

УДК 669.1:622.788:621.77:004.942:658.26

№ держреєстрації 0125U003641

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

«26» червня 2026 року

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

«Модернізація металургійних процесів і моделей управління їх
ефективністю в умовах сталого розвитку»
(проміжний)

Етап 1. Аналіз і оптимізація сучасних металургійних процесів та
формування цифрових моделей прогнозування ефективності

Науковий керівник, д.т.н., професор

Володимир КУХАР

«20» червня 2026 року

2026

Рукопис закінчено «20» червня 2026 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», протокол
№ 9 від «25» червня 2026 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,
д.т.н., професор
Відповідальний
виконавець, к.т.н.
Виконавець,
д.т.н.
Виконавець,
д.т.н., професор
Виконавець,
д.т.н., професор
Виконавець,
к.т.н., доцент
Виконавець,
д.т.н., професор
Виконавець,
к.т.н., доцент
Виконавець,
к.т.н., доцент
Виконавець,
к.т.н., доцент
Виконавець,
к.т.н., доцент
Виконавець,
к.т.н., доцент
Виконавець,
к.т.н., доцент
Виконавець, здобувач
вищої освіти (аспірант)
Виконавець, здобувач
вищої освіти (аспірант)



Володимир КУХАР
(вступ, розділ 1 та 2, висновки)
Христина МАЛІЙ
(вступ, розділ 5, висновки)
Олександр КУРПЕ
(розділ 2)
Едуард ГРИБКОВ
(розділ 3)
Олексій СМІРНОВ
(розділ 1, розділ 5)
Олександр СТОЯНОВ
(розділ 1)
Костянтин НІЗЯЄВ
(розділ 1)
Євген СИНЕГІН
(розділ 2)
Валерій МАМЕШИН
(розділ 4)
Максим БОЙКО
(розділ 4)
Юрій ДОБРОНОСОВ
(розділ 3)
Максим ШТОДА
(розділ 4)
Євген ЧУПРИНОВ
(розділ 1)
Юрій РЕКОВ
(розділ 5)
Ігор НАВОЛЬНЄВ
(розділ 1)
Олександр СПІЧАК
(розділ 1 та 2)

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Давід БОЖЕНКО
(розділ 3)



Олег БУТУРЛІН
(розділ 3)



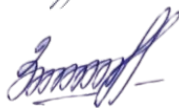
Роман ФЕДОРОВ
(розділ 4)



Наталія БУШУЙ
(розділ 5)



Сергій ЗАЛУЖНИЙ
(розділ 1)



Валентина ЗАЛУЖНА
(розділ 1)



Павло ЦИБУЛЬСЬКИЙ
(розділ 1)



Олександр КАЛЕНКОВ
(розділ 2)



Даніїл ТИМОШЕНКО
(розділ 2)



Ольга МОКРУШИНА
(розділ 4)



Сергій РОЙ
(розділ 4)



Руслан ТУРЧИН
(розділ 5)



Ольга ЧЕХУТА
(розділ 1)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 89 стор., 115 джерел, 17 рис., 13 табл.

У звіті наведено результати виконання першого етапу науково-дослідної роботи, присвяченої аналізу та оптимізації сучасних металургійних процесів, удосконаленню технологій виробництва металопродукції та розробці цифрових моделей прогнозування ефективності технологічних систем підприємств гірничо-металургійного комплексу. Дослідження охоплюють процеси підготовки залізорудної сировини, виробництва окатишів, гарячої прокатки плоского та сортового прокату, цифровізації технологічного проектування прокатного виробництва, а також фізико-хімічні аспекти забезпечення якості сталі.

Перший тематичний напрям досліджень присвячено підвищенню ефективності виробництва залізорудних окатишів шляхом аналізу впливу властивостей шихти та застосування поверхнево-активних речовин на енергоспоживання випалювальних машин. Досліджено повний цикл термічної обробки окатишів, включаючи сушіння, підігрів, випал, рекуперацію та охолодження. На основі промислових випробувань встановлено закономірності впливу вологості шихти, витрати вапняку, міцності сирих окатишів, висоти шару та тиску газу на витрати електроенергії та продуктивність процесу. Визначено ключові фактори, які впливають на енергетичну ефективність виробництва окатишів, та обґрунтовано підходи до прогнозування енергоспоживання при зміні характеристик залізорудної сировини. Окрему увагу приділено оцінці технологічних наслідків використання концентратів, оброблених поверхнево-активними речовинами, в умовах промислового виробництва.

Другий напрям досліджень пов'язаний з удосконаленням технології виробництва плоского прокату на ливарно-прокатних комплексах. Проведено порівняльний аналіз технологічних можливостей ливарно-прокатних модулів та широкоштабових станів гарячої прокатки. Встановлено особливості формування структури та властивостей металу при реалізації термомеханічно контрольованої прокатки. Досліджено вплив температурних режимів, ступеня та швидкості

деформації на розмір зерна аустеніту та формування комплексу механічних властивостей трубних сталей. Запропоновано оптимізовані режими прокатки штаби для забезпечення вимог технології термомеханічного процесу (ТМСР) прокатки та підвищення конкурентоспроможності сучасних ливарно-прокатних виробництв. Результати досліджень спрямовані на підвищення металоєфективності, енергоефективності та якості гарячекатаного прокату.

Третій тематичний блок присвячено математичному моделюванню процесів прокатки листового металопродукату в еджерних валках та створенню інструментів автоматизованого проєктування режимів деформації. На основі методу скінченних елементів розроблено двовимірні та тривимірні моделі формозміни металу при вертикальній прокатці. Визначено закономірності зміни енергосилових параметрів процесу залежно від величини обтиснення та геометричних характеристик осередку деформації. Отримано регресійні залежності для прогнозування сили та моменту прокатки, досліджено особливості формування дефектів типу «собача кістка» та нерівномірності деформації по товщині прокату. Результати створюють основу для автоматизації розрахунків при розробці нових технологічних режимів та проєктуванні прокатного обладнання.

Четвертий напрям досліджень присвячено цифровій трансформації прокатного виробництва шляхом створення математичних моделей та цифрових рішень для автоматизованого проєктування калібрів валків. Розроблено універсальну математичну модель безперервної прокатки у системі калібрів «овал–круг», засновану на варіаційному принципі мінімуму сумарної потужності внутрішніх та зовнішніх сил деформації. Запропоноване цифрове рішення може використовуватися для конструювання, оптимізації та аналізу ефективності калібрування валків на сортових прокатних станах. Отримані результати сприяють скороченню витрат часу та ресурсів на технологічну підготовку виробництва, підвищенню точності розрахунків та розвитку цифрових сервісів підтримки прийняття технологічних рішень у металургії.

П'ятий напрям досліджень спрямований на підвищення якості металопродукції шляхом удосконалення фізико-хімічних основ керування

неметалевими включеннями у сталевих розплавах. Проведено термодинамічні дослідження процесів утворення шпінельних включень типу $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, які є одним із найбільш небезпечних видів неметалевих включень у високоякісних сталях. Визначено вільну енергію утворення оксиду магнію та шпінелі за температур сталеплавильних процесів, встановлено коефіцієнти активності компонентів та досліджено закономірності поведінки твердих розчинів у системі $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$. Отримані результати дозволяють уточнити механізми формування шпінельних включень, оцінювати їхню фазову стабільність у сталевих розплавах та розробляти технологічні заходи щодо зниження забрудненості сталі неметалевими включеннями. Практичне значення досліджень полягає у підвищенні чистоти сталі, покращенні механічних властивостей металопродукції та забезпеченні стабільності показників якості відповідальних виробів.

У межах виконання науково-дослідної роботи також проводилися супровідні дослідження, присвячені питанням декарбонізації металургійного виробництва, енергоефективності технологічних процесів, цифрового моделювання металургійних систем, прогнозування властивостей металопродукції, дослідження корозійної стійкості оцинкованих профілів, удосконалення технологій зварювання, а також застосування методів Data Science та машинного навчання для вирішення виробничих задач гірничо-металургійного комплексу.

Отримані результати формують науково-методичну основу для подальшого розвитку цифрових технологій у металургії, удосконалення процесів підготовки сировини, виробництва та обробки сталі, підвищення якості металопродукції, зниження енерговитрат і забезпечення конкурентоспроможності металургійних підприємств в умовах технологічної модернізації та переходу до низьковуглецевого виробництва.

Ключові слова:

МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ; ЗАЛІЗОРУДНІ ОКАТИШІ;
ВИПАЛЮВАЛЬНА МАШИНА; ШИХТА; ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНІ

РЕЧОВИНИ; ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ; ГАРЯЧА ПРОКАТКА; ЛИВАРНО-ПРОКАТНИЙ МОДУЛЬ; ТМСР; АУСТЕНИТНЕ ЗЕРНО; ЕДЖЕРНІ ВАЛКИ; СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ; АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ; КАЛІБРУВАННЯ ВАЛКІВ; ЦИФРОВІ РІШЕННЯ; БЕЗПЕРЕРВНА ПРОКАТКА; НЕМЕТАЛЕВІ ВКЛЮЧЕННЯ; ШПІНЕЛЬ; ЯКІСТЬ СТАЛІ; ЦИФРОВА МЕТАЛУРГІЯ.

Мета роботи – розвиток наукових і методичних засад аналізу, удосконалення та оптимізації сучасних металургійних процесів шляхом підвищення ефективності підготовки залізорудної сировини, виробництва та обробки металопродукції, забезпечення її якості, а також розробки цифрових моделей і програмних рішень для прогнозування та підтримки прийняття технологічних рішень у металургії.

Об’єкт дослідження – технологічні процеси підготовки залізорудної сировини, виробництва окатишів, гарячої прокатки плоского та сортового прокату, процеси формування якості сталі, а також цифрові системи підтримки проєктування та оптимізації металургійного виробництва.

Предмет дослідження:

- закономірності впливу властивостей шихти та поверхнево-активних речовин на енергоспоживання випалювальних машин;
- режими термомеханічної обробки металу на ливарно-прокатних комплексах;
- енергосилові параметри процесів прокатки в еджерних валках;
- математичні моделі формозміни металу в системах калібрів прокатних станів;
- цифрові інструменти автоматизованого проєктування прокатного виробництва;
- термодинамічні закономірності утворення неметалевих включень у сталі;
- методи підвищення якості металопродукції та ефективності металургійних процесів.

Результати та їх новизна:

- Встановлено закономірності зміни енергоспоживання випалювальних машин залежно від властивостей шихти, параметрів технологічного процесу та використання поверхнево-активних речовин при виробництві залізорудних окатишів.
- Визначено найбільш впливові фактори, що формують енергетичну ефективність процесу випалу окатишів, та розроблено підходи до прогнозування енергоспоживання при зміні характеристик залізорудної сировини.
- Удосконалено науково-методичні підходи до вибору режимів гарячої прокатки на ливарно-прокатних комплексах з урахуванням умов термомеханічно контрольованої прокатки та вимог до структури і механічних властивостей металу.
- Визначено вплив швидкості та ступеня деформації на формування аустенітного зерна при виробництві трубних сталей та розроблено рекомендації щодо оптимізації режимів прокатки.
- Розроблено двовимірні та тривимірні скінченно-елементні моделі процесу прокатки в еджерних валках, які дозволяють визначати енергосилові параметри процесу та прогнозувати особливості формоутворення прокату.
- Отримано регресійні залежності для автоматизованого розрахунку сили і моменту прокатки, придатні для використання при проєктуванні та модернізації прокатного обладнання.
- Розроблено цифрове рішення для автоматизованого проєктування калібрів валків та аналізу ефективності налаштування прокатного обладнання на основі математичної моделі безперервної прокатки у системі калібрів «овал–круг».
- Запропоновано математичний апарат для цифровізації роботи калібрувальних бюро металургійних підприємств та скорочення обсягів експериментальних робіт при освоєнні нових профілів прокату.
- Отримано нові дані щодо вільної енергії утворення оксиду магнію та шпінелі $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ за температур сталеплавильних процесів.

– Визначено активності компонентів та особливості поведінки твердих розчинів у системі $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$, що дозволяє уточнити механізми формування шпінельних включень у сталі.

– Розвинено наукові уявлення щодо впливу неметалевих включень на якість металопродукції та сформовано передумови для вдосконалення технологій отримання високоякісних сталей із підвищеним рівнем чистоти металу.

– Набули подальшого розвитку цифрові підходи до аналізу, прогнозування та оптимізації металургійних процесів, що створює основу для впровадження концепцій цифрової металургії та Індустрії 4.0 на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Інформація щодо впровадження: Результати досліджень використовуються у науковій діяльності та освітньому процесі ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» під час підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю G10 «Металургія», а також у межах освітніх програм: освітньо-професійна програма (ОПП) «Металургія чорних металів», ОПП «Металургія сталі», ОПП «Аглодоменне виробництво», ОПП «Сучасні технології прокатного виробництва», міждисциплінарна освітньо-наукова програма (ОНП) 136+073 «Управління модернізацією металургії», ОНП третього рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія».

Окремі результати досліджень використано при підготовці наукових публікацій, кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти, виконанні науково-дослідних проєктів та розробленні навчально-методичного забезпечення освітніх компонентів металургійного спрямування.

Зв'язок з іншими роботами: Дослідження є продовженням робіт, спрямованих на розвиток наукових засад удосконалення металургійних процесів, обладнання та цифрових технологій управління їх ефективністю, а також логічно пов'язане з дослідженнями у сфері енергоефективності металургійних агрегатів, цифрового моделювання технологічних процесів, забезпечення якості металопродукції та розвитку концепції цифрової трансформації підприємств гірничо-металургійного комплексу. Попередні НДР:

- НДР № 0223U003877 «Керуванням показниками енергозбереження металургійних агрегатів та якості металопродукції на завершальних переділах металургійного циклу»;

- НДР № 0223U003910 «Прикладні аспекти трансформації бізнес-процесів гірничо-металургійних компаній на засадах Performance Management»;

- НДР № 0123U102947 «Розвиток наукових та методологічних засад удосконалення металургійних процесів, устаткування та методів управління їх ефективністю» (проміжна). Етап 1. Удосконалення процесів та режимів роботи устаткування на етапах виготовлення металопродукції, оптимізація управління виробництвом та організаційними змінами підприємств чорної металургії на засадах Business Performance Management .

- НДР № 0123U102947 «Розвиток наукових та методологічних засад удосконалення металургійних процесів, устаткування та методів управління їх ефективністю» (остаточний). Етап 2. Розробка наукових та методологічних рекомендацій з удосконалення технологій, режимів роботи устаткування і підвищення ефективності управління бізнес-процесами у чорній металургії.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: Отримані результати можуть бути використані:

- на гірничо-збагачувальних комбінатах для підвищення енергоефективності виробництва залізрудних окатишів, оптимізації складу шихти та вибору раціональних режимів роботи випалювальних машин;

- на металургійних підприємствах при вдосконаленні технологій гарячої прокатки плоского прокату, розробленні режимів термомеханічно контрольованої прокатки та освоєнні виробництва високоякісних сталей;

- у прокатному виробництві для автоматизованого розрахунку режимів деформації, проєктування калібрів валків, оцінювання енергосилових параметрів процесів прокатки та оптимізації налаштування обладнання;

- у сталеплавильному виробництві для розроблення заходів щодо зниження забрудненості сталі неметалевими включеннями, підвищення чистоти металу та забезпечення стабільності показників якості металопродукції.

