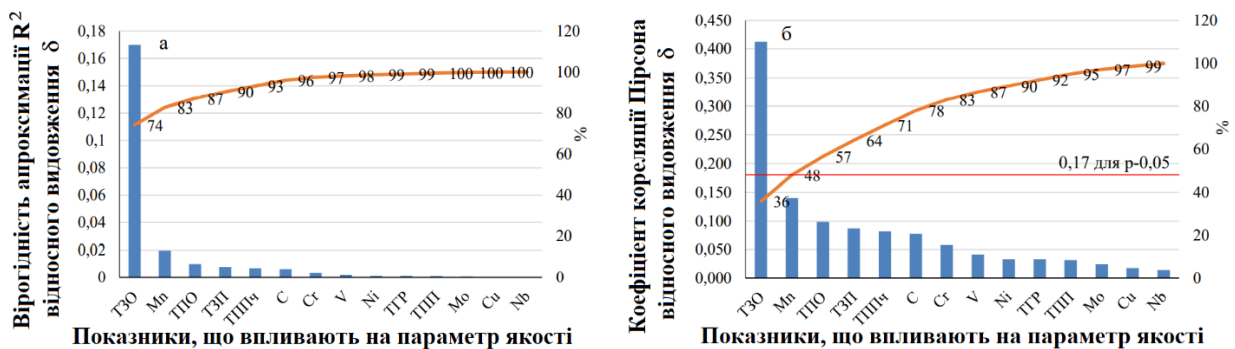


Рис. 2.8 - Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнту кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на відносне видовження прокату зі сталі марки К60

Таблиця 2.5 – Показники, які є значимі при визначенні відповідного параметру якості

Показник	Значення кореляції Пірсона по параметрах якості		
	σ_T	σ_B	δ
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

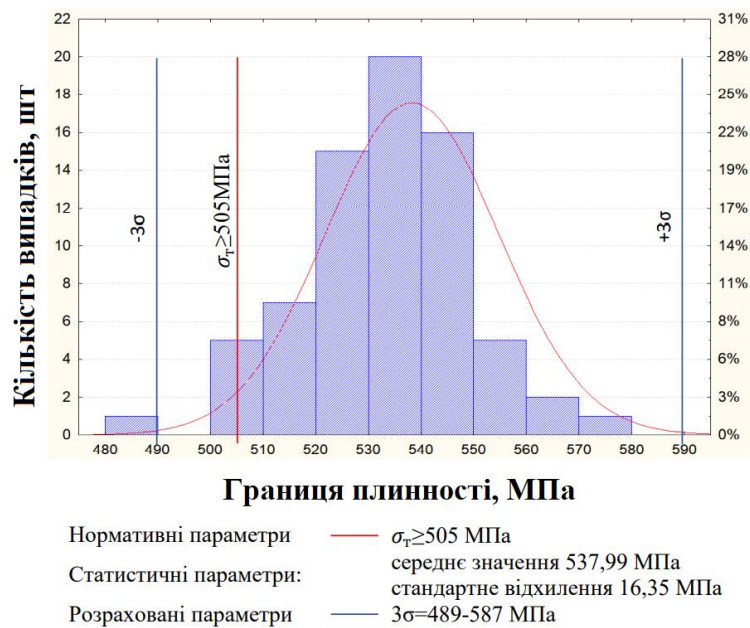


Рис. 2.9 - Розподіл границі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки

K60

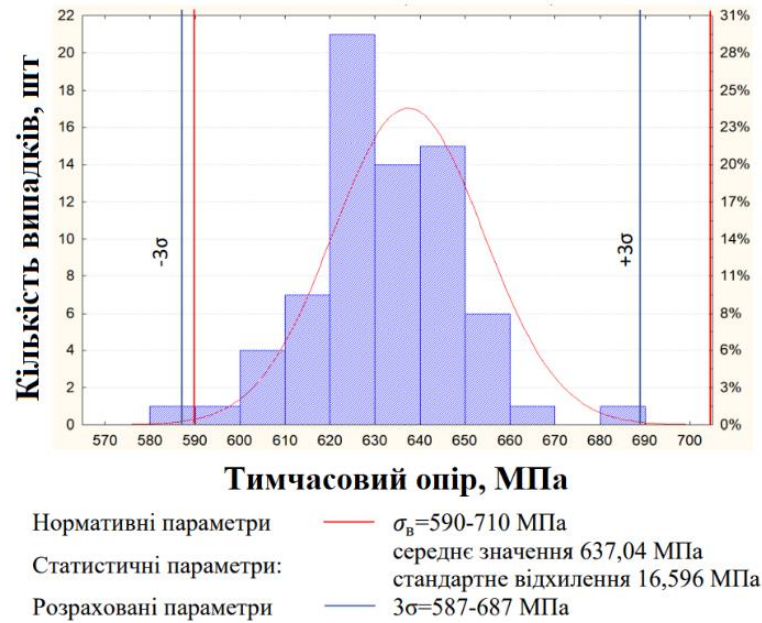


Рис. 2.10 - Розподіл тимчасового опору прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60

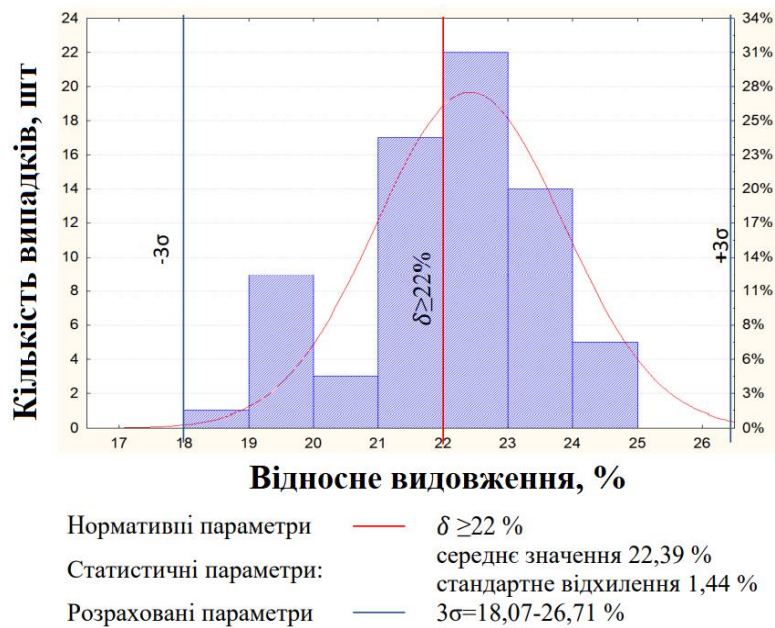


Рис. 2.11 - Розподіл відносного видовження прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60

Для стабілізації технологічного процесу та підвищення якості продукту по параметрам, що досліджуються, встановимо наступні обмеження, табл. 2.6. Для отримання необхідного рівня показників технології по встановлених обмеженнях параметрів якості, в масиві даних, що досліджується, за допомогою фільтрів залишимо тільки ті дані, які відповідають стабільному або зеленому рівню процесу та встановимо їх межі, табл. 2.7.

Таблиця 2.6 – 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 слід починати з найбільш нестабільного параметру, 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. 2.5. Межами жовтого рівня для показників вибрані дані, які відповідають межах нормативних вимог параметрів якості.

Також, важливу роль при використанні даного методу при встановленні рівнів процесу відіграє якість первинно розробленого технологічного процесу. В 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. 2.12–2.14.

Таблиця 2.7 – 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	
ТГР	<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

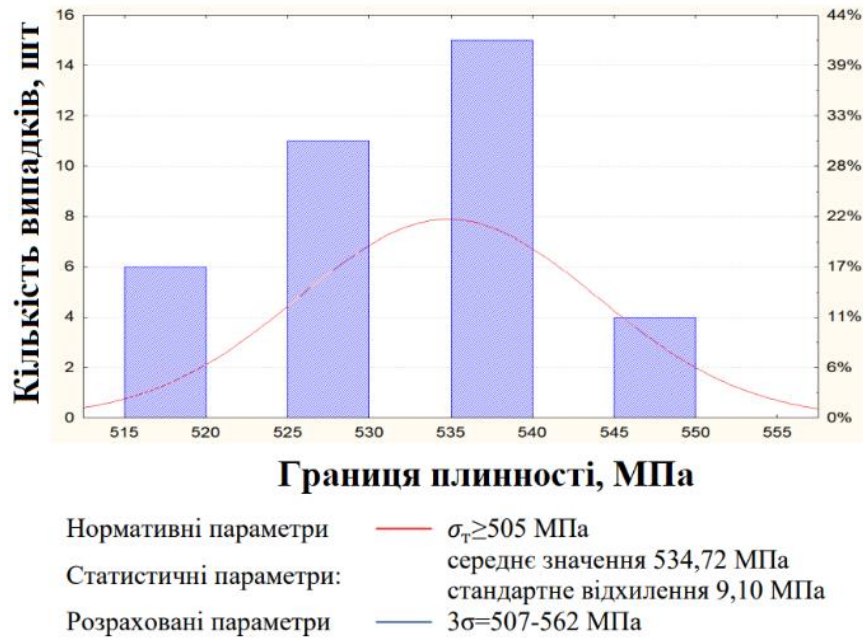


Рис. 2.12 - Розподіл границі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу

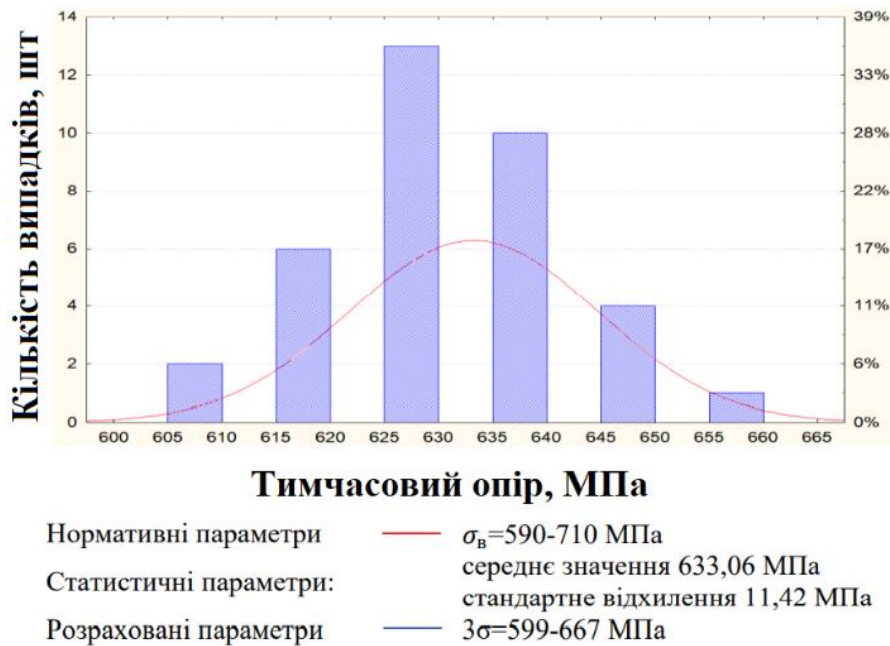


Рис. 2.13 - Розподіл тимчасового опору прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу



Рис. 2.14 - Розподіл тимчасового опору прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу

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.

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 σ , критерій Пірсона, та, яка спрямована на безперервне покращення якості технологічних процесів і продукції.

2.3 Розробка та впровадження температурно-швидкісного режиму прокатки круглих профілів на ТЗС ПрАТ «Камет-Сталь»

За даними Всесвітньої асоціації сталі [71], у 2015 р. із загального обсягу гарячекатаного профілю, який становив 1599340 тис. тон, понад 51 % було вироблено у вигляді сортового прокату. Як показано на рис. 2.15, у структурі довгомірних виробів переважають дрібні та середні профілі простої форми поперечного перерізу (коло, арматура, катанка) [72]. Такий вид продукції, як прокат квадратних і круглих заготовок, майже повністю витіснений продукцією з ККМ. У цих умовах БЗС і ТЗС, які донедавна працювали на металургійних підприємствах, змушені змінити свій профіль на виробництво нових видів прокату або списати їх як застарілі. При освоєнні сортових виробів на заготовочно-прокатних станах необхідно враховувати, що поле допуску для заготовок значно ширше поля допуску для профільних профілів. Відповідно, обладнання, і перш за все прокатні кліті, заготовочних станів може не відповідати підвищеним вимогам профільних станів.

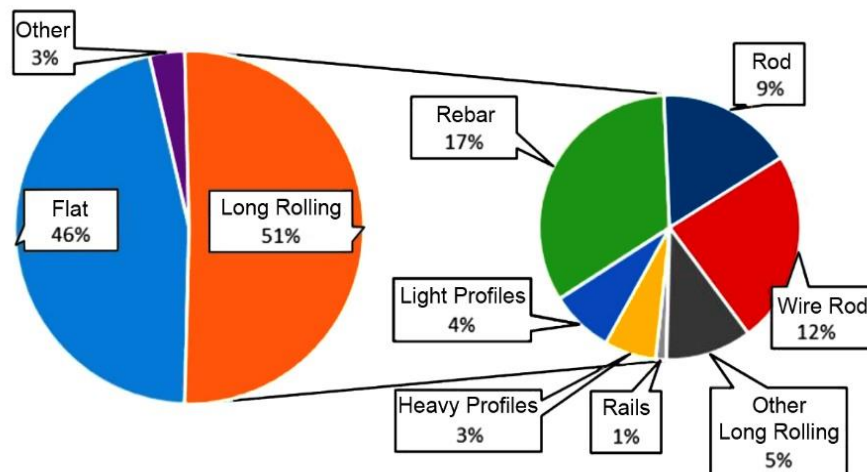


Рис. 2.15 - Розподіл частки гарячекатаного прокату за видами у 2015 р. [72]

Точність прокатки забезпечується в першу чергу конструкцією прокатної кліті. Про це свідчить вивчення технічної літератури. Прокатна кліть повинна мати

мінімальні пружні характеристики, тобто високу жорсткість. Жорсткість кліті є однією з ключових характеристик прокатної кліті, яка враховується при проектуванні та в процесі прокатки. Зазор між валками кліті залежить від багатьох технологічних параметрів, таких як матеріал прокату, його розміри і температура, швидкість прокатки тощо. Однак основними факторами в цьому процесі є сила прокатки та пружна характеристика кліті. Знання розмірів і управління «пружиною стійки» на практиці сприяє підвищенню точності прокатки і зменшує кількість металу, що витрачається на налаштування. Отже, прогнозований з високою точністю зазор знижує коефіцієнт витрати металу. На точність прокату по довжині профілю головні чинники, що впливають є температура та швидкість.

Найбільш широко висвітлені питання впливу швидкості прокатки на технологічні параметри при високих швидкостях. В цьому випадку вплив високої швидкості проявляється в основному через інерційні (масові) сили.

У роботах С.М. Жучкова, А.А. Горбаньова, А.Б. Стеблова та ін. [73-76] показано вплив масових сил на енергосилові та кінематичні параметри при високошвидкісній сортовій прокатці.

Аналіз впливу масових сил показує, що масові сили збільшують момент прокатки [73]. Чим більше витяжка, діаметр катанки, що прокатується, і швидкість прокатки, тим більше момент, створюваний масовими силами. Збільшення діаметра валків за інших рівних умов призводить до збільшення моменту, створюваного масовими силами.

У роботі [74] наголошується, що практично у всіх конструкціях чистових блоків, виготовлених різними фірмами, спостерігаються випадки нерівномірного розподілу міжклітинних зусиль не лише за величиною, а й за знаком. Непарні кліті (овали) частіше працюють із заднім натягом і переднім підпором, парні (кола) – з переднім натягом та заднім підпором. В цьому випадку спільний вплив міжклітинних зусиль і масових сил на коефіцієнт плеча моменту більшою мірою позначається в непарних клітях блоку, що необхідно враховувати при розрахунку енергосилових параметрів.

У роботі [75] показано, що зі збільшенням швидкості прокатки істотно зростає вплив динамічного ефекту і при реальних коефіцієнтах витяжки, що застосовуються в блоках чистових клітей при гарячій прокатці сталевий катанки, зі збільшенням швидкості прокатки може наступити розрив металу в площині виходу розкату, проте ці швидкості поки що не можна досягти на практиці.

У роботі [76] виконано аналіз спільного впливу міжклітинного натягу та масових сил. Показано, що зменшити нерівномірність розподілу міжклітинних сил зміною налаштування блоку, перерізу підкату і діаметрів валкових шайб можна лише в обмежених межах. Тому конструювання нових блоків слід виконувати з урахуванням передбачуваного марочного і розмірного сортаменту блоку. У цій же роботі показано, що для кожного процесу прокатки в блоці існує гранично можлива швидкість, що залежить від масових сил. При цьому збільшення коефіцієнта витяжки металу і опору металу деформації підвищує граничну швидкість прокатки; а збільшення діаметра катанки, заднього натягу і переднього підпору за інших рівних умов зменшують граничну швидкість прокатки.

Хоча багато дослідників відмічає вплив швидкості на величину розширення, цей взаємозв'язок поки що залишається маловивченим. Хоча слід відмітити, що на практиці цей вплив було помічено вже давно. Так в технологічній інструкції ТИ 230-П408-2019 «Виробництва гарячекатаних заготовок та сортового прокату на трубо-заготовочній дільниці прокатного цеха» ПрАТ ДМК в п. 8.9.15 зазначено: «При відхиленні розмірів круглого профілю діаметром 120...140 мм від заданих значень допускається виконувати регулювання ширини шляхом зміни швидкості прокатки в чистовій кліті стану.

При зменшені (збільшені) швидкості прокатки на 10 об./хв. горизонтальний розмір круглого профілю збільшується (зменшується) на 0,1 мм».

Суттєвий вплив на точність прокатки надає температура прокатки або спосіб та режим нагрівання заготовки.