- при створенні цифрових систем підтримки прийняття технологічних рішень та цифрових двійників металургійних процесів;
- у навчальному процесі закладів вищої освіти під час підготовки бакалаврів, магістрів та докторів філософії за спеціальностями металургійного, матеріалознавчого та інженерного спрямування.

Сфера застосування: Підприємства гірничо-металургійного комплексу, гірничо-збагачувальні комбінати, металургійні та прокатні виробництва, науково-дослідні й проєктні організації.

Практичне значення: Результати роботи можуть бути використані для підвищення енергоефективності виробництва окатишів, удосконалення технологій гарячої прокатки, автоматизації проєктування режимів деформації та калібрування валків, а також підвищення якості металопродукції.

Значимість роботи: Робота спрямована на вдосконалення металургійних процесів, підвищення якості металопродукції та розвиток цифрових підходів до моделювання і проєктування технологічних процесів.

Висновки та пропозиції: Перспективними напрямками подальших досліджень є підвищення енергоефективності виробництва окатишів, удосконалення технологій гарячої прокатки, розвиток цифрових моделей процесів деформації металу та дослідження закономірностей утворення неметалевих включень у сталі.

Умови одержання звіту: Повний звіт доступний за письмовим запитом у виконавця НДР. Матеріали дослідження є результатом колективної роботи, частково імплементовані в опублікованих наукових статтях і тезах конференцій, доступних через бібліометричні бази даних та інституційний репозитарій.

ЗМІСТ

№№	Стор.
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗАЛЕЖНО ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН.....	15
РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ШТАБ НА ЛИВАРНО-ПРОКАТНИХ КОМПЛЕКСАХ.....	31
РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОБТИСНЕНЬ В ЕДЖЕРНИХ ВАЛКАХ.....	46
РОЗДІЛ 4. ЦИФРОВЕ РІШЕННЯ ДЛЯ КАЛІБРОВКИ ВАЛКІВ: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОКАТКИ В КАЛІБРАХ «ОВАЛ-КРУГ».....	53
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДА СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ.....	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	73
Додаток. ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ.....	89

ВСТУП

Сучасний розвиток гірничо-металургійного комплексу характеризується необхідністю підвищення енергоефективності виробництва, забезпечення якості металопродукції, зниження матеріаломісткості технологічних процесів та впровадження цифрових технологій. В умовах зростання вимог до конкурентоспроможності продукції металургії особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на вдосконалення окремих стадій виробництва – від підготовки залізорудної сировини до отримання готової металопродукції.

Одним із важливих напрямів розвитку сучасної металургії є підвищення ефективності виробництва залізорудних окатишів, які виступають основною сировиною для доменних та бездоменних процесів одержання заліза. Значна енергоємність процесів сушіння, випалу та охолодження окатишів обумовлює необхідність дослідження впливу властивостей шихти, технологічних параметрів та застосування поверхнево-активних речовин на продуктивність і енергоспоживання випалювальних машин. Вирішення цих завдань має важливе значення для підвищення ресурсної та енергетичної ефективності гірничо-збагачувальних комбінатів.

Не менш актуальним напрямом є вдосконалення технологій виробництва плоского прокату. Сучасні ливарно-прокатні комплекси забезпечують поєднання процесів безперервного лиття та гарячої прокатки, що дозволяє підвищити ефективність виробництва та скоротити витрати енергоносіїв. Разом із цим виникає необхідність удосконалення режимів ТМСП, забезпечення необхідної мікроструктури та комплексу механічних властивостей сталей, особливо при виробництві відповідальної металопродукції.

Важливою складовою підвищення ефективності прокатного виробництва є розвиток методів математичного моделювання та автоматизованого проектування. Використання скінченно-елементних моделей дозволяє досліджувати особливості формоутворення металу, визначати енергосилові параметри процесів деформації та створювати інженерні залежності для

автоматизації технологічних розрахунків. Особливого важливі такі підходи при проектуванні режимів прокатки в еджерних валках, де від точності розрахунків залежить якість бічних кромek прокату та вихід придатної продукції.

Розвиток металургійного бізнесу нерозривно пов'язаний із цифровою трансформацією технологічних процесів. Одним із перспективних напрямів є створення цифрових інструментів для автоматизованого проектування калібрів валків та оптимізації режимів сортової прокатки. Використання математичних моделей скорочує обсяг виробничих експериментів, підвищити точність технологічних розрахунків та прискорити освоєння нових видів металопродукції.

Особливе місце серед завдань сучасної металургії займає забезпечення якості сталі та металопродукції. Одним із чинників, що суттєво впливають на експлуатаційні властивості металу, є неметалеві включення. Зокрема, шпінельні включення типу $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ можуть негативно впливати на якість високовідповідальних сталей, що обумовлює необхідність поглибленого вивчення термодинамічних закономірностей їх утворення та стабільності у сталевих розплавах. Отримання нових даних щодо активності компонентів та енергії утворення шпінелі створює наукові передумови для вдосконалення технологій рафінування металу та підвищення чистоти сталі.

Поряд із зазначеними напрямами у межах виконання науково-дослідної роботи проводилися супровідні дослідження, присвячені питанням декарбонізації металургійного виробництва, енергоефективності технологічних процесів, корозійної стійкості металопродукції, удосконалення технологій зварювання, цифрового моделювання та застосування методів аналізу даних для вирішення виробничих завдань гірничо-металургійного комплексу.

Таким чином, у звіті узагальнено результати досліджень, спрямованих на підвищення ефективності металургійних процесів, розвиток цифрових технологій проектування та моделювання, забезпечення якості металопродукції та створення науково-практичних передумов для подальшої модернізації підприємств гірничо-металургійного комплексу.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗАЛЕЖНО ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Вступ. Забезпечення енергоефективності процесів виробництва залізорудних окатишів є одним із актуальних викликів розвитку гірничо-металургійної галузі в умовах глобальних тенденцій на декарбонізацію виробництва та перехід до "зеленої" металургії [1]. Ефективне використання енергоресурсів сприяє поліпшенню економічної стійкості підприємств і зниженню негативного впливу на довкілля шляхом скорочення викидів парникових газів. Наприклад, у роботах [2, 3] зазначено, що виробництво залізорудних окатишів, яке є важливим проміжним продуктом для металургійної переробки, розглядається як один із пріоритетних напрямків для впровадження енергоощадних рішень у сталевиробній промисловості.

Процес отримання окатишів включає процес збагачення руд і отримання концентрату, формування сирих окатишів шляхом огрудкування та їх сушіння [4, 5]. Основними джерелами енергоспоживання є електроенергія для роботи змішувачів, огрудкувачів, тягодуттєвого обладнання, конвеєрів, укладальників та іншого обладнання, а також теплова енергія для видалення вологи під час сушіння. Враховуючи комплексну складність технологічного обладнання, необхідно забезпечувати пильний контроль його стану для мінімізації виробничих ризиків [6, 7]. Ефективність процесів сушіння сирих окатишів істотно залежить від фізико-хімічних властивостей шихти, зокрема вологості концентрату і сирих окатишів, гранулометричного складу, вмісту в'язучих матеріалів та реологічних характеристик суміші [8–11], які формуються на попередніх стадіях. Однією з таких стадій є подрібнення залізорудної сировини, ефективність якого визначається, зокрема, зносостійкістю тіл для подрібнення; як показано у [12], підвищення їх довговічності сприяє стабілізації гранулометричних і фізико-хімічних параметрів концентрату, що позитивно

впливає на подальшу ефективність виробництва окатишів. Реологічні властивості вологого концентрату істотно впливають на формування сирих окатишів, їх густину та міцність, що підтверджується результатами досліджень [13], де встановлено взаємозв'язок між моментом активації поверхні залізородного концентрату і фізико-механічними характеристиками «сирих» окатишів. Також дослідниками [14] встановлено, що реологічні характеристики залізородних суспензій залежать від вмісту твердих часток і гранулометричного складу, а додавання дрібних фракцій до грубозернистої пульпи суттєво знижує її в'язкість.

За даними [15], питомі витрати теплової енергії на сушіння мінеральних концентратів зазвичай становлять 800–1500 ккал на кілограм видаленої води ($0,93\text{--}1,74\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$), що підкреслює вплив вологості (вогкості) концентрату на енергомісткість процесу. В роботі [16] встановлено, що при сушінні латеритної руди у промислових обертових сушарках з високою початковою вологістю ($\sim 27\%$) спостерігаються значні теплові втрати через корпус сушарки, що досягають 3,5% витраченої енергії палива ($5,8\text{ ГДж/год}$), що зумовлюється особливостями теплообміну та характеристиками вихідної сировини. З метою підвищення ефективності сушіння та зниження енерговитрат розробляються нові технології, зокрема мікрохвильове сушіння залізородних окатишів, яке, за даними [17], забезпечує прискорене видалення вологи за рахунок зниження енергії активації процесу і підвищення ефективної дифузії вологи у порівнянні з традиційним конвективним методом [15, 18]. Витрати енергії та теплові втрати у процесах збагачування оптимізують аналогічно до металургійних процесів — шляхом розробки математичних моделей, як це показано в роботі [19] для металургійного обладнання. Температурні режими та енергоспоживання регулюють за допомогою засобів автоматичного керування й систем температурного моніторингу [20].

Вологість шихти та сирих окатишів є одним із головних чинників, що визначає витрати енергії на сушіння [4, 15, 21]: підвищення вологості потребує більше тепла для випаровування та збільшує час сушіння. Це веде до зниження

продуктивності обладнання і підвищення частки браку через погіршення міцності сирих окатишів. Гранулометричний склад шихти також суттєво впливає на енергоспоживання [4, 5, 9, 15]: дрібні фракції швидше висушуються, але надлишок дрібних частинок сприяє втратам продукції. Великі окатиші вимагають довшого сушіння, що потребує додаткових витрат енергії та знижує темпи виробництва.

Одним із напрямків удосконалення технології виробництва залізорудних окатишів є впровадження нових типів концентратів, оброблених поверхнево-активними речовинами (ПАР) [11, 21]. Ефекти застосування ПАР є досить протиречивими. З однієї сторони, застосування ПАР змінює змочуваність і реологічні властивості концентрату, покращуючи його здатність до огрудкування та зменшує злежуваність. При цьому, як показано у [22], обробка концентрату аніонними та неіонними ПАР дозволяє додатково знизити вологість концентрату на 2–4% за рахунок зміни поверхневих властивостей частинок. Водночас обробка концентрату ПАР супроводжується підвищенням вологості шихти та зміною структури поверхні частинок. Дослідниками [23] встановлено, що використання поверхнево-активних флотаційних реагентів (зокрема Atras) у залізорудному концентраті призводить до підвищення пористості та зниження міцності сирих окатишів, що погіршує їх поведінку під час сушіння і може сприяти зростанню енерговитрат через зниження проникності шару і утворення пилу. Підвищена вологість ускладнює процес сушіння, збільшує питомі витрати енергії та може знижувати продуктивність обпалювальної машини. Крім того, зміни у формуванні шару сирих окатишів на конвеєрних машинах можуть призводити до нестабільності технологічного процесу [4, 15]. Поряд із цим використання ПАР забезпечує покращення дисперсності концентрату та стабілізацію гранулометричного складу сирих окатишів. Також спостерігається потенційне зниження витрати в'язучих речовин, зокрема бентоніту, що позитивно впливає на міцність сирих окатишів [11, 24]. Усі ці зміни потребують комплексного врахування при оцінці впливу ПАР на енергоспоживання та продуктивність виробничого процесу.

Проблема прогнозування енергоспоживання є особливо актуальною для гірничозбагачувальних комбінатів, в тому числі Кривбасу, на яких здійснюється виробництво залізрудних окатишів для металургійної галузі. На цих підприємствах виникають технологічні труднощі, пов'язані з підвищенням вологості концентрату, необхідністю оптимізації витрати бентоніту для забезпечення якості сирих окатишів та застосуванням поверхнево-активних речовин (ПАР). При плановому переході базового Підприємства «А» на концентрат виробництва Підприємства «Б» відбуваються зміни фізико-хімічних характеристик шихти, що призводять до змін продуктивності технологічного обладнання та витрат електроенергії. У зв'язку з цим актуальним є завдання встановлення кількісних залежностей між характеристиками сировини та параметрами енергоспоживання і продуктивності. В цій роботі умовні назви "Підприємство «А»" та "Підприємство «Б»" використано з міркувань конфіденційності та дотримання принципу комерційної нейтральності, щоб уникнути ненавмисної реклами або антиреклами конкретних виробників.

Метою роботи було встановлення кількісних залежностей між фізико-хімічними характеристиками шихти (зокрема вологістю, гранулометричним складом та використанням поверхнево-активних речовин) і питомими витратами електроенергії, а також продуктивністю випалювального агрегату у промислових умовах Підприємства «А» при переході з базового концентрату на модифікований ПАР концентрат виробництва Підприємства «Б».

Матеріали та методики.

1. Технологічні умови, обладнання та організація промислового експерименту. Перед початком випробувань було підготовлено обладнання всього технологічного комплексу: дозатори, млинові тракти, чашові огрудковувачі, роликовий трипродуктовий грохот Metal7 (з зазорами 16,0 мм та 9,0 мм), грохот ГСТ, димососи, а також проведено перевірку й налагодження вагового обладнання.

Експериментальні дослідження проведено на промисловій випалювальній машині Підприємства А, призначеній для термічної обробки залізрудних

окатишів. Установка є безперервною конвеєрною системою з ланцюговим транспортером і візками, які переміщують шар окатишів через зони сушіння, підігріву, випалу, рекуперації та охолодження. Конструкція машини включає інжекційні пальники, газорозподільні камери з газоповітря розподільними пристроями, систему подачі рециркульованого теплоносія та автоматизовану систему регулювання температурних режимів. Рекуперація тепла забезпечує підвищену енергоефективність і зниження витрат палива.

Основні технічні характеристики випалювальної машини (Підприємство «А»): Річна продуктивність — 2,4 млн т; поточна — 300 т/год; питома продуктивність — 0,893 т·м²/год; шар сирих окатишів — 300 мм; кількість візків — 142; газоповітряних камер — 28; швидкість руху візків — 0,6–2,5 м/хв; маса візка — 10,3 т; розподіл зон: сушіння, нагрів, випал, рекуперація (макс. зона — рекуперація 37,5 %); максимальна температура випалу — 1350 °C; теплоносій на виході — до 550 °C; питома витрата теплоти — 533,68 МДж/т; природного газу — 17,9 м³/т; електроенергії — 30,7 кВт·год/т; температура окатишів на виході — 100 °C; потужність привода — 32 кВт; загальна маса — 4600 т. Промислові випробування проводили у зв'язку з виробничою необхідністю повного переходу з концентрату Підприємства «А» на концентрат, вироблений Підприємством «Б». Обидва концентрати мали високий вміст заліза (понад 67 %), однак концентрат Підприємства «Б» вирізнявся підвищеною дисперсністю (фракція –0,056 мм: 98,0–98,6 %; фракція +0,056 мм (відповідно залишок): 1,4–2,0 %). Під час попередніх випробувань було встановлено, що підвищена дисперсність концентрату Підприємства «Б» негативно впливає на огрудковуваність (комкуємість) шихти, що спричиняє збільшення обсягу сирого повернення та зниження стабільності формування шару окатишів. Для компенсації цієї проблеми застосовували попередню обробку концентрату Підприємства «Б» поверхнево-активною речовиною (ПАР) Clearon S955 — неіоногенною сполукою на основі етоксильованого ізотридеканолу, яка застосовується переважно для покращення фільтрації та зневоднення концентрату після збагачення.