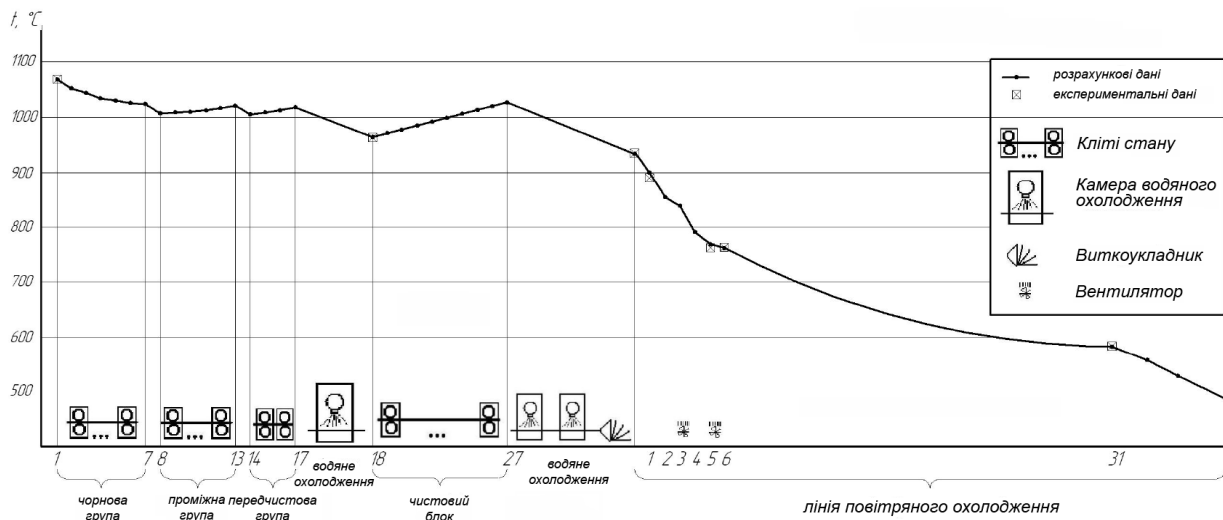
У роботі [77] дано опис реконструктивних заходів, проведених на дрібносоротно-проволочному стані в Какогаві. Завдяки реконструктивним заходам температурна однорідність заготовок при нагріванні покращилася, нестабільність

механічних властивостей катанки (виражена за стандартним відхиленням для катанки діаметром 11 мм за стандартом SWRS82B) зменшилася з 22 до 16 МПа. Відзначено підвищення розмірної точності катанки завдяки поліпшенню температурної однорідності заготовок в нагрівальній печі.

У роботі [78] йдеться про те, що на безперервних сучасних сортових станах під час роботи спостерігається нестабільність температурного режиму прокатки, яка пов'язана перш за все з різними затримками на стані. Регулювати температуру в процесі нетривалих пауз важко через інерційність печі, тому коливання температури в часі можуть становити 100°C і навіть більше, що позначається на коливаннях розмірів готової продукції.

Для вирішення температурної задачі в роботі [79] запропонована математична модель, яка ґрунтується на використанні експериментальних та аналітичних залежностей і включає три основні модулі: зміна температури металу при прокатці в робочих клітках стану; зниження температури розкочування в трубчастих камерах водяного охолодження перед і за чистовим блоком клітей; охолодження катанки на виткоукладачу та роликовому транспортері. Основний недолік запропонованої методики — використання великої кількості припущень при розрахунку температурного режиму прокатки в робочих клітках стану. Тим не менш, дана методика дозволяє визначати параметри охолодження розкату, прогнозуючи при цьому отримання механічних властивостей катанки різного призначення із сталі широкого марочного сортаменту. З використанням отриманої моделі розроблено технологічні режими прокатки катанки на новому дрібносоротно-проволочному стані 150 ВАТ «Нижньосергінський метизно-металургійний завод» (рис. 2.16).

Подібний підхід до вирішення теплової задачі в умовах сучасних безперервних станів використовується і в роботі [80]. Однак слід відзначити суттєву відмінність, яка полягає у застосуванні енергетичного методу для визначення деформаційної складової теплового балансу розкочування в осередку деформації робочої клітки прокатного стану. Це дозволяє значно підвищити точність розрахунку температури металу у межах робочих клітей прокатного стану.



1–7 – чорнова група клітей; 8–13 – проміжна група; 14–17 – передчистова група; 18-27 – чистовий блок; 1, 2, 3, 4, 5, 6...31 – номери теплозахисних екранів на лінії повітряного охолодження (показано частину лінії)

Рис. 2.16 - Температурний режим прокатки катанки діаметром 5,5 мм зі сталі Св 08АА

Запропоновані в роботах [79, 80] методики можуть бути використані для розрахунку середнього значення температури розкату в будь-якому з проходів. Однак визначення зміни температури по всій довжині профілю поки залишається завданням складним і до кінця не вирішеним, тому прогнозувати різнотовщинність (різноширинність) профілю з достатньою точністю в залежності від зміни температури розкату по довжині поки практично неможливо.

З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що на точність прокатних виробів по довжині розкату суттєво впливає температурний та швидкісний режим прокатки. Метою цієї роботи є дослідження впливу температурно-швидкісного режиму прокатки круглих профілів в кліті «750-3» ТЗС на кінцеву ширину прокату. Кінцевою метою роботи є підвищення продуктивності та зменшення витратного коефіцієнту при виробництві на ТЗС ПрАТ «Камет-Сталь».

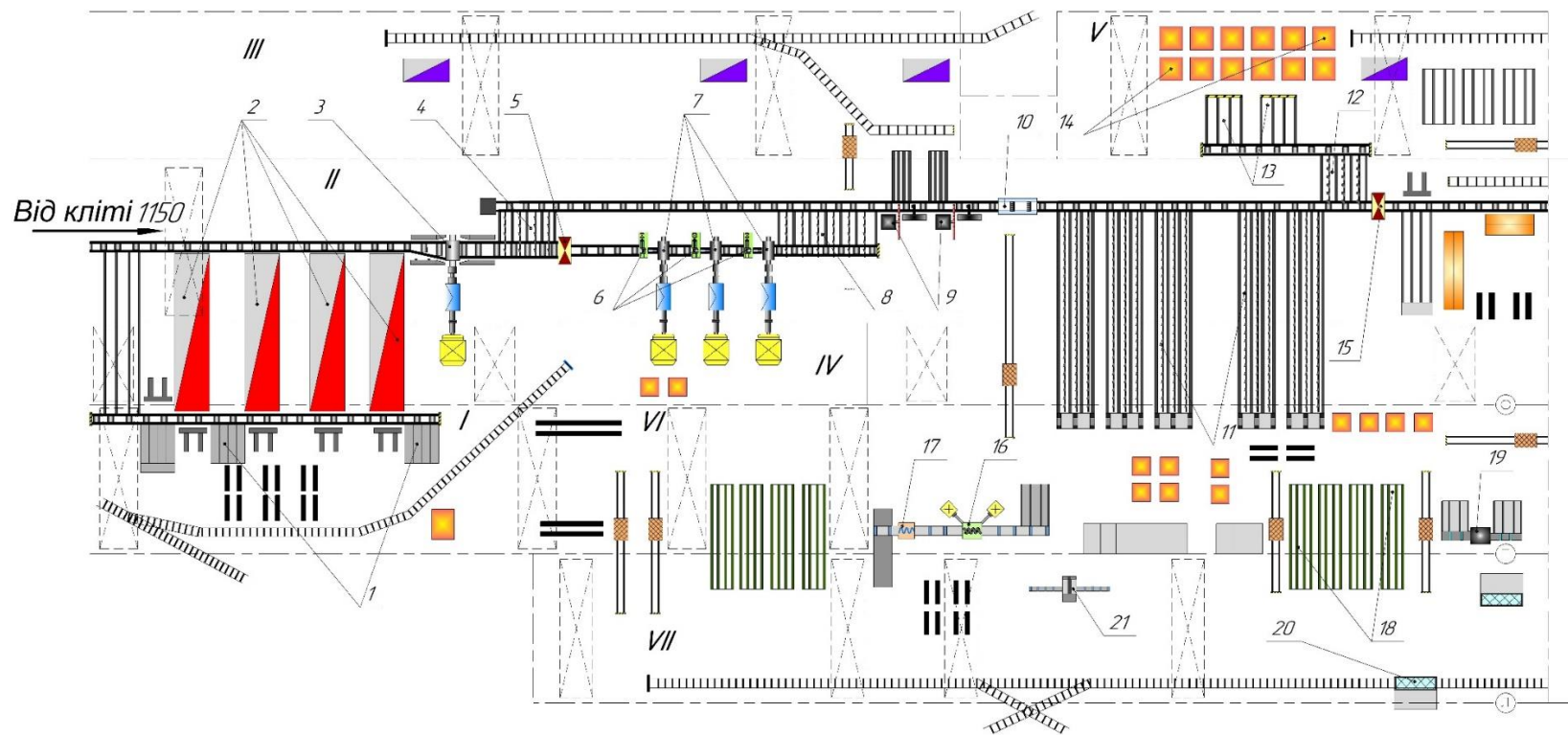
Трубозаготовочний стан 900/750-3 був введений в експлуатацію в 1956 році. Стан розташований послідовно за блюмінгом 1150. Він призначений для

виробництва трубної заготовки, квадратних заготовок і слябів з вуглецевих сталей звичайної якості, високоякісних конструкційних сталей, низьколеговані та леговані сталі. Початковий сортамент стану включає трубку заготовку діаметром 90, 100, 110, 120, 125, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 220, 230, 270 мм; квадратні заготовки перерізом (120x120) (200x200) мм; плити перерізом (90 ÷ 200) x (300 ÷ 560) мм; осьові заготовки діаметром 218...230 мм.

Основне технологічне обладнання стану складається з обтискної двовалкової кліті 900 і трьох однакових двовалкових неререверсивних клітей 750, розташованих послідовно (рис. 2.17).

Станина робочих стояків 900 і 750-1, 2, 3 закритого типу. Діаметр валків 810...960 мм для кліті 900 і 680...760 мм для клітей 750-1, 2, 3. Довжина бочки валків відповідно 2350 мм і 1250 мм. Матеріал валків кліті 900 – сталь 50ХН або 60ХН, клітей 750-1, 2, 3 – чавун СШХН-45 або СШХН-50. Підшипники ковзання з композиційного епоксидного матеріалу використовуються в якості опор валків для кліті 900 (рис. 2.18, а). А для опор валків клітей 750–1, 2 та 3 застосовують чотирирядні роликотидшипники (рис. 2.18, б).