Випробування тривали вісім діб. Упродовж перших двох днів випалювальна машина працювала на базовому концентраті Підприємства «А» для стабілізації технологічного режиму та фіксації контрольних показників. Починаючи з 21:00 другого дня було повністю введено концентрат Підприємства «Б» (оброблений ПАР), який завантажували після спустошення бункерів і використовували до завершення експерименту. Усі ключові технологічні параметри (витрати сировини, газу, електроенергії, температури, характеристика продукції) фіксувалися погодинно, позмінно та усереднено за добу, що забезпечило можливість порівняльного аналізу впливу типу концентрату на ефективність процесу.

2. Методи та засоби вимірювання. Вологість концентрату визначали зважуванням проб до та після сушіння у шафі БСЛ-1.0.3 (прямоток, теплоносій — топкові гази) при 105 ± 5 °C до сталої маси. Гранулометричний склад сирих окатишів визначали ситовим методом (згідно ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017) з використанням віброгрохота 8ГВ-3Я з трьохвальним віброзбуджувачем (діапазон 5–20 мм). Міцність на стиск сирих окатишів визначалася методом відповідно до ДСТУ 3212-95 (аналогічно ISO 4700:2015), шляхом застосування стискаючої сили до окремих окатишів до руйнування. Міцність на скидання оцінювалася відповідно до ДСТУ 3213-95 (аналогічно ISO 3271:2015), шляхом скидання окатишів з висоти 0,5 м на сталеву пластину та підрахунку кількості скидів до руйнування. Гранулометричний склад для класу 10-14 мм (X8) оцінювався в сирих окатишах методом ситового аналізу (ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017), що відображає ефективність процесу грануляції та стабільність формування окатишів. Продуктивність фіксували стрічковими вагами Schenck MULTIDOS (похибка 0,1–1,0 %, до 1000 т/год, швидкість ленти — до 0,2 м/с). Облік витрат електроенергії визначали за промисловими електролічильниками НІК 2303 АРЗ (клас точності 1.0). Питомі витрати розраховували з урахуванням змінного випуску продукції на основі хронометрування та добового обліку.

3. Визначення факторів, що впливають на результат. При проведенні дослідно-промислових випробувань здійснювали щогодинний контроль

наступних технологічних параметрів: продуктивності машини (т/год), швидкості руху візків (м/хв), температури в зоні сушіння ($^{\circ}\text{C}$), розрідження (даПа), кількості сирих окатишів на грохоті (т/год), витрати бентоніту (кг/т), витрати обпаленого повернення (т/год), вологості сирих окатишів (%), питомої витрати електроенергії (кВт·год/т) та ін. Дані систематизували у таблицях щоденного обліку (із розрахунком усереднених значень за добу), для встановлення змін у роботі обладнання при переході від використання базової сировини до концентрату Підприємства «Б», модифікованого ПАР. Провели класифікацію факторів (див. табл. 1.1), що впливають на результат у вигляді продуктивності машини, витрат електричної енергії.

Цільовою функцією стало енергоспоживання (Y_1 – питома електроенергія), оскільки основною метою було оцінити енергетичні наслідки на стадії сушіння. Вплив на якість обпалених окатишів (наприклад, міцність) не оцінювався в цьому дослідженні, оскільки попередні перевірки підтвердили відповідність стандартам, а фокус був на ефективності процесу, а не на кінцевому продукті металургії. Майбутні роботи можуть розширитися на властивості обпалених окатишів.

Для зменшення кількості факторів впливу застосовували метод експертних оцінок, що дозволило скоротити їх кількість до 5 (у випадку віднесення продуктивності до фактору впливу, кількість факторів збільшується до 6). Логіка скорочення кількості факторів полягала у тому числі в нівелюванні впливом технологічних факторів, значення яких не отримали відчутних змін при переході з однієї сировини на іншу, тобто, за інших рівних умов, їх вплив є рівнозначним.

В процесі отримання рівнянь регресії за методикою Data Analysis додатково перевіряється вплив кожного з обраних факторів, що дозволяє з'ясувати нівелювання впливу деяких факторів на результат із відповідним додатковим скороченням складових математичної моделі.

Таблиця 1.1 – Класифікація факторів впливу

Обладнання (Machine)	Матеріали (Material)	Методи (Method)	Вимірювання (Measurement)
Випалювальна машина, інжекційні пальники, ГПРП, грохот Metal7, грохот ГСТ, димососи, шафа БСЛ-1.0.3, віброгрохот 8ГВ-3Я	Бентоніт (витрата, фракція, вологість, набухання), вапняк, обпалене повернення, вологість концентрату та сирих окатишів, фракція – 0,056 мм, вміст Fe, SiO ₂ , CaO+MgO, ПАР Clearon S955	Порядок подачі концентратів, дозування, стабілізація параметрів, використання тимчасової карти режимів	Визначення вологості (шафа), ситовий аналіз (сита Ø200 мм), стрічкові ваги Schenck, електролічильники НІК 2303 АРЗ
Людський фактор (Man)	Управління (Management)	Обслуговування (Maintenance)	Середовище (Mother Nature)
Персонал, ознайомлений з методикою; ручне та/або автоматизоване керування режимами; хронометрування	Організація транспортування, складування, розробка карт, перевірка дозаторів і бункерів	Профілактика, налаштування вузлів і приладів, техобслуговування	Температура в зоні сушіння, розрідження в горні та камерах, тиск у ГПК, вологість середовища

Результати. У ході промислових випробувань було зібрано та систематизовано подрібнені подобові значення технологічних параметрів, що охоплюють два періоди: використання базового концентрату Підприємства «А» (дні 1–2) та перехід на концентрат Підприємства «Б» з обробкою ПАР (дні 3–8).

В табл. 1.2 та табл. 1.3 наведено значення ключових факторів впливу (X1...X5) та результати для показника (Y1), включно з добовими значеннями, повним діапазоном коливань кожного з параметрів (min...max), а також зведеними середніми по кожному з етапів.

Таблиця 1.2 – Вхідні параметри та структура регресійної моделі

Вигляд рівняння регресії	Назва фактору (X) або (Y)	Одиниці вимірювання	Позначення фактору	Діапазон (min...max)
$Y_1 = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5$	Витрати вапняку	кг/т	X ₁	5,3..8,97
	Вміст вологи у сирому окатиші	%	X ₂	8,3..9,6
	Міцність на роздавлювання	кг/окатиш	X ₃	1,18..1,56
	Висота шару сирих окатишів	мм	X ₄	304...359
	Тиск у вакуумній камері	даПа	X ₅	256...491
	Питома витрата електроенергії	кВт/т·год	Y ₁	31,8...40,03

Третій день представляв перехідний період адаптації під час заміни концентрату, з екстремальними значеннями для обраних факторів через коригування режиму.

При цьому, зростання пікове споживання електроенергії з 31,8 кВт·год/т на початку експерименту до 40,03 кВт·год/т прийшлося на третю добу в момент переходу на п'яту добу експерименту. Це відбулося тому що на п'ятий день припав так званий пік «шоку», а саме складання наступних параметрів: пікове накопичення вологи, найнижча газопроникність шару зумовлена зокрема зростанням використання вапняку, ручна адаптація теплових режимів, що призвела до подовження циклів сушіння та максимального навантаження на тягодуттєве обладнання. Надалі (6–8 дні) споживання стабілізувалося на рівні ~40,0 кВт·год/т завдяки оптимізації параметрів.

Дані отримані вимірюванням на протязі 2 днів роботи з концентратом Підприємства «А» та 8 днів роботи з концентратом Підприємства «Б» в загальному обсязі 64 в межах діапазону в табл. 2 та структуруються відповідно до формул регресійного аналізу, що покладені в основу математичних моделей залежності вихідних параметрів від ключових факторів впливу. Зміна сировини

супроводжувалась варіаціями у витратах основних компонентів шихти, фізико-хімічних властивостях концентрату, параметрах формування сирих окатишів та ефективності процесу випалювання.

Таблиця 1.3 – Подобові експериментальні дані факторів X1 – X5 та питомої витрати електроенергії Y1 під час переходу від концентрату Підприємства «А» до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР

Доба	X ₁ , Витрата вапняку, кг/т	X ₂ , Волога, %	X ₃ , Міцність на роздавлення	X ₄ , Висота шару, мм	X ₅ , Тиск вак.кам, даПа	Y ₁ , ел.ен., кВт/год
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1 (початок експерименту)	5,3	8,4	1,42	356	482	31,8
2 (за 8 годин до зміни сировини)	5,3	8,4	1,48	357	470	33,3
3 (зміна сировини)	8,96	8,8	1,27	337	286	37,15
3 (8 годин після заміни сировини)	8,96	8,9	1,34	335	278	36,78
4 (8 годин до піку «шоку»)	8,95	8,8	1,31	304	256	38,72
5 (пік «шоку»)	8,97	8,9	1,32	326	280	40,03
5 (8 годин після піку «шоку»)	8,95	9,6	1,37	325	269	37,61
8 (8 годин до закінчення експерименту)	8,95	8,9	1,29	336	290	38,44
8 (закінчення експерименту)	8,95	8,8	1,38	334	272	37,61

Після математичної обробки результатів, отримали коефіцієнти рівняння регресії та відповідний коефіцієнт детермінації R², див. табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Коефіцієнти до рівнянь регресії для прогнозування витрат електроенергії

Y	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	R ²
Y ₁	35,23	2,84	-1,13	5,55	-0,098	0,042	0,7686

При попередньому аналізі даних на виявлення кореляції між факторами та оцінці значущості отриманих коефіцієнтів регресії, виявлено складний характер взаємного зв'язку ряду факторів із великим внеском в результуючу величину Y₁. Для регресійної моделі було запропоновано вилучити фактори, які враховувались в попередніх розрахунках, а саме: «витрати бентоніту», «витрати обпаленого повернення», «вміст Fe», «міцність на роздавлення» «міцність на скидання», «частка 10-14», як визначено як незначущі. Це дозволило отримати адекватну модель Y₁ з наявністю тільки значущих коефіцієнтів з рівнем значущості $\alpha=0,05$ як залежна від X₁, X₂, X₃, X₄ та X₅ з коефіцієнтом детермінації R²=0,77 (що є незначною мірою менше за R²=0,82 для попередньої моделі із наявністю комплексного впливу більшої кількості врахованих факторів). Це вказує на те, що фактори «витрати бентоніту», «витрати обпаленого повернення», «вміст Fe», «частка 10-14» та «міцність на скидання» не зробили суттєвого внеску в пояснення варіацій у споживанні енергоносіїв у досліджуваних умовах. Ймовірно, у межах експерименту ці параметри залишалися відносно стабільними або їхній вплив був слабшим порівняно з основними факторами — витратами вапняку, вологістю, міцністю та тиском у вакуумній камері. Нульовий коефіцієнт не означає відсутності фізичного впливу, а лише відображає домінування сильніших факторів у цьому плані експерименту. Це типовий результат багатфакторного аналізу, коли взаємозв'язки між змінними маскують вплив менш значущих параметрів.

Дискусія. У ході промислових випробувань було встановлено, що концентрат Підприємства «Б» характеризується вищим вмістом дрібнодисперсної фракції ($-0,056$ мм) порівняно з базовим концентратом Підприємства «А». Така зміна гранулометричного складу призвела до зниження

природної огрудкованості шихти, ускладнивши формування стабільних сирих окатишів. З метою компенсації гірших грануляційних властивостей було застосовано поверхнево-активні речовини (ПАР) у поєднанні з цілеспрямованим додатковим зволоженням концентрату. При цьому, зростання витрат вапняку (з 5,3 до 8,97 кг/т) було зумовлене необхідністю посилити зв'язувальні властивості шихти через нижчу природну огрудкованість концентрату Підприємства «Б», викликану його вищою дисперсністю та гіршою агрегацією частинок. У результаті таких заходів середній вміст вологи в сирих окатишах збільшилося — з 8,3 % до 9,6 %. Це свідчить як про підвищену гідрофільність обробленого концентрату, так і про технологічну необхідність забезпечення стабільного процесу огрудкування шляхом зволоження. Водночас підвищення вологовмісту суттєво ускладнило подальшу стадію обпалювання.

Після переходу на концентрат Підприємства «Б» було зафіксовано зростання використання електроенергії від 31,8 до 37,15 кВт·год/т (середнє 34,4 кВт·год/т, зростання на 5,25 кВт·год/т або 16,28%). Найвищий показник споживання електроенергії припав на 5 добу експерименту припав на п'яту добу експерименту (40,03 кВт·год/т, середнє 35,9 кВт·год/т, зростання на 8,23 кВт·год/т або 25,88 %). Саме на цей період прийшовся так званий пік «шоку», коли здійснювалися компенсаційні дії. Надалі витрати стабілізувалися, однак залишалися вищими за базові. Крім того, зміна реологічних властивостей суміші та зниження початкової механічної міцності окатишів вимагали застосування більш обережних температурних режимів із подовженими циклами нагріву. Дисперсні властивості концентрату Підприємства «Б», що відрізняються від базового матеріалу, зумовили необхідність його модифікації з використанням ПАР. Узагальнені причинно-наслідкові зв'язки впливу такого втручання на процес огрудкування та енерговитрати наведено на схемі рис. 1.2 («Проблема — Дії — Результат»).

Результати проведеного аналізу узагальнені у табл. 1.5.

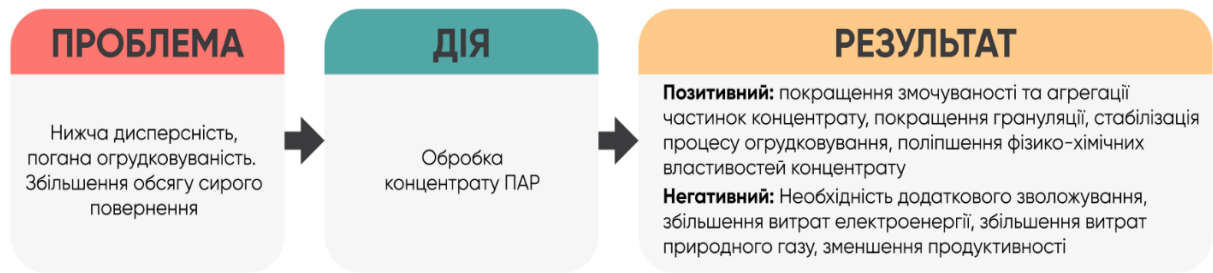


Рисунок 1.2 – Схема “Проблема – Дія – Результат”

Таблиця 1.5 – Аналіз результатів промислового експерименту з отримання залізородних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Параметр	Базовий концентрат (Виробник «А»)	Концентрат + ПАР (Виробник «Б»)	Δ (абс.)	Δ (%)
Споживання вапняку, кг/т	5,3	8,96	↑ 3,66	↑ 69,06
Вологість сирого окатишу, %	8,375	8,875	↑ 0,5	↑ 5,97
Міцність на стиск, кг/окатиш	1,46	1,32	↓ -0,14	↓ -10,1
Висота шару, мм	357	333	↓ 24	↓ 6,72
Тиск, дПа	477,81	281,77	↓ 196,04	↓ 41,03
Питоме споживання електроенергії, кВт/г	31,8	40,03	↑ 8,23	↑ 25,88

Додатковим чинником зростання енерговитрат могла стати тимчасова нестабільність теплових режимів. У цей час оператори могли застосовувати знижені температури чи швидкість подачі газу для запобігання руйнуванню окатишів, що, у поєднанні зі зниженням продуктивності, призвело до зростання питомих витрат енергії через сталі фонові теплові втрати агрегату.