Як вже було зазначено вище традиційний сортамент ТЗС 900/750 ПрАТ «Камет-Сталь» включає до себе круглі профілі діаметром 90-270 мм твердих та м'яких марок сталі. До твердих сталей в цеху відносять вуглецеві сталі (сталь марки 45 та вище), а також леговані хромом та марганцем. У зв'язку із падінням попиту на катані круглі профілі з м'яких марок сталі (класична трубна заготовка), сортамент ТЗС був розширений за рахунок засвоєння круглих профілів діаметром 40 та 60 мм, які використовують як заготовку для виробництва помольних куль. Як відомо матеріал для сталевих куль для млинів – сталі з високим утриманням вуглецю. Для покращення прокалюваності та підвищення зносостійкості в сталі, з яких виготовляють помольні кулі, додають марганець іноді хром. Тобто такі сталі відносять до твердих. Декілька пізніше (у 2020 р.) на ТЗС ПрАТ «Камет-Сталь» було засвоєно виробництво круглих профілів діаметром 70, 75 та 80 мм. Таким чином розширений сортамент ТЗС 900/750 включає до себе круглі профілі твердих та м'яких марок сталей діаметром від 40 мм до 400 мм.



1 – завантажувальні ґрати; 2 – методичні нагрівальні печі; 3 – кліть «900» (робоча кліть, маніпулятори, шестеренна кліть, електродвигун); 4 – шлепер перед ножицями №1; 5 – ножиці гарячої різки №1; 6 – шайбові кантувачі клі-тей 750 – 1, 2, 3; 7 – кліті 750 – 1, 2, 3 (робоча кліть, шестеренна кліть, електродвигун); 8 – шлепер за кліттю 750 – 3; 9 –пили ударної дії; 10 – клеймувальна машина; 11 – ланцюгові холодильники; 12 – транспортер осьової заготовки; 13 – приймальні столи; 14 – колодязі сповільненого охолодження осьової заготовки; 15 – ножиці гарячої різки №2; 16 – правильна машина; 17 – установка УЗК; 18 – стелажі для обробки та приймання товар-ного прокату; 19 – обдирний станок; 20 – вагонні ваги; 21 – стрічкопильний станок

Рис. 2.17 - Схема розташування обладнання ТЗС

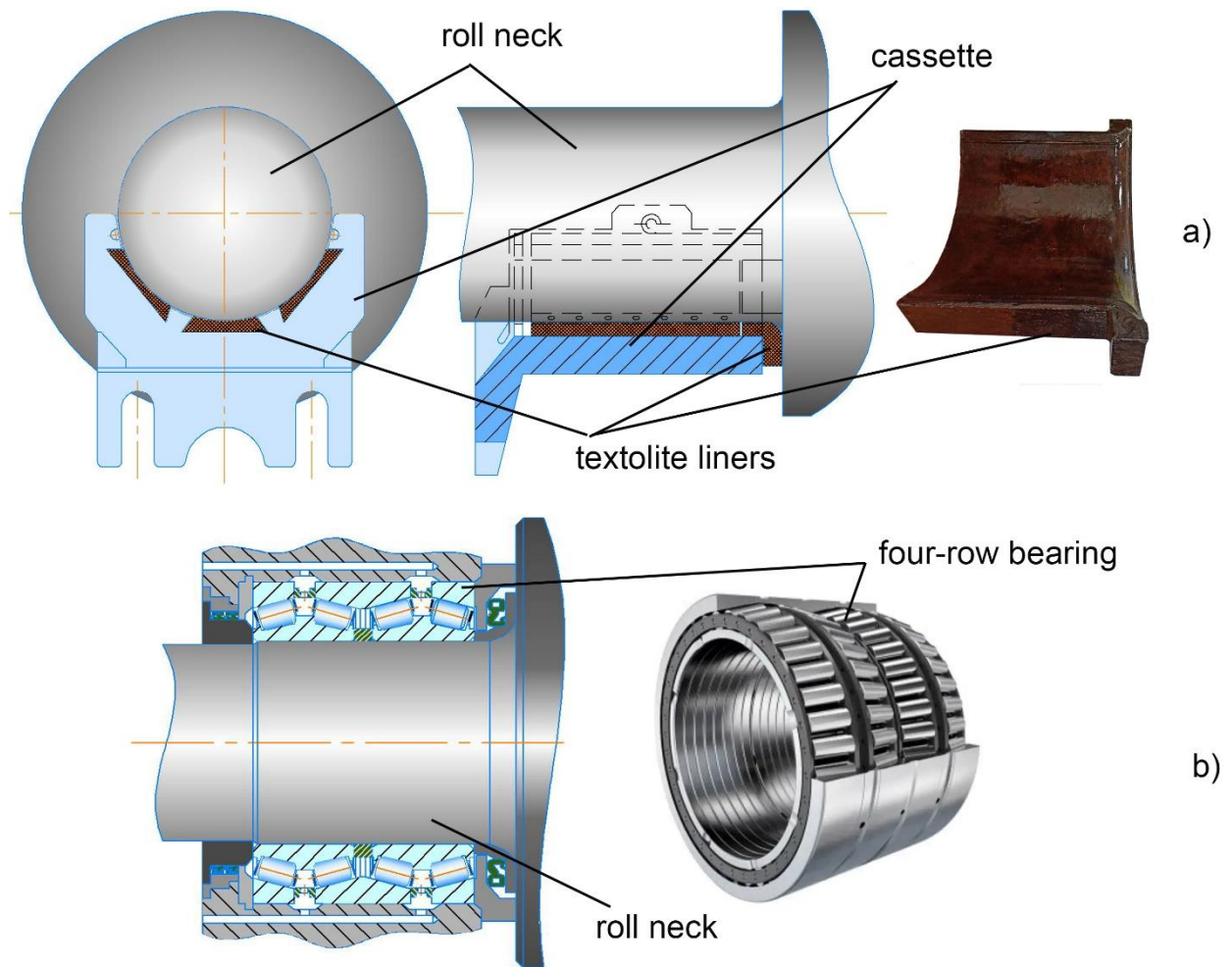


Рис. 2.18 - Опори валків обтискної кліті 900 (а) та клітей 750–1, 2, 3 (б)

Не дивлячись на успішне засвоєння та вже деякий досвід промислової прокатки профілів діаметром від 40 мм до 110 мм (малі круги), періодично виникають випадки прокатки круглих профілів з поверхневими дефектами, особливо часто на передньому та задньому кінці розкату (рис. 2.19), які піддають видаленню. Проте, все одно час від часу сліди від закатів дефектів спостерігаються навіть на готових кулях.

Для того, щоб скоротити кількість готових круглих профілів с дефектом «вус» на передньому/задньому кінці розкату було проведено дослідну роботу з

вичення впливу температурно-швидкісного режиму прокатки в кліті 750-3 на кінцеву ширину профілю.



підріз

вус

Рис. 2.19 - Загальний вигляд дефектів на передніх та задніх кінцях малих круглих профілів ТЗС

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Визначити фактичні значення частоти обертання валків кліті 750-3в залежності від положення керуючих органів командо-контролерів ПУ-8 (пульт управління кліттю та кантувачем 750-3).

2. Провести промислове дослідження залежності величини розширення від температури підкату та швидкості обертання валків при прокатці овальних розкатів в круглих калібрах.

3. Розробити та впровадити рекомендації по управлінню процесом прокатки в чистовій кліті при виробництві малих кругів.

Для вирішення першої задачі (визначення частоти обертання валків) виконали технічну діагностику відповідності частоти обертання валків та двигуна головної лінії кліті 750-3 ТЗС показникам вольтметра, що встановлено

на ПУ-8. Виміри виконували за допомогою тахометру СД-23. Було отримано дві точки відповідності:

1 точка

Максимальна частота обертання двигуну, об./хв.	Максимальна частота обертання валків, об./хв.	Показники вольтметра, В
203	81,77	690

2 точка

Мінімальна частота обертання двигуну, об./хв.	Мінімальна частота обертання валків, об./хв.	Показники вольтметра, В
111	44,71*	450

*значення отримано за результатами розрахунку по передатному числу головної лінії кліті

За результатами виміру частоти обертання валків було складено графіки та таблицю відповідності обертання валків (двигуна) показникам вольтметра. Користуючись графіками або таблицями, можна, змінюючи положення рукоятки командо-контролеру, змінювати напруження на якорі двигуна. По значенню напруження відома частота обертання валків, що відповідає цьому напруженню.

Для виконання 2 задачі необхідно було провести прокатку підкатів овальної форми в чистових круглих калібрах при різних швидкостях та температурах (табл. 2.8).

Відповідно до плану прокатки виконували при виробництві круглого профілю діаметром 40 мм в повній відповідності до розроблених калібровочним бюро таблицями калібровки, режимом обтиснень кліті 900 та калібровою валків.

Таблиця 2.8 – План експерименту

№	Кількість підкатів, шт.	Температура підкату, °С	Частота обертання валків
1	2	830±20	min
2	2	950±20	max
3	2	830±20	min
4	2	950±20	min

Найбільша складність була у забезпеченні необхідної температури початку прокатки в чистовій кліті, що пов'язано із особливостями технології та обладнання стану. Ручне керування режимом прокатки в кліті 900 призводить до коливання температур підкатів, що надходять до клітей 750. Додаткові втрати температур на окремих заготовках можна отримати при невдалих захватах валками клітей 750-1 та 2. Тому для забезпечення однакових умов при прокатці повторюваних точок експерименту, перед прокаткою в кліті 750-3 вимірювали температуру за допомогою стаціонарного та ручного пірометрів. Також контролювали розміри овального підкату (ширину та висоту). Також після прокатки вимірювали гарячі розміри профілів, щоб виключити помилки при перерахунках.