Таким чином, застосування ПАР у складі технології обробки концентрату Підприємства «Б» сприяло покращенню змочуваності та агрегації частинок, однак водночас зумовило підвищення вологості суміші, погіршення умов сушіння та зростання витрат енергоносіїв у перехідному періоді.

У межах проведених випробувань виокремити вклад ПАР у зміну технологічних показників складно, оскільки перехід на новий концентрат супроводжувався одночасною зміною фізико-хімічних і технологічних параметрів. Додатковим обмеженням є відсутність лабораторних даних щодо гідрофільності концентратів, що ускладнює кількісну інтерпретацію ефекту змочування. Перспективним напрямом подальших досліджень є проведення спеціалізованих тестів із контрольованим дозуванням ПАР, а також випробувань концентратів із варіативною вологістю для точнішого визначення ролі зволоження у формуванні енерговитрат.

Висновки. Проведено промислові випробування на Підприємства «А» із переходом від власного концентрату до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР. Експерименти включали два етапи: дні 1–2 — базовий концентрат Підприємства А, дні 3–8 — концентрат Підприємства Б з ПАР. Порівняно з базовим періодом, нова сировина викликала зміну фізико-хімічних властивостей шихти, що вплинуло на стабільність формування та сушіння окатишів. Отримані результати відображають загальний вплив модифікації концентрату на тепловий режим і енергоспоживання повного циклу роботи випалювального агрегату, включаючи сушіння, випал, рекуперацію та охолодження.

Отримано узагальнені залежності між характеристиками сировини та технологічними показниками. Для їх кількісного опису застосовано регресійний аналіз. Побудовані моделі дозволили прогнозувати питомі витрати енергоносіїв і продуктивність випалювальної машини. Водночас з'ясовано, що такі фактори, як вологість окатишів, витрата вапняку, міцність сирих окатишів, висота шару та тиск газу, мають вплив на питоме споживання електроенергії.

Встановлено, що використання концентрату Підприємства «Б» з ПАР вимагало збільшення використання в процесі обпалу вапняку (з 5,3 кг/т до 8,96 кг/т, тобто на +69,06%), що було зумовлено необхідністю компенсувати підвищену вологість концентрату, модифікованого ПАР (з підвищеною гідрофільністю). Це призвело до зростання питомої витрати електроенергії з 31,8

до 40,03 кВт·год/т (на 8,23/+25,88 %). Також було виявлено підвищення вологості сирих окатишів з 8,375 до 8,875 (на +5,97%), а також зменшення міцності на стиск з 1,46 до 1,32 кг/ок (на – 10,1 %). Отримані результати свідчать про зростання енерговитрат та зниження ефективності процесу при використанні концентрату Підприємства «Б», що пояснюється його підвищеною дисперсністю та необхідністю зволоження, що призводить до ускладнення процесів сушіння й обпалу та впливає на стабільність теплового режиму.

Загалом результати дослідження вказують на необхідність індивідуального налаштування режимів сушіння при переході на нові типи концентратів. У подальших дослідженнях доцільно проводити лабораторні випробування із варіюванням вмісту ПАР та вологості для точнішої оцінки їхнього впливу на енерговитрати та якість продукції. Окрему увагу слід приділити стабілізації теплових режимів у перехідні періоди, що може суттєво покращити енергоефективність виробництва.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ШТАБ НА ЛИВАРНО-ПРОКАТНИХ КОМПЛЕКСАХ

Вступ. Технології виробництва штаби на ливарно-прокатних модулях (ЛПМ) [25–33] набувають дедалі більшої популярності. Ці комплекси мають певні переваги порівняно з класичними широкоштабовими станами гарячої прокатки (ШСГП) [34–38], хоча й характеризуються низкою технологічних обмежень. Технологія ЛПМ вважається прогресивнішою, оскільки поєднує в одному комплексі машину безперервного лиття (МБЛЗ) та штабовий прокатний стан, що забезпечує вищу енерго- та металоєфективність. Як і ШСГП, ливарно-прокатні комплекси мають свої етапи розвитку. Останні покоління ЛПМ, розроблені різними виробниками [31–33], мають подібну принципову конструкцію, оскільки орієнтовані на виготовлення схожого сортаменту продукції. Водночас кожен виробник застосовує унікальні технічні рішення, які відображаються в параметрах устаткування. Попри переваги, комплекси ЛПМ мають і певні конструктивно-технологічні обмеження, що ускладнює їхнє використання для виробництва прокату зі спеціальними властивостями [26, 27].

Так, в роботі [26] досліджено вплив щільності дислокацій на механічні властивості при виробництві низьковуглецевої сталі на ЛПМ, однак механізм технологічного керування цим процесом не розкрито. В роботі [27] досліджено питання отримання прокату з високою міцністю при виробництві на ливарно-прокатних комплексах. Розглянуто та підкреслено особливості механізму формування структури та механічних властивостей на установках смугового лиття порівняно з класичними процесами виробництва смуг, які треба враховувати. В роботі [28] авторами запропоновано рішення щодо оптимізації графіку прокатки основаного на енергоспоживанні, якості продукції, навантаженнях на устаткування. Аналогічні дослідження були проведені авторами роботи [30]. Слід зазначити, що моделі [28, 30] не враховували вплив термомеханічних режимів для забезпечення необхідного рівня мікроструктури та

комплексу механічних властивостей, які можуть бути важливі для деякого сортаменту у тому числі, що виробляється за технологією ТМСР. Цей сортамент може потребувати більших витрат енергоресурсів. Таким чином, механізми формування мікроструктури і відповідно комплексу механічних властивостей при виробництві штаб на ЛПМ та ШСГП мають відмінності, які повинні бути враховані при розробці технології виробництва.

Метою дослідження є визначення особливостей технології виробництва штаб на ливарно-прокатних комплексах та широкоштабових станах гарячої прокатки та розробка технологічних рекомендацій для ЛПМ, що забезпечать отримання необхідного комплексу механічних властивостей.

Методи та методики дослідження. У роботі застосовано комплекс методів, що поєднують аналітичний, порівняльний та математичний підходи. Базою для дослідження є технічні характеристики устаткування та режими прокатки на ливарно-прокатних комплексах та широкоштабових станах гарячої прокатки. Окремим напрямком дослідження є визначення впливу швидкості деформації на формування розміру зерна аустеніту. Для цього було використано аналітичний підхід, який базувався на експериментальних даних та методі Холла-Петча. Таким чином, застосування комплексного підходу при проведенні дослідження дозволило отримати уявлення про динаміку формування розміру зерна аустеніту в залежності від швидкості деформації та запропонувати рішення щодо вдосконалення технології виробництва штаб на деяких типах ливарно-прокатних комплексів.

Результати та дискусії.

1. Порівняння сучасних комплексів ЛПМ та ШСГП. Сучасні лінії подовжньо-поперечного різання (ЛПМ) здатні випускати широкий сортамент продукції — від м'яких наднизьковуглецевих сталей (ULC) до покращених високоміцних сталей (AHSS). Товщина штаб варіюється від 0,8 до 25,4 (до 32,0) мм, ширина — від 900 до 2600 мм [31–33]. Широкий діапазон розмірів продукції, що може виготовлятися на ЛПМ, частково перекриває номенклатуру

холоднокатаного та гарячекатаного листа, що робить ЛПМ універсальним інструментом для виробництва плоского прокату.

На рисунках 2.1 і 2.2 подано типові схеми ЛПМ та ШСГП, які характеризують референтні конструкції існуючих комплексів, що виготовляються провідними машинобудівними компаніями [31–33].

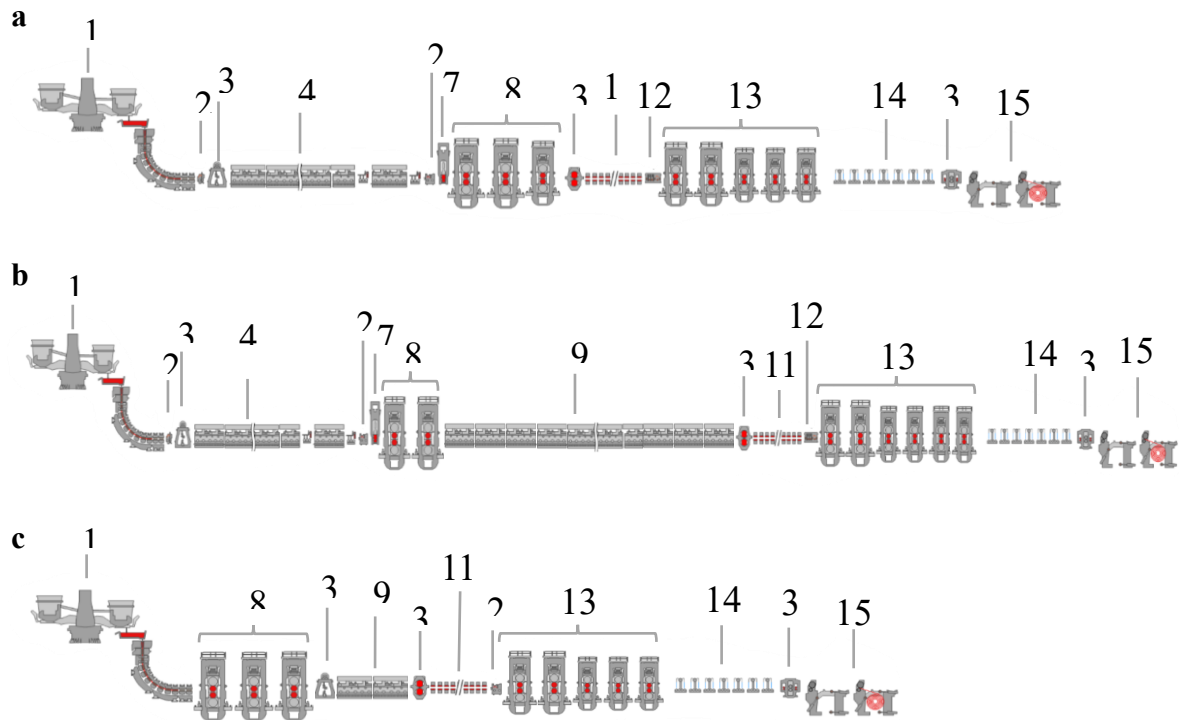


Рисунок 2.1 – Референтні типи (а, b, c) ЛПМ комплексів

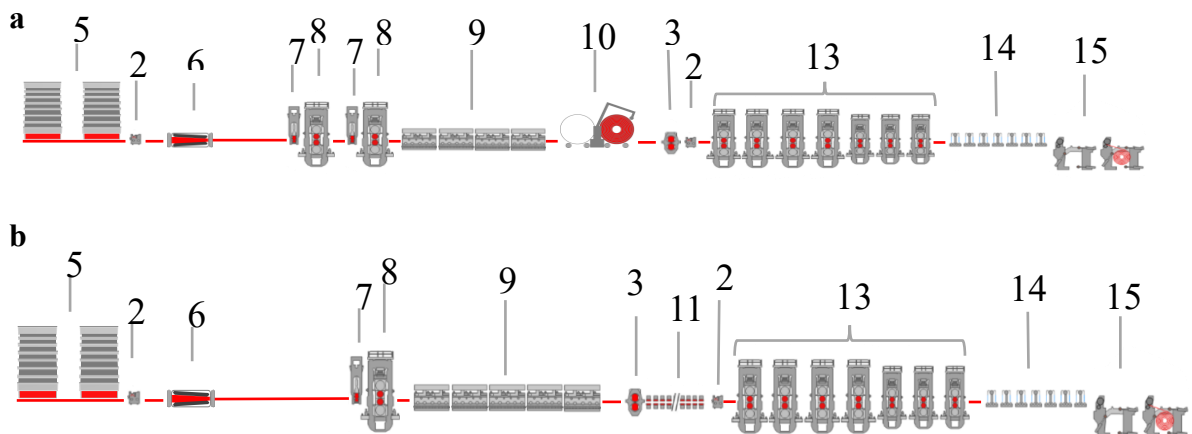


Рисунок 2.2 – Референтні типи (а, b) ШСГП комплексів

На рис. 2.1, 2.2: 1 – машина безперервного лиття; 2 – гідрозбив; 3 – ножиці; 4 – тунельна піч; 5 – нагрівальна піч; 6 – прес для зменшення ширини; 7 – еджер; 8 – чорновий стан; 9 – тепло-зберігаючі панелі; 10 – CoilBox; 11 – індукційні нагрівачі; 12 – проміжне охолодження підкату та гідрозбив; 13 – чистовий стан; 14 – установка прискореного охолодження; 15 – моталки.

У таблиці 2.1 наведено порівняльні параметри ливарно-прокатних модулів (ЛПМ) і широкоштабових станів гарячої прокатки (ШСГП).

Таблиця 2.1 – Порівняння параметрів ЛПМ та ШСГП

№	Параметри	ЛПМ	ШСГП
1	Сортамент продукції		
1.1	Розміри		
1.1.1	Товщина, мм	0,8–25,4 (32,0) ¹	1.2-25.4
1.1.2	Ширина, мм	800-2134 (2600) ¹	900-2350
1.1.3	Вага рулонів, т	Макс: 32 (45.7)	Макс: 32 (45)
1.2	Марки сталі ²	ULC, LC, PER, MC, HC, LC MA, PER MA, MC MA, WR, API ³ , TRIP/DP, AS	ULC, LC, PER, MC, HC, LC MA, PER MA, MC MA, WR, API, TRIP/DP, AS
1.3	Товщина слябів, мм	До 140 (160) ¹	До 250 (300)
2	Витрати металу, кг/т ⁴	1018	1040 ⁵
3	Споживання електричної енергії, кВт·год/т	~ 90,0	~ 91,0 ⁵
4	Витрати природного газу, м³/т	0/11 ⁶	32.8
5	Гнучкість в організації виробництва	Менша гнучкість	Більше гнучкості

¹ SMS Проєкт на стадії будівництва; ² Тип сталей: ULC – наднизьковуглецеві; LC – низьковуглецеві; PER – перитектичні; MC – середньовуглецеві; HC – високовуглецеві; LC MA – низьковуглецеві мікролеговані; PER MA – перитектичні мікролеговані; MC MA – середньовуглецеві мікролеговані; WR – стійкі до погодних умов; TRIP – пластичність, викликана перетворенням; DP – двофазні; AS – леговані сталі; ³ обмеження товщини; ⁴ кращі практики; ⁵ HSM + CCM; ⁶ для різних ЛПМ комплексів (нульове споживання для комплексу без тунельної печі)

Розміри сортаменту продукції для обох типів комплексів залежать від технічного завдання, що ставиться перед виробниками устаткування. Ширина та маса штаби можуть бути реалізовані на будь-якому з наведених типів обладнання, якщо це передбачено проектом. Товщину смуги менше ніж 1,2 мм можна отримати на ЛПМ у режимі безперервної прокатки. Втрати металу на ЛПМ, як правило, менші, ніж на ШСГП. Це зумовлено зменшеними відходами та безперервністю процесу лиття і прокатки, що знижує втрати на обрізи та технологічний простій.

Середнє електроспоживання в обох типах комплексів приблизно однакове. Для ЛПМ воно дещо зростає через виробництво прокату малої товщини та інтенсивне використання індукційних нагрівачів для підтримання температури. У ШСГП підвищене споживання пов'язане з прокаткою слябів більшої товщини. Витрати газу також залежать від початкової температури слябів і їхньої товщини. У ЛПМ сляби додатково нагріваються в тунельній печі з температури близько 1000–1050 °С. Натомість у ШСГП сляби можуть надходити в нагрівальну піч холодними або з температурою навколишнього середовища. Кінцева температура перед прокаткою для обох комплексів становить 1150–1200 °С.

Гнучкість виробництва у ШСГП є вищою, ніж у ЛПМ. Це зумовлено тим, що ШСГП не прив'язані безпосередньо до машини безперервного лиття й процесу виплавки сталі. Зупинка прокатного стану не тягне за собою зупинку всього виробництва. Партії прокатки можуть бути сформовані незалежно від графіка розливки на МБЛЗ, а самі стани можуть працювати автономно від виробництва слябів. Ці висновки наведені для загальної характеристики комплексів. Співвідношення витрат між ЛПМ та ШСГП може змінюватися в залежності від виробництва конкретного сортаменту продукції.

Усі наведені марки сталі можуть бути вироблені як на ЛПМ, так і на ШСГП. Однак, товщинний діапазон у межах кожної групи сталей може відрізнятися залежно від типу комплексу. Найбільш суттєві відмінності стосуються груп сталей зі специфічними вимогами до механічних властивостей, зокрема таких, що підлягають випробуванням на ударну в'язкість за методикою DWTT (Drop

Weight Tear Test) та випробуванням за методом Шарпі з V-надрізом (Charpy V-notch, CVN) при низьких температурах. Ці види випробувань особливо чутливі до структури металу та розміру зерна, що формується під час термомеханічної обробки, а також до особливостей прокатки, властивих кожному типу комплексу.

2. Розрахунок та порівняння режимів прокатки. Для порівняння двох технологій були розраховані режими прокатки для референтних комплексів ЛПМ (рис. 1а) та ШСПП (рис. 2b), див. табл. 2.2 і 2.3. Розрахунки виконано із застосуванням власної математичної моделі, з урахуванням технічних параметрів устаткування, наведених у джерелах [31–33]. При моделюванні технологічного процесу для обох комплексів використовувався однаковий сортамент продукції — сталь марки X70 згідно зі стандартом API 5L, виготовлена за технологією термомеханічної обробки (ТМСР). Параметри штаби: товщина 12 мм, ширина 2074 мм, маса рулону 31,6 т. Ці характеристики відповідають вимогам до заготовок для поздовжньозварених труб діаметром 660 мм.

Таблиця 2.2 – Режим прокатки штаби з розмірами 12×2074 мм з марки сталі X70 на ЛПМ

Кліть №*	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, с ⁻¹	Швидкість прокатки, м/с	Вхідна температура, °С	Сила прокатки, кН
	141					
R1	100	29,1	0,42	0,21	1097	27961
R2	64	36,0	0,86	0,33	1072	33062
R3	40	37,5	1,96	0,52	1049	28777
ACC F1	29	27,5	3,18	0,78	910	32669
F2	22	24,1	4,53	1,01	893	28631
F3	17	22,7	7,43	1,31	873	24211
F4	14	17,6	8,97	1,57	853	20031
F5	12	14,3	10,22	1,81	843	16713

* R1-3 - номери клітей чорнової групи; ACC - прискорене охолодження; F1-5 – номери клітей чистової групи

Таблиця 2.3 – Режим прокатки штаби з розмірами 12х2074 мм з марки сталі X70 на ШСГП

Кліть №*	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, с ⁻¹	Швидкість прокатки, м/с	Вхідна температура, °С	Сила прокатки, кН
	222					
R1-1	177	20,3	2,33	1,93	1150	27646
R1-2	135	23,7	3,53	2,41	1143	29643
R1-3	99	26,7	5,35	3,01	1134	30532
R1-4	70	29,3	7,96	3,66	1123	30634
R1-5	50	28,6	11,59	4,54	1106	28515
ACC F1	39	22,0	1,80	0,55	960	23417
F2	29	25,6	2,72	0,68	937	26875
F3	22,5	22,4	3,60	0,83	924	23127
F4	18,4	18,2	4,42	1,00	897	20337
F5	15,2	17,4	5,97	1,16	882	18355
F6	13,2	13,2	6,53	1,33	851	15964
F7	12	9,1	6,51	1,49	836	12270

* R1-1 – R1-5 – номери проходів в чорновій кліті; ACC – прискорене охолодження; F1-7 – номери клітей чистової групи

Запропонований хімічний склад сталі X70 наведено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад дослідної сталі марки X70

Марка	Хімічний склад, %													
сталі	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N
X70	0,06	1,55	0,35	0,005	0,011	0,026	0,034	0,026	0,21	0,05	0,05	0,01	0,025	0,0050

З технічної точки зору, обидва типи комплексів здатні виробляти штаби зі сталі марки X70 з наведеними геометричними параметрами. Як відомо, для мікролегованих низьковуглецевих сталей цього типу критично важливим є дотримання певних технологічних умов, що забезпечують формування

необхідного комплексу механічних властивостей кінцевого продукту [39]. До таких умов належать: температура аустенізації; ступінь деформації; температура гальмування рекристалізації аустеніту в зоні чорнової прокатки; інші параметри термомеханічної обробки. Виконання цих умов забезпечує стабільне формування структури, що успадковується у готовому виробі, та досягнення заданого рівня механічних властивостей.

Керування температурою аустенізації дає змогу впливати на розмір зерна та ступінь розчинення мікролегуючих елементів у твердому розчині. Цей механізм добре реалізується на комплексах ШСГП. Натомість для ЛПМ це питання залишається відкритим, оскільки сляби в ЛПМ не проходять стадію охолодження до феритного стану з подальшим повторним нагрівом, що обмежує один із шляхів керування структуроутворенням. Установлено, що зерно в повторно нагрітих слябах є дрібнішим, ніж у тих, що не зазнавали охолодження.

Обтиснення є ефективним інструментом регулювання розміру зерна аустеніту. За даними сучасних досліджень [40, 41], для мікролегованих низьковуглецевих сталей рекомендований ступінь деформації становить не менше 20% за один прохід. Така деформація сприяє формуванню дрібного зерна аустеніту, з якого згодом утворюється дрібнозернистий ферит. Ефективність цього механізму зберігається до температури гальмування рекристалізації аустеніту, яка для досліджуваної сталі X70 (за розрахунками за відомою формулою) становить 907 °C. На основі моделювання встановлено, що:

- на ЛПМ ця температура була досягнута на першому чистовому проході (F1);
- на ШСГП — на третьому проході (F3).

Таким чином, необхідна деформація ($\geq 20\%$) при температурі нижче 907 °C досягнута в обох випадках, що забезпечує отримання дрібного зерна. За розрахунками [41], середній розмір зерна аустеніту:

- для ЛПМ (середній ступінь деформації 34%) становив ~ 32 мкм;
- для ШСГП (ступінь деформації 25%) — ~ 36 мкм.

Це свідчить про порівнянну ефективність технологій чорнової прокатки обох типів комплексів у контексті контролю структури.

Крім того, слід відзначити ще один фактор, який раніше не враховувався при розрахунку розміру зерна аустеніту. Це — швидкість деформації, яка відрізняється між ЛПМ та ШСГП. Швидкість деформації впливає на опір металу до деформації, однак наразі не враховується у більшості відомих моделей розрахунку розміру зерна аустеніту.

3. Дослідження впливу швидкості деформації на розмір зерна аустеніту.

Для встановлення зв'язку між швидкістю деформації та розміром зерна аустеніту було використано результати, наведені в роботі [41], де розглядається залежність між опором деформації та розміром зерна на основі співвідношення Холла—Петча. Крім того, було залучено дані пластометричних досліджень сталі марки Х70 з джерела [42], що дало змогу експериментально підтвердити вплив технологічних параметрів на структуру аустеніту. На основі узагальнених результатів побудовано графічну залежність між опором деформації та розміром зерна аустеніту, що подано на рис. 2.3.

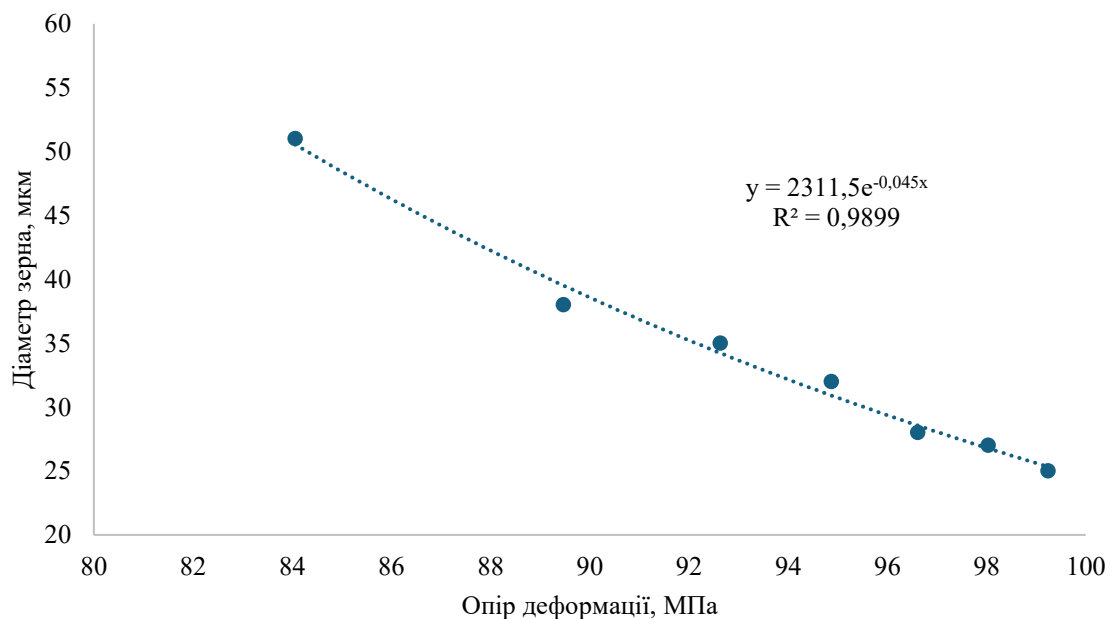


Рисунок 2.3 – Залежність між опором до деформації та розміром зерна для сталі марки Х70

Таким чином, для розрахунку залежності діаметра зерна аустеніту від опору деформації для сталі марки X70 по стандарту API-5L можна використовувати наступне співвідношення:

$$D = 2311.5e^{-0.045\sigma_t}, \quad (2.1)$$

де σ_t – опір деформації для сталі марки X70 або її аналога, МПа.

Опір деформації для сталі марки X70 було розраховано за співвідношенням, наведеним у роботі [42], із використанням таких вихідних даних: температура 1050 °С, ступінь деформації 20%, швидкість деформації від 0,1 до 15 с⁻¹, що відповідає умовам чорнової прокатки. Діаметр зерна аустеніту визначали за формулою (2.1) на основі отриманих значень опору деформації. На підставі цих результатів побудовано залежність між швидкістю деформації та діаметром зерна аустеніту (рис. 2.4).

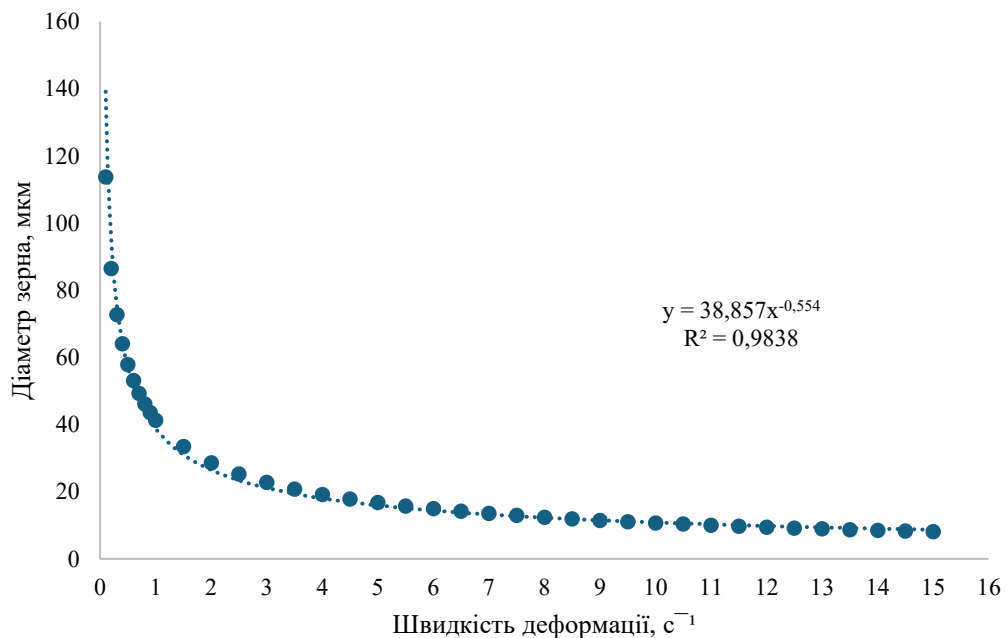


Рисунок 2.4 – Залежність між швидкістю деформації та діаметром зерна аустеніту для сталі марки X70

Отже, для розрахунку залежності діаметра зерна аустеніту від швидкості деформації для сталі марки X70 по API-5L можна використовувати наступне співвідношення:

$$D = 38.857 \times v^{-0.554}, \quad (2.2)$$

де v – швидкість деформації, с^{-1} .

Відповідно до рис. 2.4, швидкість деформації має великий вплив на діаметр зерна. Інтенсивність подрібнення зерна аустеніту показана на рис. 2.5.