Результати промислового експерименту з визначення впливу температурно-швидкісного режиму процесу прокатки в чистовому проході на деформований стан розкату при виробництві круглих профілів при прокатці кругів діаметром 40 мм наведено в табл. 2.9.

На основі обробки експериментальних даних розроблено та впроваджено тимчасовий регламент температурно-швидкісного режиму прокатки круглих профілів діаметром від 60 мм до 110 мм та діаметром 40 мм в кліті «750-3». Економічний ефект від впровадження результатів роботи за рахунок зменшення

витратного коефіцієнта металу при виробництві круглих профілів діаметром від 60 мм до 110 мм склав 2,36 млн. грн./рік.

Таблиця 2.9 –Результати експерименту при прокатці круглого профілю діаметром 40 мм

№	Температура підкату, °С	Частота обертання валків	H ₀ , мм	B ₀ , мм	H ₁ , мм	B ₁ , мм	D ₁ , мм	D ₂ , мм	t _{пир} ¹ , °С	t _{пир} ² , °С	t _{пир} ^{ср} , °С	t _{стац} , °С	U, В	n _в , об./мин.
1	950±20	min	26,1	81	40,3	40,5	40,4	40,7	874	859	855	810	280	18
2	830±20	min	26,3	87	40,4	41,3	40,5	40,9	798	785	786	750	280	18
3	950±20	min	26,1	79,8	40,2	40,2	40,3	40,7	908	876	874	850	280	18
4	830±20	min	26,3	79,9	40,4	40,5	40,4	41	860	811	819	780	260	16
5	950±20	max	26,1	89	40,2	39,8	40,5	40,6	892	870	881	820	800	100
6	830±20	max	26,4	81	40,45	40,6	40,8	41	857	827	842	780	800	100
7	950±20	max	26,1	80	40,1	39,8	40,7	40,1	909	892	901	850	800	100

Дослідження показали, що зі збільшенням швидкості та температури прокатки зменшується розширення розкату (рис. 2.20 та 2.21).

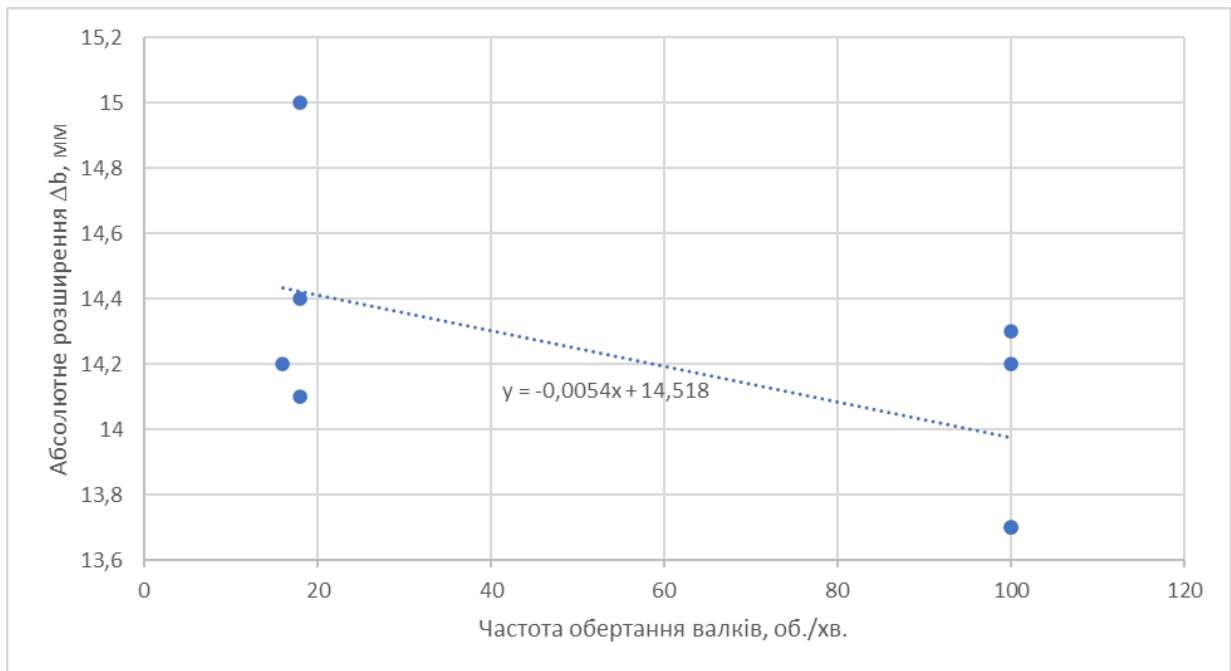


Рис. 2.20 - Залежність абсолютного розширення овальних розкатів при прокатці круглих профілів від частоти обертання валків

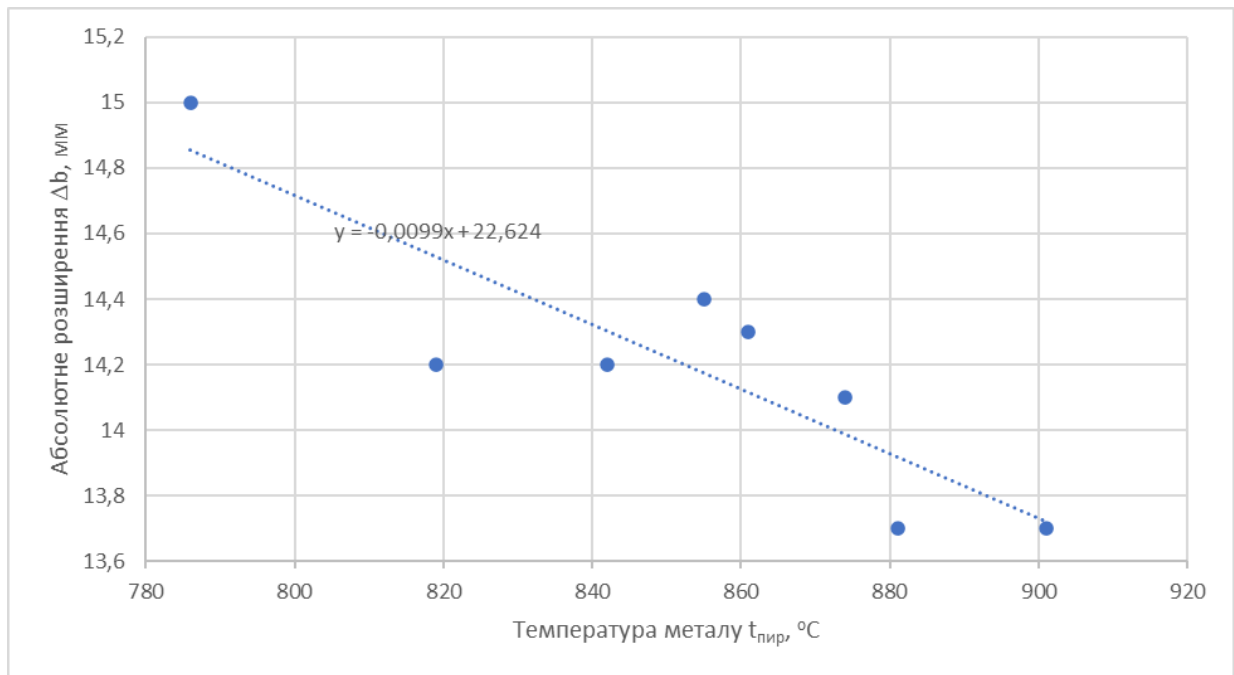


Рис. 2.21 - Залежність абсолютного розширення овальних розкатів при прокатці круглих профілів від температури металу

ВИСНОВКИ

1. Світова практика характеризується використанням та інтенсивним удосконаленням основної футеровки сталерозливних ковшів. Переважним на найближче майбутнє стає низькоцементне футерування, що застосовується в Японії та ряді європейських країн. Але, висока вартість витратних матеріалів та підвищені вимоги до технології виготовлення, стримують її масове впровадження на металургійних підприємствах. Тому, найбільш поширеним на сьогодні варіантом для вітчизняних підприємств є комбіноване футерування на основі формованих вогнетривких виробів, що містять оксиди магнію і алюмінію з добавками вуглецю.

2. Для підвищення ефективності методів відсікання шлаку необхідно, в першу чергу, віднести визначення самої проблеми до умов конкретного виробництва. Якщо сфокусуватися на виробництві, наприклад, ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», де шлак відсікають «підривом струменю», достатньо раціональною ідеєю виглядає використання домішок, що дозволить оператору більш ефективно виявляти шлак в потоці металу, або використовувати автоматизовані системи розпізнавання за спектрограмою або термограмою. З виробничого досвіду відомо, що досвідчені сталевари виявляють шлак в потоці металу не тільки за кольором, а й, навіть, за звуком, що пояснюється різною густиною та в'язкістю шлаку і рідкої сталі, що розливаються. Тому, окрім застосування автоматизованих систем контролю та керування, при розпізнаванні та обробці візуальної та звукової інформації раціональне використання систем штучного інтелекту.