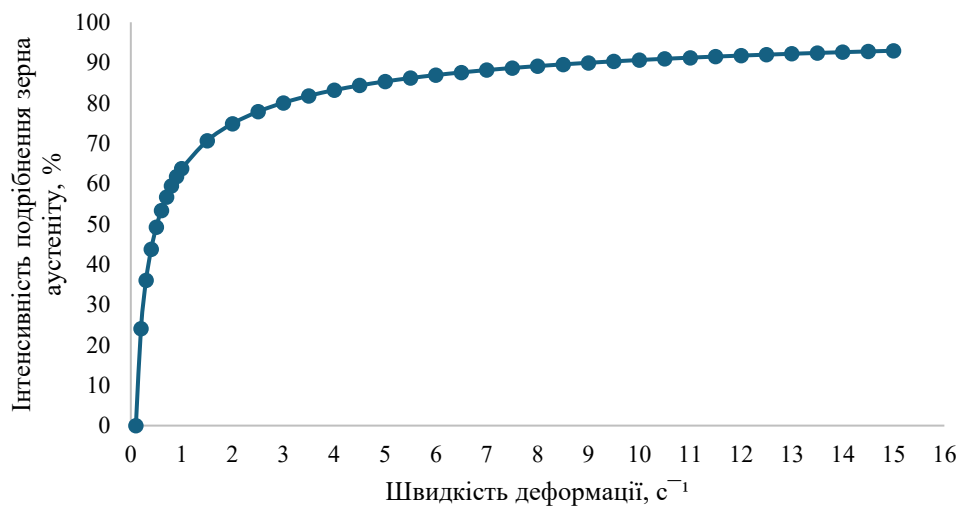


Рисунок 2.5 – Інтенсивність подрібнення зерна аустеніту
для сталі марки X70

Інтенсивне подрібнення зерна аустеніту спостерігається при швидкості деформації від $0,1 \text{ с}^{-1}$ до $1,0 \text{ с}^{-1}$, що становить 63,7%. При швидкості деформації від $1,0 \text{ с}^{-1}$ до $3,0 \text{ с}^{-1}$ інтенсивність подрібнення зерна аустеніту трохи знижується і становить від 63,7% до 80%. При швидкості деформації від $3,0 \text{ с}^{-1}$ та більше інтенсивність подрібнення зерна аустеніту має мінімальну інтенсивність. Тож, для отримання більш дрібного зерна аустеніту швидкість деформації за прохід повинна становити $1,0 \text{ с}^{-1}$ і більше, при ступеню деформації 20% і більше.

Виходячи з цього, ступінь та швидкість деформації мають спільний значний вплив на розмір/діаметр зерна аустеніту. Високий рівень обтиснення при низькому рівні швидкості деформації не дає ефекту подрібнення зерна.

4. Оптимізація технології виробництва прокату на ЛПМ, аналіз результатів. Якщо порівнювати швидкість деформації на ЛПМ та ШСГП, таб. 2, 3, в зоні активної рекристалізації (температура від початку прокатки до 907 °С), то на ЛПМ вона задовольняє вимогам ($1,0 \text{ с}^{-1}$ і більше) тільки в кліті R3, а на ШСГП у всіх проходах від R1-1 до F2. Таким чином, зерно аустеніту на ШСГП буде більш дрібним ніж на ЛПМ. Крім того, тест DWTT та CV матиме кращі результати після прокатки на ШСГП.

Щодо ступеня деформації з рівнем 20% і більше, яке здійснюється в зоні активної рекристалізації, то на ЛПМ воно відбувається в чорновій групі. Температура після чорнової групи ще досить висока, табл. 2. Для зниження температури розкату перед чистовою групою застосовується прискорене охолодження. Крім того, це допомагає контролювати діаметр зерна, охолоджуючи розкат до температури гальмування рекристалізації аустеніту.

На ШСГП обтиснення, яке супроводжується процесом рекристалізації, відбувається в чорновій кліті та частково в чистовій групі (кліті F1, F2). Температура, що близька до температури гальмування рекристалізації аустеніту досягається після кліті F2 без додаткового процесу прискореного охолодження.

Таким чином, керування діаметром зерна та структурою металу на обох комплексах має відмінності, починаючи з процесу аустенізації та враховуючи рекристалізаційні процеси які закінчуються на різних стадіях прокатки.

З метою отримання необхідного комплексу механічних властивостей при реалізації технології ТМСР на ЛПМ враховуючи виконання вищезазначених умов щодо якомога більшого подрібнення зерна аустеніту запропоновано оптимізований режим прокатки штаби зі сталі марки X70 (див. табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Оптимізований режим прокатки штаби з розмірами 12х2074 мм з марки сталі Х70 на ЛПМ

Кліть №*	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, с ⁻¹	Швидкість прокатки, м/с	Вхідна температура, °С	Сила прокатки, кН
	141					
R1	100	29,1	1,09	0,55	1097	29853
ACC R2	64	36,0	2,16	0,82	1074	34681
ACC R3	40	37,5	4,90	1,30	1053	30097
ACC F1	29	27,5	7,25	1,78	910	35194
ACC F2	22	24,1	10,32	2,30	884	32288
ACC F3	17	22,7	16,76	2,95	857	28278
F4	14	17,6	20,04	3,52	852	21929
F5	12	14,3	23,09	4,09	842	18374

* R1-3 - номери клітей чорнової групи; ACC - прискорене охолодження; F1-5 – номери клітей чистової групи

Оптимізований режим прокатки штаби розміром 12×2074 мм зі сталі марки Х70 на ЛПМ враховує ключові умови процесу ТМСП — температуру, ступінь та швидкість деформації. Для їх забезпечення застосовано додаткові інструменти контролю температури прокатки. Зокрема, було введено проміжне охолодження розкату після клітей R1, R2, F1 і F2. Таке обладнання є типовим для сучасних ливарно-прокатних комплексів. Крім того, швидкість прокатки була синхронізована та збільшена на всіх клітях, що зумовлено конструктивними особливостями ЛПМ: відносно невеликою відстанню між агрегатами, через що підкат одночасно перебуває в чорновій і чистовій групах клітей. Зміни параметрів прокатки на ЛПМ наведено на рис. 2.6.

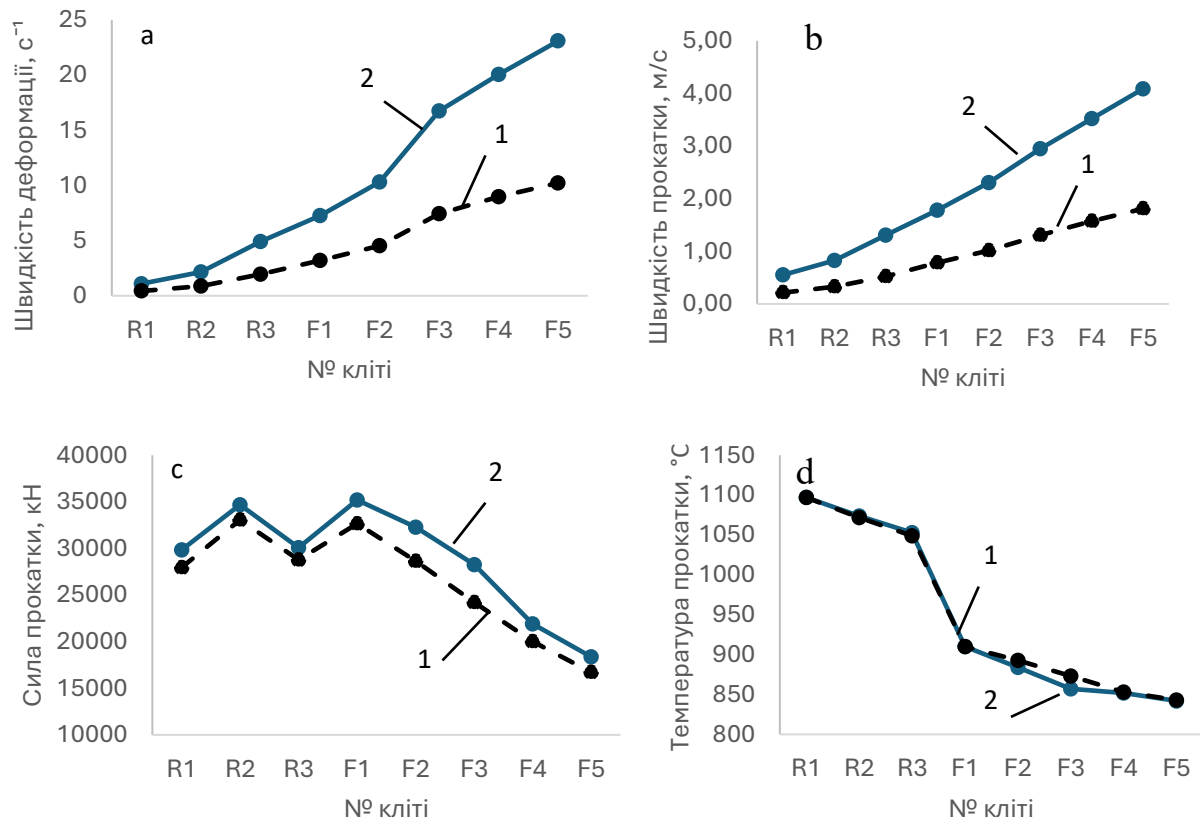


Рисунок 2.6 – Зміна параметрів прокатки ЛПМ (а – швидкість деформації; б – швидкість прокатки; с – сила прокатки; d – температура прокатки) для 1 – базового режиму прокатки, для 2 – оптимізованого режиму прокатки

Криві на рис. 6 демонструють, що підвищення швидкості прокатки та швидкості деформації призводить до збільшення сили прокатки. Водночас застосування обладнання для проміжного охолодження розкату дає змогу підтримувати температурну криву практично незмінною.

Оптимізований процес є більш енергоємним. Сумарні витрати електроенергії на прокатному обладнанні ЛПМ у базовому режимі (табл. 2.2) становлять 68,6 кВт·год/т, тоді як у оптимізованому режимі (табл. 2.5) — 94,5 кВт·год/т (+38%). Розрахунки виконані з використанням власної математичної моделі. Попри зростання енергоспоживання, застосування оптимізованих режимів розширює асортимент ЛПМ і підвищує якість готової продукції.

Оптимізований режим прокатки може бути реалізований на ЛПМ із компоновкою устаткування, поданою на рис. 2.1а та 2.1б. Для типу ЛПМ, зображеного на рис. 2.1с, його застосування є неможливим, оскільки в цьому випадку сляб одночасно перебуває у машині безперервного лиття та в чорновій групі клітей. Крім того, порізка слябів здійснюється лише після чорнової прокатки, що обмежує швидкість прокатки, а отже і швидкість деформації швидкістю розливки.

Висновки

1. Виконано порівняння сучасних проєктів комплексів ШСГП та ЛПМ. Визначено їхні основні відмінності: для ЛПМ — можливість виробляти штаби меншої товщини (до 0,8 мм), зниження витрат металу та палива на нагрів заготовки; для ШСГП — вища гнучкість виробництва та ширші можливості контролю розміру аустенітного зерна і, відповідно, комплексу механічних властивостей готової продукції.

2. Окреслено механізми керування розміром аустенітного зерна в процесі прокатки. Досліджено вплив швидкості деформації, підтверджено її суттєве значення поряд зі ступенем деформації. Побудовано залежність між швидкістю деформації та розміром зерна, а також визначено критичний рівень швидкості, необхідний для подрібнення зерна аустеніту.

3. Виконано критичний аналіз режимів деформації при виробництві штаби розміром 12×2074 мм зі сталі марки X70 на ШСГП та ЛПМ. Встановлено принципові відмінності, що охоплюють увесь процес — від аустенізації до рекристалізаційних перетворень, які завершуються на різних стадіях прокатки.

4. Запропоновано оптимізований режим деформації для ЛПМ, який забезпечує формування максимально дрібного зерна аустеніту та досягнення необхідного комплексу кінцевих механічних властивостей. Прикладом є виробництво рулонів зі сталі марки X70 згідно зі стандартом API 5L.

РОЗДІЛ 3

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОБТИСНЕНЬ В ЕДЖЕРНИХ ВАЛКАХ

Еджерні валки є невід'ємною частиною сучасних листопрокатних клітей. Обтиснення по бічних кромках дозволяє покращити геометрію поперечного перерізу прокату і знизити бічну обрізь. Формоутворення при вертикальній прокатці достатньо повно вивчено [43, 44] і дозволяє визначити розміри стовщення прокату в зоні деформації. Також Потапкіним В.Ф. та Бобухом І.О. розроблені математичні моделі для визначення енергосилових параметрів процесу. Але всі відомі роботи основані на використанні графаналітичних методів і мають точність, що не задовольняє сучасним вимогам з технології. Також в роботах не враховується деформація металу, а точніше форма прокату після прокатки в горизонтальних валках, що також вносить неточності в розрахунок. Недостатня точність розрахунку і неможливість врахування попередньої деформації робить актуальним подальше дослідження прокатки в еджерних валках, зокрема на основі скінченно-елементних моделей [45–47].

Метою даної роботи є визначення впливу величини обтиснення на енергосилові параметри процесу прокатки листового металопрокату на основі регресійних моделей, отриманих на результатах скінченно-елементного моделювання.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені наступні завдання: створення двовимірної моделі процесу прокатки листового прокату на основі використання методу скінченних елементів; на основі реалізації розробленої скінченно-елементної моделі встановити вплив обтиснення на енергосилові параметри процесу прокатки; на основі отриманих результатів скінченно-елементної моделі розробити регресійну модель.

В якості прикладу реалізації розробленої математичної моделі було розглянуто прокатку в еджерних (вертикальних) валках діаметром 800 мм листів шириною 1550 мм та товщиною 100 мм. Обтиснення варіювали від 4 мм до

12 мм. Отримані поля розподілів еквівалентних напружень представлені на рис. 3.1.

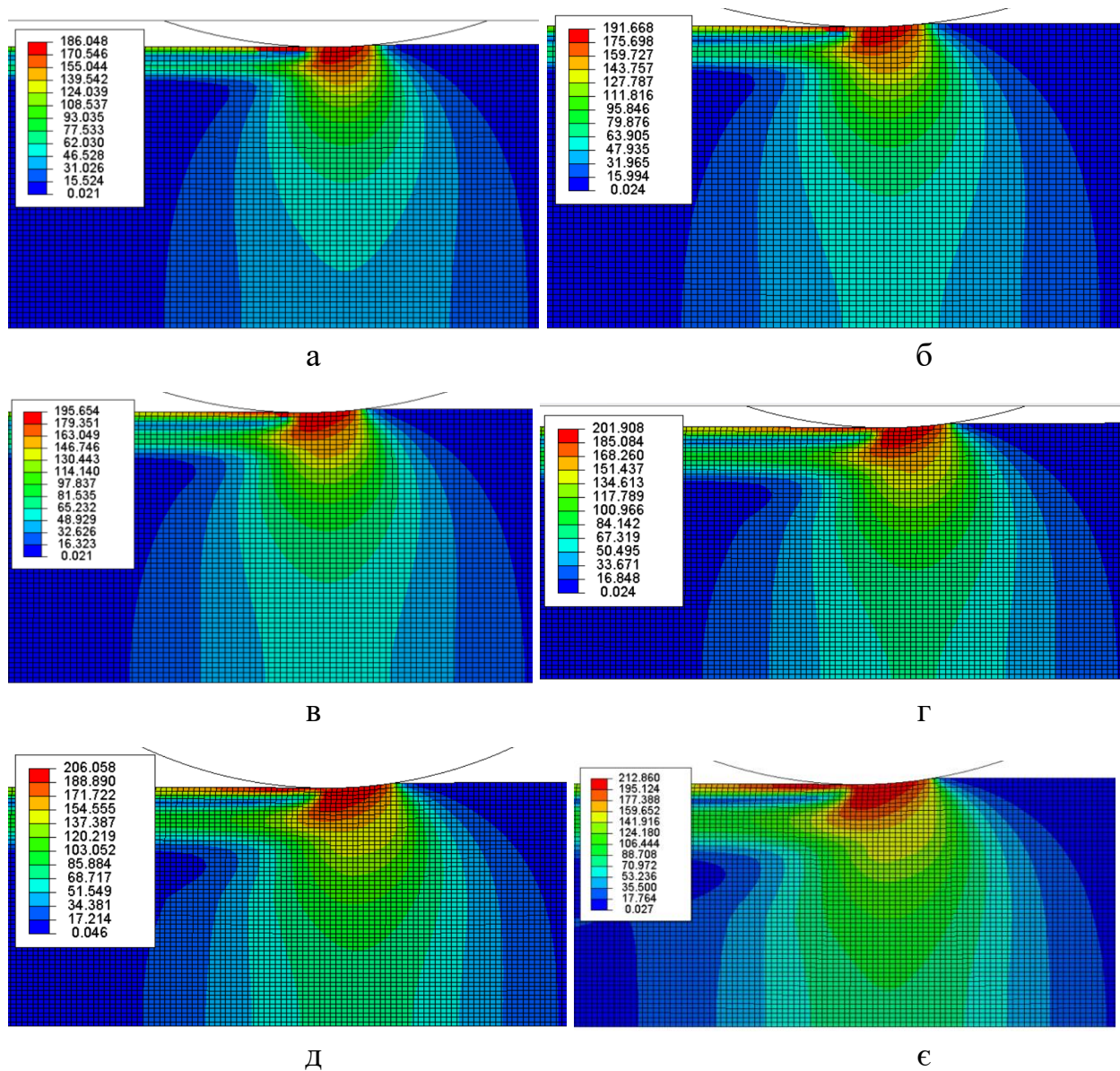


Рисунок 3.1. Поля розподілів еквівалентних напружень при різних обтисненнях:

а – 4 мм; б – 5 мм; в – 6 мм; г – 8 мм; д – 10 мм; е – 12 мм

З отриманих полів було обрано значення нормальних контактних, нормальних та нормальних дотичних напружень. Нормальні контактні та нормальні напруження потрібні були для визначення механічних властивостей матеріалу під час прокатки. Розподіл дотичних контактних напружень потрібен для визначення за зміною їх знаку координати нейтрального перерізу для

отримання величини моменту прокатки. Силу та момент прокатки визначали за середнім значенням по часу реакції довідкової точки (центр обертання) валка.

Отримані результати залежності коефіцієнта напруженого стану та коефіцієнту плеча в залежності від питомого показника з відношення довжини осередку деформації до середньої товщини прокату (L/h_{cp}) представлені на рис. 3.2. Там же наведені отримані поліноміальні описи даних залежностей, які можна використовувати при моделюванні процесів прокатки в еджерних валках.

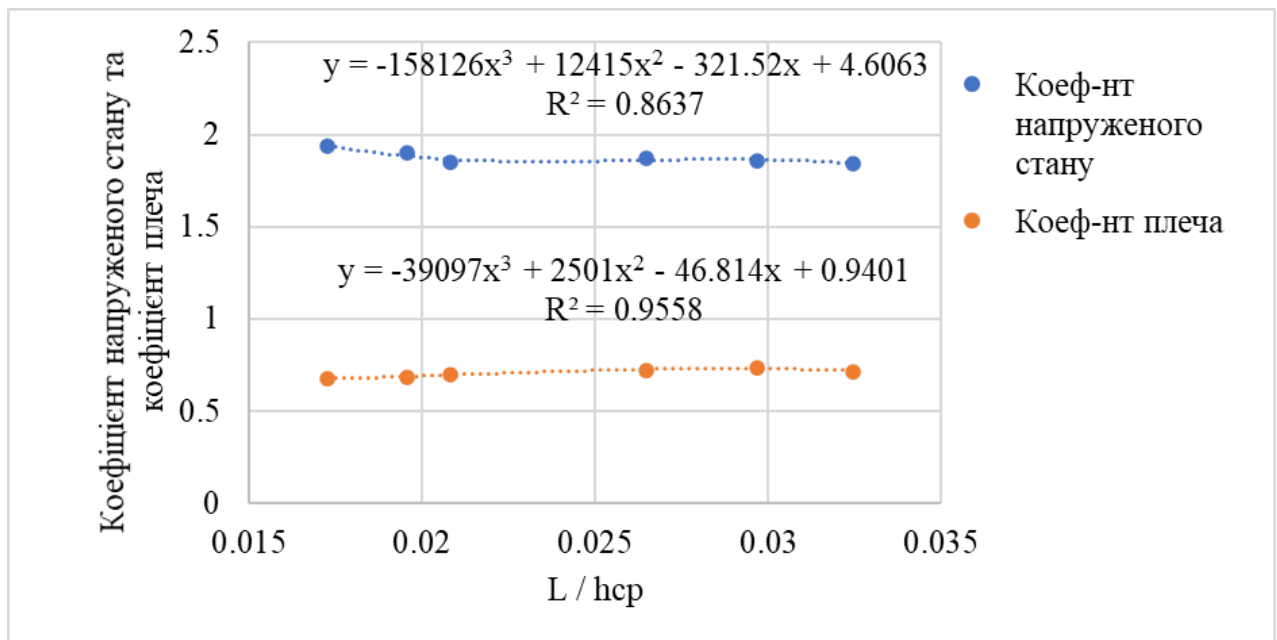


Рисунок 3.2. Залежності коефіцієнта напруженого стану та коефіцієнту плеча в залежності від питомого показника з відношення довжини осередку деформації до середньої товщини прокату (L/h_{cp})

Отримані результати підтверджують достатню достовірність отриманих регресійних залежностей і її можливість використання при розробці інженерних моделей процесів прокатки в еджерних валках, що дозволить реалізацію автоматизованого проєктування режимів прокатки в режимі «реального часу» як на діючому обладнанні, так й при проєктуванні нового.

У зв'язку з прийнятими припущеннями ця модель має недоліки при використанні валків з конічною бочкою, так як деформація в цьому випадку буде

нерівномірною по товщині прокату. В цьому випадку доцільно використовувати тривимірну модель, схема якої представлена на рис. 3.3.

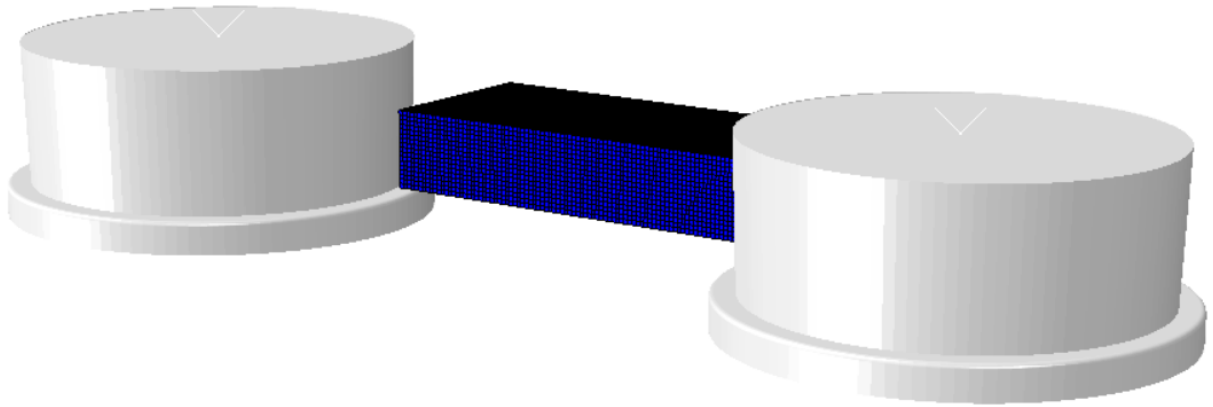


Рисунок 3.3 – Розрахункова схема 3D-моделі прокатки в еджерних валках

Аналіз результатів розрахунку показує нерівномірність деформації (рис. 3.4) по товщині прокату, а також наявність дефекту «собача кістка» [43], що потрібно враховувати при визначенні енергосилових параметрів процесу.

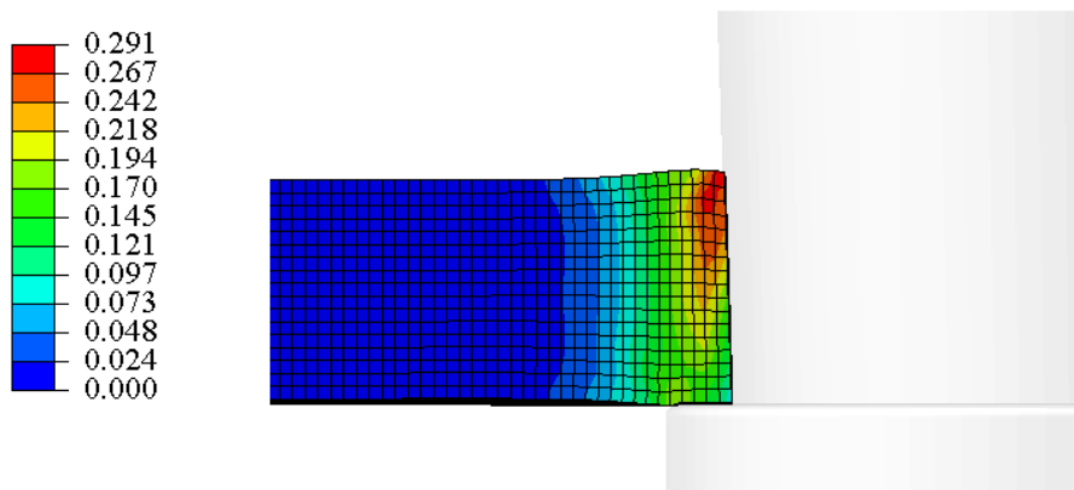


Рисунок 3.4 – Результати розрахунку на основі 3D-моделі прокатки в еджерних валках (поле еквівалентної пластичної деформації)

Однак і ця модель має недолік, який пов'язаний з припущенням про прямокутну форму заготовку, що не відповідає дійсності при багатопрохідній схемі. Для цього потрібно враховувати прокатку в горизонтальних валках.

На рис. 3.5 представлена розрахункова схема 3D-моделі прокатки на стані з еджерними валками.

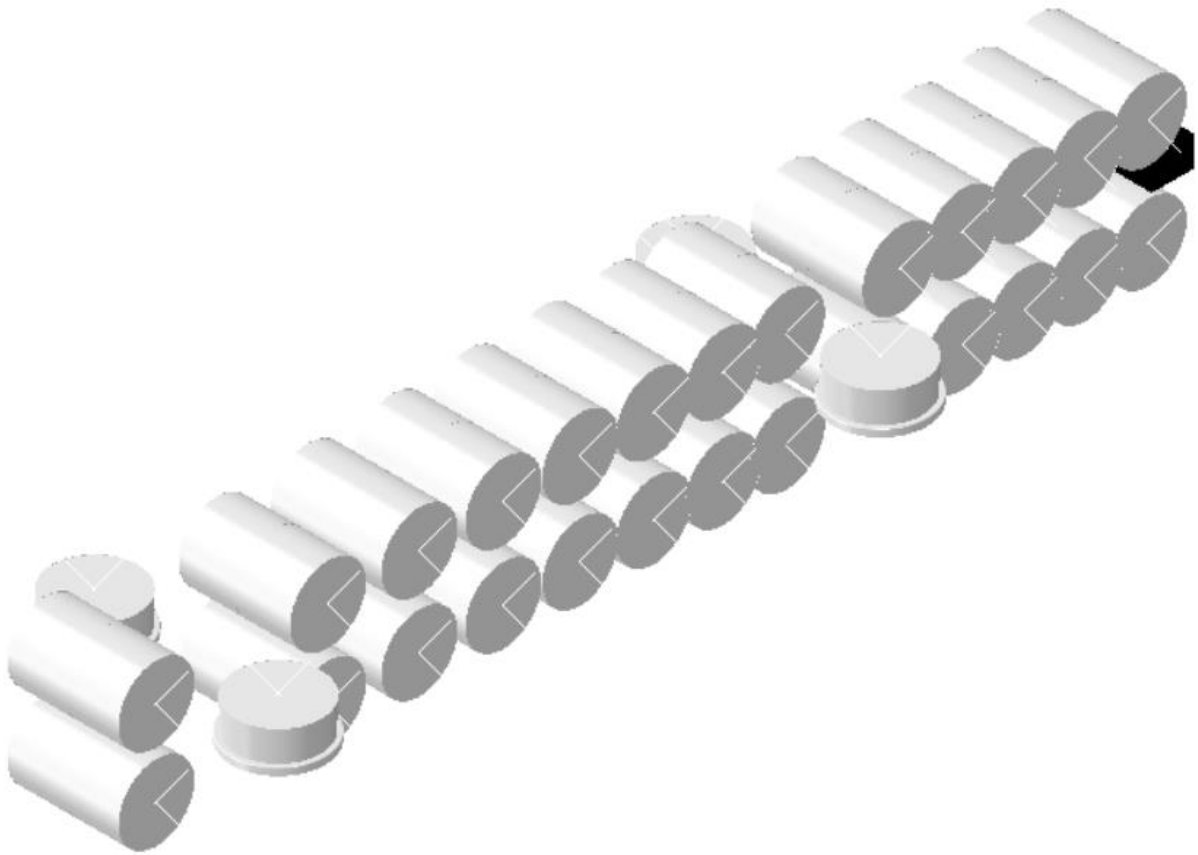
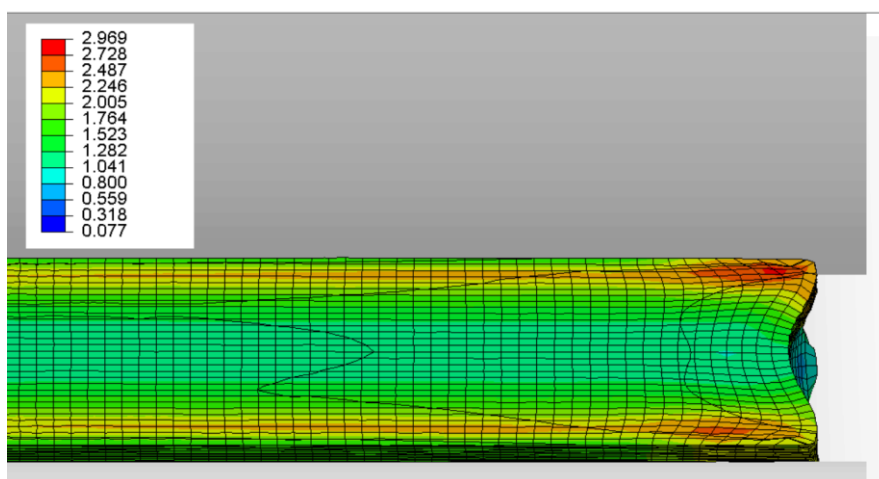


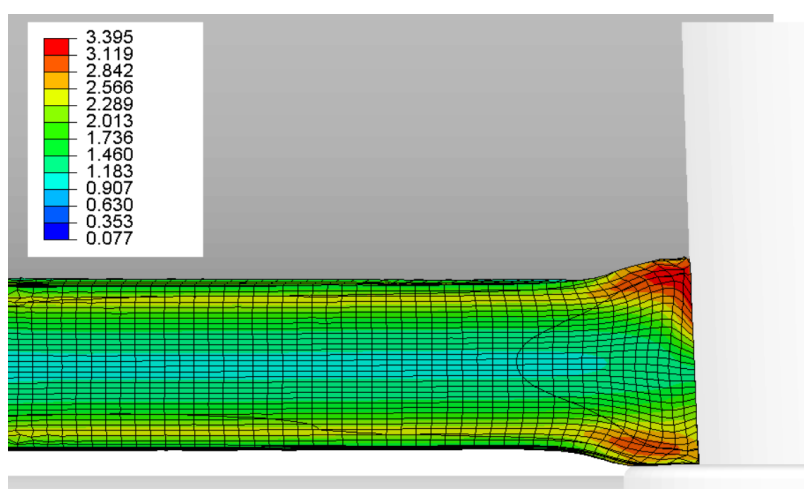
Рисунок 3.5 – Розрахункова схема 3D-моделі прокатки на стані з еджерними валками

Форма поперечного перерізу після прокатки має С-подібну форму по бічних крайках (рис. 3.6), що дуже сильно впливає на напружено-деформований стан при прокатці в вертикальних валках, а дефект «собача кістка» впливає на розподіл деформацій при подальшій прокатці в горизонтальній кліті.