3. Моделювання переробки ванадієвого чавуну в ГКР конвертері показало, що у прибутковій частині теплового балансу плавки враховували теплоту реакцій окислення домішок чавуну та заліза. За результатами

моделювання, отримані дані щодо коефіцієнту розподілу ванадію по різних варіантам технології та температурних характеристик моделювання.

4. Розроблено методики оцінки енергосилових параметрів при холодній прокатці з емульсолами. Встановлені закономірності впливу технологічних умов прокатки на 4-х клітьовому стані з використанням емульсолу «Quakerol» на енергосилові параметри прокатки. Виявлено, що середнє сумарне навантаження на двигуни клітей і моталку 4-х клітьового стану 1680 в установленому режимі прокатки при використанні емульсії «Quakerol» на 4,19 % вище, ніж при прокатці такого ж сортаменту, прокатаного на емульсії з "Універсал-1ТС". Встановлено рівень енергосилових витрат при прокатці у 4-х клітьовому стані з використанням емульсорів «Quakerol» та «Універсал 1ТС». Показано, що сумарні питомі витрати електроенергії при прокатці на емульсії, приготіваній з дослідного емульсолу «Quakerol», більше на 2,7 %, ніж при прокатці на емульсії, приготіваній з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». Загальні витрати емульсолу «Quakerol» склали 0,151 кг/т прокату, при чому виявлено, що тривалість використання до заміни дослідної емульсії «Quakerol» у 2,17 рази більше, ніж емульсії «Універсал-1ТС».

5. На підставі аналізу встановлено, що додаткові вимоги до прокатної продукції перевищують встановлені нормативними документами та потребують врахування при розробці технологій. 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 K60 на товстолистовому стані 3600, що свідчить про можливість підвищення стабільності технологічного процесу термомеханічної прокатки.

б. За результатами досліджень було розроблено таблицю для вибору швидкісного режиму прокатки з урахуванням температури підкату при виробництві круглих профілів діаметром від 40 до 110 мм. Це дозволило оптимізувати швидкісний режим прокатки, зменшити машинний час прокатки, за рахунок чого збільшилася продуктивність стану, а також зменшився витратний коефіцієнт за рахунок зменшення довжини дефекту «вус» на передніх та задніх частинах розкату. Основна переваги запропонованих заходів – відсутність витрат на реалізацію.

Результати досліджень опубліковані в роботах [81-98].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kataoka S. Refractories for steelmaking in Japan; Seikoyo taikabutsu no genjo (Nippon ni okeru seikoyotaikabutsu no henshen) / S. Kataoka // Taikabutsu (Refractories). – Japan. – 2016. – Vol. 48. – pp. 201–227.
2. Akselrod L., Garten V. An alternative lining of steel ladles: technical and economic aspects / L. Akselrod, V. Garten // Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. – Germany. – 2018. – pp. 72–80.
3. Durmashkin A.L., Orlov V.A., Kortek' A.A. Development of designs of slide gates and a combination of refractories for them for steel teeming ladles and tundishes / A.L. Durmashkin, V.A. Orlov, A.A. Kortek' // Saint Petersburg Refractory Institute. Translated from Ogneupory. – Germany. – 1993. – No. 5. – pp. 32–37.
4. Degradation mechanisms of magnesia–chromite refractories in vacuum–oxygen decarburisation ladles during production of tainless steel // P. T. Jones, B. Blanpain, P. Wollants, R. Ding, B. Halleman. – Ironmaking and Steelmaking. – 2000. – Vol. 27. – No. 3. – pp. 228–237.
5. Francesco Boenzi, Joaquín Ordieres–Meré, Raffaello Iavagnilio. Life Cycle Assessment Comparison of Two Refractory Brick Product Systems for Ladle Lining in Secondary Steelmaking / Francesco Boenzi, Joaquín Ordieres–Meré, Raffaello Iavagnilio // Sustainability. – 2019. – Vol. 11. – 22 p.
6. A method for steel ladle lining optimization applying thermomechanical modeling and taguchi approaches // Aidong Hou, Shengli Jin, Harald Harmuth, Dietmar Gruber. Journal Aims and Scope. – 2018. – No. 70. – pp. 2449–2456.
7. Koryt'ko N.G., Loginov P.G., Mar'in A.G. Monolithic Lining for Steel–Pouring Ladles / N.G. Koryt'ko, P.G. Loginov, A.G. Mar'in // Metallurgist. – 2005. – Vol. 49. – pp. 91–93.

8. Introduction of a Monolithic Working Lining of Steel Ladle. Interceram / V. Garten, I. Galenko, O. Ziganshina, M. Dzhundiet, K. Strazhkov // International Ceramic Review. – 2019. – Vol. 68(S1). – pp. 26–29.

9. Технології підвищення якості сталі / О.Г.Величко, О.М.Стоянов, Б.М.Бойченко, К.Г.Нізяєв // Підручник. Дніпропетровськ: «Середняк Т.К.». – 2016. – 196 с.

10. Multi-Objective Optimization Design of Ladle Refractory Lining Based on Genetic Algorithm / Sun Y, Huang P, Cao Y, Jiang G, Yuan Z, Bai D, Liu X // Front. Bioeng. Biotechnol. – 2022. – 18 p.

11. Steel Ladle Refractories Damage Causes Procedure [Електронний ресурс] // <https://www.castablerefractory.com>. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: https://www.castablerefractory.com/industry_News/steel-ladle-refractorines-damage-causes.html

12. Sennikov, S.G., Shestakov, A.V., Kaplan, F.S. *et al.* Effect of Process Regimes on the Life of “Mayerton” Linings in 385-Ton Steel Teeming Ladles. Refractories and Industrial Ceramics. – 2000. – Issue 41. – P. 325–331. <https://doi.org/10.1023/A:1011368620030>.

13. Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying / N. Schmitt, Y. Berthaud, J. F. Hernandez, P. Meunier and J. Poirier // British Ceramic Transactions. – 2004. – Vol. 103. – No. 3. – pp. 121–133.

14. Bulletin: The Journal of Refractory Innovations. 2022. RHI Magnesita GmbH, Vienna, Austria. 66 p.

15. Lobanov, S.P., Ovsyannikov, V.G., Bromotov, P.I. *et al.* Use of Periclase-Carbon Refractories for the Lining of 385-Ton Steel-Teeming Ladles for a Furnace-Ladle Unit Installed in an Oxygen-Converter Shop at the Magnitogorskii Metal-And-Steel Works Joint-Stock Co. Refractories and Industrial Ceramics. – 2022. – Issue 43. – C. 10–12. <https://doi.org/10.1023/A:1015891128313>.

16. Mix M., Knoll M., Angelkort J., Gestal M. The Hybrid-Ladle: A proposition for a cost-conscious steel production referring to the application of refractory linings // Intocast AG. – 2018. – URL: https://www.intocast.de/wp-content/uploads/2024/01/The_Hybrid_Ladle_2018.pdf.

17. Russo A. A. Carbon transfer from magnesia-graphite ladle refractories to ultra-low carbon steel: Masters Theses. – 2016. – No. 7567. – URL: https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7567.

18. Use of Neural Networks for Lifetime Analysis of Teeming Ladles / Jančar, D.; Machů, M.; Velička, M.; Tvardek, P.; Kocián, L.; Vlček, J. // Materials. – 2022. – Vol. 15. – 15 p.

19. Jančar D., Machů M., Velička M., Tvardek P., Kocián L., Vlček J. Use of Neural Networks for Lifetime Analysis of Teeming Ladles // Materials. – 2022. – Vol. 15. – Pp. 1–15. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15228234>.

20. Special refractory concrete for steel ladle equalization layer / Nicolae Anglescu, Dan Nicolae Ungureanu, Vasile Bratu, Florin Toma // Scientific Bulletin of Valahia'University. Materials & Mechanics. – 2019. – Vol. 17. – No. 16. – pp. 13–17.

21. Low-cement dosage refractory concrete with low thermal conductivity / Lucian Paunescu, Eniko Volceanov, Bogdan-Valentin Paunescu, Ioana Monica Surugiu // Journal of Engineering Studies and Research. – 2022. – Vol. 28. – No. 4. – pp. 98–106.

22. Migal' V.P., Skurikhin V.V., Gershkovich S.I. High-alumina cembor cements for low-cement refractory concretes / V.P. Migal', V.V. Skurikhin, S.I. Gershkovich // Refract And Ceram. – 2012. – Vol. 53. – pp. 4–8.

23. Effect of spinel content on slag attack resistance of high alumina refractory castables / L.A. Díaz, R. Torrecillas, A.H. de Aza, P. Pena // Journal of the European Ceramic Society. – 2007. – Vol. 27. – Issue 16. – pp. 4623–4631.

24. Effect of magnesium aluminate spinel content of porous aggregates on cement clinker corrosion and adherence properties of lightweight periclase-spinel refractories /

Guiyuan Wu, Wen Yan, Stefan Schafföner, Xiaoli Lin, Sanbao Ma, Yaojie Zhai, Xijun Liu, Linlin Xu // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 185. – pp. 102–109.

25. Wu G., Yan W., Schafföner S., Lin X., Ma S., Zhai Y., Liu X., Xu L. Effect of magnesium aluminate spinel content of porous aggregates on cement clinker corrosion and adherence properties of lightweight periclase-spinel refractories // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 185. – Pp. 102–109. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.058>

26. Sukriti Manna, Tamoghna Chakrabarti. Comparative Studies on Synthesis and Characterization of Titania and Iron Oxide Doped Magnesia from Indian Salem Magnesite / Sukriti Manna, Tamoghna Chakrabarti // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4. – No.7. – C. 67–76.

27. Graziella Pacheco, Geraldo Eduardo Gonçalves, Vanessa Lins. Qualitative and Quantitative Coating Tests: A Comparison in Magnesia–Spinel Refractory Bricks / Graziella Pacheco, Geraldo Eduardo Gonçalves, Vanessa Lins // *Ceramics*. – 2020. – Vol. 3(1). – pp. 144–154.

28. Kathait D. S. Ladle Furnace Refractory Lining: A review // *International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJLERA)*. – 2016. – Vol. 01, Issue 04. – Pp. 05–12. – ISSN: 2455-7137. – URL: <http://www.ijlera.com>.

29. De Aza A.H., Pena P., Rodriguez M.A., Torrecillas R., De Aza S. New spinel-containing refractory cements // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2003. – Vol. 23, Issue 5. – Pp. 737–744. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00166-8).

30. Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al.sub.2O.sub.3–SiO.sub.2–SiC. Part 4 / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2019. – Vol. 60. – Issue 2. – pp. 29–38.

31. Pivinskii Y.E., Grishpun E.M., Gorokhovskii A.M. Cement–Free Refractory Concretes. Part 12–2. Siliceous Composition HCBS and Ceramic Concretes / Y.E.

Pivinskii, E.M. Grishpun, A.M. Gorokhovskii // *Refract Ind Ceram.* – 2022. – Vol. 62. – pp. 640 – 652.

32. Huang B., Tian N., Shi Z., et al. Steel ladle exchange models during steelmaking and continuous casting process // *Journal of Iron and Steel Research International.* – 2017. – Vol. 24. – Pp. 617–624. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(17\)30093-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(17)30093-6)

33. Volkova O., Janke D. Influence of the Lining on the Thermal Behaviour of a Teeming Ladle /O. Volkova, D. Janke // *Steel Research International.* – 2005. – Vol. 76(4). – pp. 313–319.

34. Santos M., Moreira M., Campos M., Pelissari P.I., Angélico R., Sako E.Y., Pandolfelli V. Steel ladle energy savings by refractory lining design // In Proceedings of the Conference: UNITECR 2017, Santiago, Chile, 26–29 September 2017.

35. Simonov K.V., Zagnoiko V.V., Burdina G.V. Influence of technological parameters on the properties and wear resistance of periclase–carbon refractories / K.V. Simonov, V.V. Zagnoiko, G.V. Burdina // *Refractories.* – 1988. – Vol. 29. – pp. 734–741.

36. Semchenko G.D., Povshuk V.V., Starolat E.E. Periclase–Carbon Refractory Properties with a Different Amount of Graphite in the Charge Using Liquid PFR and Graphite as Modifiers / G.D. Semchenko, V.V. Povshuk, E.E. Starolat // *Refract Ind Ceram.* – 2016. – Vol. 57. – pp. 273–278.

37. Golub, T., Molchanov, L., Koveria, A., & Kieush, L. (2022). Study on a Two-Phase Low-Temperature Model of the Features of Metal Tapping in Basic Oxygen Furnace. *Acta Metallurgica Slovaca*, 28(3), 151-156.

38. Kamaraj, A., Mandal, G. K., Shanmugam, S. P., & Roy, G. G. (2022). Quantification and analysis of slag carryover during liquid steel tapping from BOF vessel. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 61(2), 202-215.

39. Eron'ko, S. P., Gorbatyuk, S. M., Oshovskaya, E. V., & Starodubtsev, B. I. (2017). Development of automatic system of gas-dynamic cut-off of slag for converter with rotating vessel shell. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 60(11), 863-869.

40. Борисюк, В. М., & Максакова, О. В. (2020). Фізичні властивості двовимірних наноматеріалів та металевих наночастинок : монографія. Сумський державний університет. 100 с.
41. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія) : Підручник / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотський, П.С. Харлашин.: – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
42. Василев Я. Д., Самокиш Д. М., Журавльова С. В., Пройдак Ю. С., Замогильний Р. О. Стан виробництва тонкого плоского сталевого проката у світі і тенденції розвитку штабових станів холодної прокатки. Теорія і практика металургії. 2019. №1, С. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02>
43. Pittner J., Simaan M. A. Optimal control of continuous tandem cold metal rolling. 2008 American Control Conference. Seattle, Washington, USA June 11-13, 2008. pp. 2834–2839.
44. Asghar M. T., Jungers M., Khelassi A., Francken J. Tandem cold rolling mill modeling for multi-variable control synthesis. 17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Aug 2016. Vienna, Austria. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393445>
45. Технологія якості і сертифікація. Навчальний посібник для студентів спеціальності 7.090404 — Обробка металів тиском / Левченко Г.В., Самохвал В.М. — Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2009 р. — 117 с.
46. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. Киев: Техника, 1982. 166 с.
47. Tahir M., Ståhlberg U., Environmental improvement by using a water-based synthetic lubricant in steel-strip rolling. Preceedings of Iron and Steel Society/AIME: 44th Mechanical Working and Steel Processing, Volume 40, pp. 291-302, Orlando, USA, September 8-11, 2002.

48. Cammen L. Sheet Rolling // Transactions of the ASME. – 1928. – Vol. 49-50(5). – Pp. 051009 (9 pages). – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4058740>.
49. Kukhar V., Korenko M., St'opin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiazhnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. Modern Electrical and Energy System. Kremenchuk, Ukraine: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, September 23–25, 2019. pp. 46–49. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465>.
50. Кухар В. В., Кармазіна І. В., Присяжний А. Г. Вплив фізико-хімічних показників прокатної емульсії на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки жерсті. Проблеми трибології. 2018. № 4. с. 92–100. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2018-90-4-92-99>.
51. Василев Я. Д., Замогильный Р. О., Самокиш Д. М. Інженерна методика визначення антифрикційної ефективності емульсолів для холодної прокатки по їх фізико-хімічним властивостям. Теорія і практика металургії. №6, 2018. С. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2>.
52. 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. Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Ukraine, 21–25 September, 2020., Kremenchuk, 2020. pp. 510–513. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240818>.
53. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164. pp.14004. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414004>.
54. Kukhar V.V., Klimov E.S., Chernenko S.M., Balalayeva E.Y. Correlation of Barreling Effect with Boundary Friction Coefficient during Upsetting of Various Materials Workpieces under Processing Conditions. Material Science Forum. 2020. Vol. 992. pp. 751–756. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.751>.

55. Романюк Р. Я. Энергозберігаючі режими обтисень для одноклітьового реверсивного стану холодної прокатки 1500 ПАТ „МОДУЛЬ”. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. 2016, Т. 2, № 29. С. 42–48.

56. Dolmatov A.P., Morozov A.V., Usachev M.A., Shipilov V.D., Chelyadinov A.A. Testing of rolling oils made by the Henkel company on a continuous five-stand 2030 mill. *Metallurgist*, Vol. 58, Nos. 9–10. P. 788–795.

57. Naizabekov A., Samsonov D., Krivtsova O., Lezhnev S., Talmazan V., Arbuz A. Comparative evaluation of technologic lubricants. *International Conference on Metallurgy and Materials. Paper presented at the METAL 2013 - 22nd. Conference Proceedings*, 403-407.

58. Курпе О. Г. Удосконалення та апробація методології керування якістю листового металопрокату / О. Г. Курпе, В. В. Кухар, А. Г. Присяжний // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2020. – № 1 (50). – С. 228–235.*

59. Hu, J., Du, L.-X., Xie, H., Gao, X.-H., & Misra, R. D. K. (2014). Microstructure and mechanical properties of TMCP heavy plate microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*, 607, 122–131. doi:10.1016/j.msea.2014.03.133

60. Технології термічної обробки високоміцних AHSS-сталей третього покоління / Р.О. Кусса, В.С. Волошин, В.І. Зурнаджи, В.Г. Єфременко, Н.П. Зайчук, Р.О. Ткачев, В.Г. Гаврилова, А.В. Джеренова // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2021, No. 71, С. 181-190. doi: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.26>

61. ДСТУ ISO 9000:2015 (ISO 9001:2015, IDT). (2016), Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів, [Чинний від 2016-07-01], ДП «УкрНДНЦ», Київ, 45 с.

62. ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). (2016), Системи управління якістю. Вимоги, [Чинний від 2016-07-01], ДП «УкрНДНЦ», Київ, 22 с.
63. Hino S. Toyota's System of Production Functions // In: *Inside the Mind of Toyota*. – 1st ed. – Productivity Press, 2005. – P. 74. – eBook ISBN: 9781003578826.
64. Ohno T. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. – Productivity Press, 2005. – 160 p.
65. Башинська І. О. SMART-підхід до визначення цілей смартизації промислового підприємства // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління, Том 30 (69), № 5, 2019, С. 41-46.
66. Peter G., Krämer A., Rupprecht C., Berthold B. Preventive Quality Management // *Expert Systems: The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century*. – 2002. – Vol. 5. – Pp. 1413–1455. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012443880-4/50083-1>.
67. Система управління якістю. Металургійний комбінат «АЗОВСТАЛЬ», available at: <https://azovstal.metinvestholding.com/ua/activity/quality/control>
68. Якість. Маріупольський МК ІМ. ІЛІЧА”, available at: <https://ilyichsteel.metinvestholding.com/ua/activity/quality>
69. “Запоріжсталь сьогодні. Запоріжсталь”, available at: <https://www.zaporizhstal.com/pidpriyemstvo/>
70. ДСТУ ISO 8258-2001 (ISO 8258:1991, IDT). (2003), Статистичний контроль. Контрольні карти Шухарта, [Чинний від 2003-07-01], Держспоживстандарт України, Київ, 32 с.
71. Steel Statistical Yearbook 2017 / World Steel Association. Homepage, <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:3e275c73-6f11-4e7f-a5d8-23d9bc5c508f/Steel+Statistical+Yearbook+2017.pdf>
72. Samohval, V., Maksymenko, O., Shtoda, M.: Peculiarities of constructions of working stands of graded rolling mills and trends in their development. Collection

of scientific works of the Dniprovsky State Technical University. Technical sciences. (Thematic is-sue), 114-123 (2018). http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2018_Tem

73. Максименко О.П., Нікулін О.В., Приймак А.Б., Мілютін І.О. Вдосконалення методики розрахунку деформаційних параметрів при калібруванні валків для дротяного стану // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2022. – Том 2, № 41. – С. 48–57.

74. Самохвал В.М., Стасько Є.В. Аналіз параметрів та моделювання зношення валків високошвидкісних дровових блоків // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2022. – Том 1, № 40. – С. 36–46. – DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.40.2022.4>.

75. Överstam H., Lundberg S.-E., Jarl M. Finite Element Modelling and Laboratory Simulation of High Speed Wire Rod Rolling in 3-Roll Stands // *Steel Research International*. – 2016. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200300210>.

76. Ilmola J., Seppälä O., Pohjonen A., Larkiola J. Virtual rolling automation and setup calculations for six stands FEM finishing mill // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 1270. – The 19th International Conference on Metal Forming (MF 2022), 11–14 September 2022. – P. 012060. – DOI: 10.1088/1757-899X/1270/1/012060.

77. Kirihara K. Modernization and introduction of new technologies in the wire rod mill at Kakogawa Works // K. Kirihara. - *SEASI Quarterly Journal*. - 2009. - № 1. - P. 23 - 29.

78. He H., Shao J., Wang X., et al. Research and application of approximate rectangular section control technology in hot strip mills // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2021. – Vol. 28. – Pp. 279–290. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00558-6>.

79. Rothe H., Siegmund H. Temperature Controlled Rolling of Wire Rod and Bar // *Technical Paper* – Originally written for the 1995 AISE Annual Convention

Program and Iron and Steel Exposition, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, September 25–28, 1995. – Last edited and updated April 27,

80. Нікулін О.В., Максименко О.П., Самохвал В.М., Григориця О.О. Графічна факторизація впливу технологічних чинників при безперервному прокатуванні // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2022. – Том 2, № 41. – С. 36–47. – DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.41.2022.4>.

81. Точність тонколистових виробів при пневмоударному штампуванні рухомими середовищами : монографія / С. Г. Ясько, Є. А. Фролов, В. В. Кухар [та ін.] Вінниця : ВНТУ, 2022. 208 с. ISBN 978-966-641-899-2

82. Kukhar V., Anishchenko O., Vishtak I. Simulation facets in theory and technology of superplastic forming. LAP LAMBERT Academic Publishing. 90 p. ISBN: 978-620-5-51152-7

83. Kukhar, V., Hrushko, O., Markov, O., Anishchenko, O., Prysiashnyi, A. (2023). Bypass Bends Deformability of CuZn5 Brass, X10CrNiTi18-9 and C22 Steel at Forming by Euler-Mode Buckling. In: Guda, A. (eds) Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 510. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_158

84. Kukhar, V., Povazhnyi, O., Grushko, O. (2023). Analysis of CuZn5 Tube Buckling During Producing of the Crossover Bend for Metallurgical Unit. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_42

85. V. V. Kukhar, E. Y. Balalayeva and V. M. Hornostai, "Comparison of Energy-Power Parameters and Electrical Energy Consumption During Cold Rolling with Emulsions at Continuous 4-Stand Mill 1680," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005716.

86. O. Khrebtova, O. Shapoval, O. Markov, V. Kukhar, N. Hrudkina and M. Rudych, "Control Systems for the Temperature Field During Drawing, Taking into Account the Dynamic Modes of the Technological Installation," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005724.

87. V. Kukhar, E. Balalayeva and O. Tuzenko, "Development of Software for Billet Barreling Predicting at the Desing of Metalforming Processes Based on Pre-Upsetting," 2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2022, pp. 462-465, doi: 10.1109/CSIT56902.2022.10000479.

88. Kukhar, V., Malii, K., & Spichak, O. (2022). Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill. *Problems of Tribology*, 27(4/106), 19–26. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26>

89. О.Г. Курпе, В.В. Кухар, К. Ву, В.Г. Єфременко, В.І. Журнаджі. Розвиток системних підходів до превентивного керування якістю термомеханічно обробленого товстолистого прокату категорії К60. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк. 74. 2022. С. 39-48..

90. Грудкіна Н.С., Левченко В.М., Абхарі П., Коцюбівська К.І., Малій Х.В. Особливості проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі енергетичних моделей розрахунку. Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА. 2022. № 1 (51). с. 38-44. DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)38

91. Тарасов О.Ф., Касьянов О.С., Грибков Е.П. Бабаш А.В., Коваленко А.К. Проектування системи керування експериментальною установкою для процесу кручення під високим тиском порожнистих заготовок. Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА. 2022. № 1 (51). с. 177-187. DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)177

92. Кухар В.В., Гоностай В.М., Курпе О.Г. Енергоспоживання та витрати емульсолу при холодній прокатці смуг з вуглецевої сталі на безперервному 4-х клітьовому стані 1680. Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА. 2022. № 1 (51). с. 134-140. DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)134.

93. Стоянов О.М., Нізяєв К.Г., Малій Х.В., Кухар В.В. Застосування вогнетривких матеріалів для сталерозливного ковша. Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Технічні науки. Вип. 46. – Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2023.

94. Курпе О.Г., Кухар В.В., Wu Kaiming, Єфременко В.Г., Зурнаджі В.І. Превентивне керування якістю термомеханічно обробленого сталевого прокату категорії К60. Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів: Збірка матеріалів [Електронний ресурс]. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка. С. 96-97. 2022. ISBN 978-617-529-387-4.

95. Кухар В. В., Савенок М. О. Застосування методів контрольних запитань та мозкового штурму для пошуку ефективних рішень з відсікання шлаку при випуску сталі з кисневого конвертеру. III Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023” (м. Вінниця, 01 – 03 червня 2023 р.). Вінниця : ВНТУ, 2023. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2023/paper/viewFile/17951/14959>.

96. Харчук Ф.Л., Малій Х.В. Моделювання процесу переробки ванадієвого чавуну в конверторі газокисневого рафінування. Молода академія – 2023: збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених, 24 – 25 травня 2023. Дніпро, УДУНТ. С. 11 - 12. https://nmetau.edu.ua/file/tom_1_23.pdf

97. Кухар В. В., Пожидаєв А. В., Доброносів Ю. К. Удосконалення механізму налаштування ролико-правильної машини при правці листового прокату використанням методу морфологічного аналізу. Важке машинобудування. Проблеми

та перспективи розвитку : Збірник тез доповідей XXI Міжнародної науково-технічної конференції (м. Тернопіль – м. Краматорськ, 20–22 червня 2023 р.). м. Тернопіль – м. Краматорськ : ДДМА, 2023, с. 76-77.

98. Штода М.М. Розробка та впровадження температурно-швидкісного режиму прокатки круглих профілів на ТЗС ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Збірник тез Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука та металургія 2022». Національна академія наук України. Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова. Дніпро. 2022. с. 71.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор — проректор з
навчальної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»



Наталія РЕКОВА
«1» червня 2023 року

ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ

Результати виконання науково-дослідної роботи «Керування показниками енергозбереження металургійних агрегатів та якості металопродукції на завершальних переділах металургійного циклу» (№ держреєстрації 0122U201187), що містять:

- енергоефективні математичні моделі операції правки листового прокату;
- умови керування показниками енергозбереження на основі використання 4-х клітьових станів;
- новий малозатратний енергоефективний спосіб виготовлення гнутих елементів охолодження футеровки металургійних агрегатів;
- системні підходи до превентивного керування якістю термохімічно обробленого товстолистового прокату;
- розвиток теорії продувки сталеплавильної ванни киснем,

використовуються на кафедрі металургії, матеріалознавства та організації виробництва ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» в рамках викладання дисциплін професійного ядра «Рециклінгові технології та підвищення енергоефективності виробництва сталі» та «Наукові основи поєднання процесів лиття та прокатки» за спеціальністю 136 Металургія ОПП «Металургія сталі».

В.о. завідуючого кафедрою металургії,

матеріалознавства та

організації виробництва,

д.т.н., проф.

Володимир ПАШИНСЬКИЙ

ДОДОТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор — проректор з
навчальної роботи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»



Наталія РЕКОВА
«1» червня 2023 року

ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ

Результати виконання науково-дослідної роботи «Керування показниками енергозбереження металургійних агрегатів та якості металопродукції на завершальних переділах металургійного циклу» (№ держреєстрації 0122U201187), що містять:

- енергоефективні математичні моделі операції правки листового прокату;
- умови керування показниками енергозбереження на основі використання 4-х клітьових станів,

використовуються на кафедрі металургії, матеріалознавства та організації виробництва ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» в рамках викладання дисциплін професійного ядра «Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному виробництві» та «Сучасні техніко-технологічні аспекти прокатного виробництва» за спеціальністю 136 Металургія ОПП «Сучасні технології прокатного виробництва».

В.о. завідуючого кафедрою металургії,

матеріалознавства та

організації виробництва,

д.т.н., проф.

Володимир ПАШИНСЬКИЙ