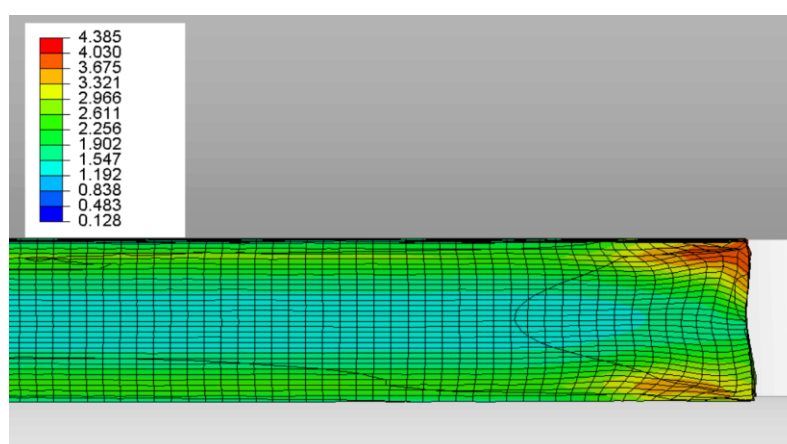
В якості прикладу було проаналізовано прокатку листа товщиною 300 мм до 95 мм, шириною 1000 мм. Увігнутість кромek після 5-го проходу склала 17 мм, висота собачої кістки після прокатки в вертикальній кліті 18,5 мм, увігнутість кромek після 13-го проходу – 0,73 мм.



а



б



в

Рисунок 3.6 – Форма перерізу заготовки та поля розподілу еквівалентних пластичних деформацій після прокатки в горизонтальних валках (а), після прокатки в вертикальних валках (б) та після калібруючої прокатки в горизонтальних валках (в)

Висновки

Розроблені скінченно-елементні моделі процесу прокатки в еджерних валках мають різну складність: двовимірна модель має невеликий час розрахунку і доцільна для використання при прокатці в валках з гладкою бочкою, тривимірна модель дає найбільш повну картину і потребує врахування форми поперечного перерізу вхідної заготовки для більш точного прогнозу напружено-деформованого стану. Дефекти форми бічної кромки можуть сягати великих величин і для отримання якісної кромки їх потрібно враховувати при визначенні обтиснень в еджерних валках, також потрібно аналізувати подальші проходи для більш точного прогнозу форми листа.

РОЗДІЛ 4

ЦИФРОВЕ РІШЕННЯ ДЛЯ КАЛІБРОВКИ ВАЛКІВ: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОКАТКИ В КАЛІБРАХ «ОВАЛ-КРУГ»

Без перебільшення можна сказати, що сучасну людину оточує «паралельний» цифровий світ – соціальні мережі, товари та послуги інтернету, розумна побутова техніка та інші цифрові елементи життя. Не є винятком і такі сфери людського життя, як бізнес, виробництво, логістика, торгівля, економіка в цілому. Цифрові технології дедалі глибше і міцніше проникають у всі галузі людського життя, змінюючи їхню сутність, точніше сутність їхньої взаємодії з людиною. Якщо узагальнити всі тенденції технологічного розвитку сучасного суспільства, можна констатувати, що цифрова економіка дедалі більше стає реальністю.

Концепція цифрової економіки була сформульована ще у 1990-х роках, проте єдиного формулювання «цифрова економіка» не існує досі. За версією Комісії ООН з торгівлі та розвитку (UNCTAD) «цифрова економіка – застосування цифрових технологій на основі Інтернету для виробництва та торгівлі товарами та послугами» [48]. Під цифровою економікою також можуть розуміти, що економіку, засновану на інформаційно-комунікаційних технологіях, інтернет-економіку, веб-економіку, є й інші визначення. Цифрова економіка, і, отже, цифрові трансформації, впливають на економічний розвиток суспільства, держави, регіону, підприємства.

Цифрова трансформація підприємства – це програма проектів з автоматизації бізнес процесів і технологій [49]. У силу високого ступеня автоматизації, наявності та доступності цифрових технологій та систем, трансформації схильні не тільки і не стільки до процесів – скільки до основних продуктів компаній.

На думку фахівців Morgardshammar [50] забезпечення сучасних вимог до продуктивності та якості на сортових станах вимагають постійного аналізу існуючих процесів та обладнання, що неможливе без використання спеціального

програмного продукту. Для цього фірма пропонує власну розробку WICON. Докладніше цей програмний продукт описаний у роботі [51], аналіз якої свідчить про істотні недоліки математичної моделі, закладеної основою програми. Головний недолік – це неточності розрахунку розширення, які неминуче виникають під час використання формули Вусатовського.

Для підвищення точності розрахунку сучасні дослідники найчастіше використовують програмне забезпечення на основі МКЕ. Проте, як зазначено в роботі [52], досвідчений калібрувальник здатний спроектувати, випробувати в роботі та оптимізувати калібри до кінцевого стану за такий короткий проміжок часу та з такою точністю, з якою не може зрівнятися жодне відоме на даний момент програмне забезпечення МКЕ. В даний час використання кінцево-елементних програм для моделювання процесів сортової прокатки дуже обмежене. Слід зазначити, що їх застосування може бути виправдане, якщо необхідно вивчити закономірності течії металу та (або) розподілу напружень в осередку деформації. Прикладом такого комплексного та складного дослідження може бути робота [53], де за допомогою кінцево-елементного аналізу досліджувалося особливості формоутворення двотаврової балки з низьковуглецевої сталі при прокатуванні в обтискній кліті.

Таким чином, складні та коштовні програми поки що не знайшли широкого застосування для вирішення виробничих завдань на прокатних станах. Основний акцент робиться в основному на практичний досвід і виробничі експерименти. У той же час оптимізація виробничого процесу тільки на основі експериментальних досліджень пов'язана зі значними тимчасовими та фінансовими витратами. Тому це також неефективно. Це призвело до того, що в даний час нечисленні провідні організації та вчені займаються розробкою швидкодіючих інженерних комп'ютерних систем для автоматизованого проектування калібрів прокатки профілів. Так, у роботі [54] основна увага приділяється інтеграції КЕ-моделювання процесу прокатки з проектуванням калібрів прокатки для його ефективності та автоматизації для широкого спектру

профілів. Моделі враховують характеристики обладнання стану, матеріалу, що прокочується, та інші основні параметри прокатки.

Програмне забезпечення, що подібне до описаного в роботі [50], розроблено вітчизняними вченими з ТОВ «ДОНІКС» [55]. У ньому використовується моделювання на основі математичних формул з високою точністю та швидкістю розрахунку. Аналіз форми фактичних та розрахункових бічних кромek розкатів [55] показує, що з найбільшою похибкою визначається ширина контакту смуги з валками.

Таким чином, огляд наукової літератури показує, що диджиталізація калібрувального бюро прокатного підприємства відбувається насамперед у напрямі впровадження спеціалізованого програмного забезпечення корисного для розробки та оптимізації калібрування валків, а також для аналізу ефективності налаштування прокатного обладнання.

Метою даної роботи є розробка диджитального рішення для калібрувального бюро, яке можна використовувати як для конструювання, так і для оптимізації калібрування валків, а також для аналізу ефективності налаштування прокатного обладнання на основі універсальної математичної моделі безперервної прокатки простих профілів у системі калібрів «овал-круг».

У запропонованій моделі використовується варіаційний принцип механіки суцільного середовища мінімуму сумарної потужності внутрішніх та зовнішніх сил осередку деформації. В даний час найбільш розробленими двома методами вирішення варіаційних задач обробки металів тиском є метод кінцевих елементів (МКЕ) та метод Рітца. Вище було зазначено деякі недоліки методу кінцевих елементів під час вирішення завдань деформації – це кошовність та «важкість» продукту.

Використання методу Рітца дозволяє з достатньою для систем автоматизації точністю визначати коефіцієнти деформації для простих та складних форм осередку деформації. Однак, як зазначено в [56], спроба описати поле швидкостей рівномірними функціями для осередку деформації зазвичай стикається з великими труднощами. Тому найбільш раціональним підходом до

вирішення завдань прокатки в калібрах є поділ фактичної зони деформації на активні, пасивні та перехідні ділянки. Потім кожної частини зони підбирається поле швидкостей з урахуванням їх взаємодії друг з одним [56]. Ця математична модель не є універсальною. Щоразу необхідно розбивати осередок деформації на частини. Потім їм отримувати компоненти тензора швидкостей деформацій і вирішувати варіаційне рівняння. Також існують проблеми, пов'язані з визначенням меж осередку деформації складної форми та інші. Тому пропонується при визначенні формозміни металу у кожному калібрі системи «овал – круг» замінити складний профіль розкату на еквівалентний прямокутник за методом відповідної смуги, а фактичну форму калібру замінити на «гладку бочку» (рис. 4.1).

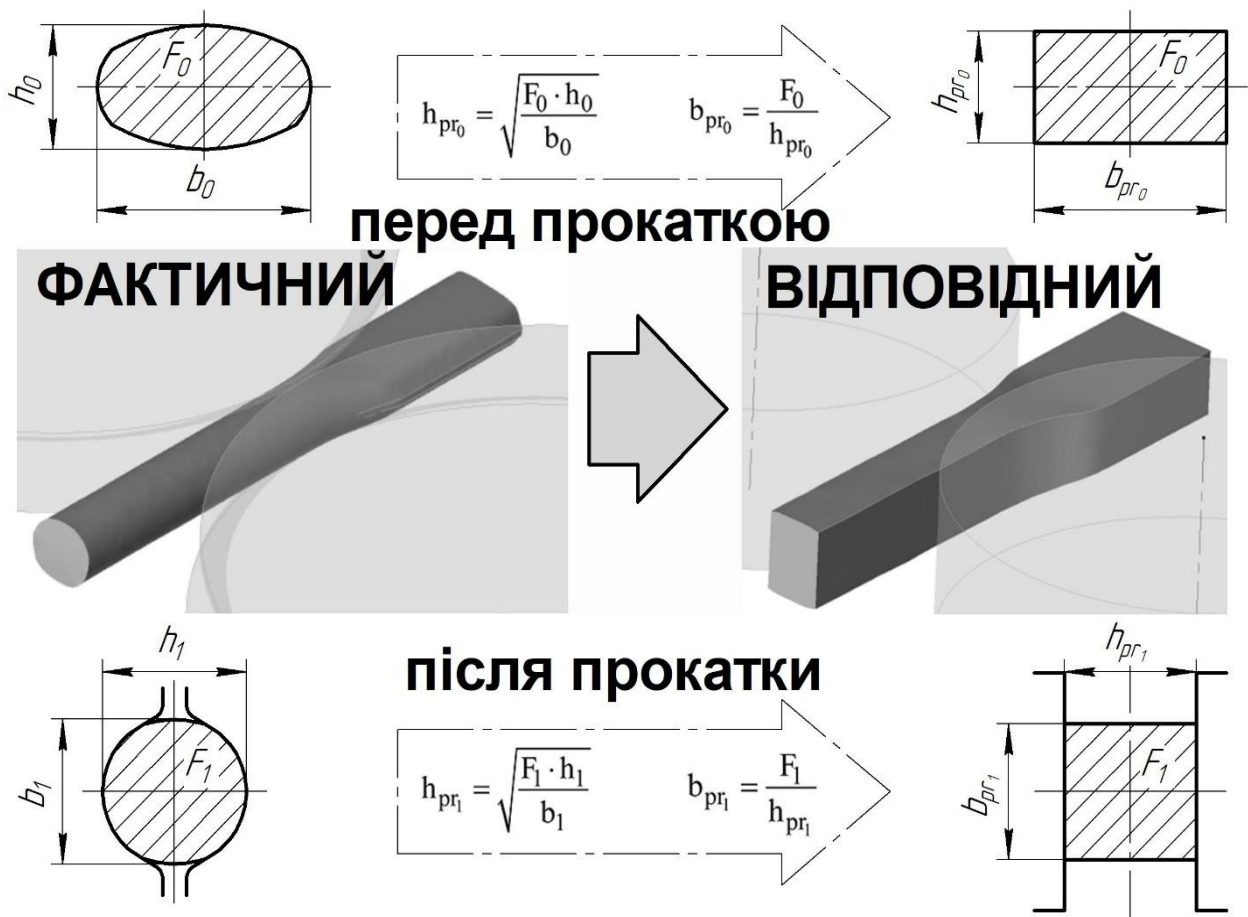


Рисунок 4.1 – Перетворення профілю заготовки та форми калібру на прямокутник за методом відповідної смуги

Потім вирішується варіаційне рівняння поля швидкостей жорстко-пластичного середовища при прокатці прямокутного профілю на гладкій бочці.

Варіаційне рівняння для поля швидкостей жорстко-пластичного середовища [56]:

$$\delta \left[\iiint_V \tau_s H dV + \iint_{S_{cr}} \tau_s [v] dS - \iint_{S_\sigma} \sigma_{n_i} v_i dS \right] = 0, \quad (4.1)$$

де δ – знак варіації; V – обсяг осередку деформації; τ_s – межа плинності при зсуві; H – інтенсивність швидкості деформації зсуву; S_{cr} – поверхня зрізу; $[v]$ – стрибок швидкості на поверхні зрізу; S_σ – поверхня контакту розкату, що прокатується, з валками; σ_{n_i} , v_i – напруження та швидкість ковзання на поверхні деформованого твердого тіла.

Початок координат розташований у площині виходу розкату з валків. Вісь спрямована проти ходу прокатки. Кінематично можливе поле швидкостей в осередку деформації при прокатці на гладкій бочці виводиться з умови, що тверде тіло не стисливе і на поверхні контакту виконується умова непроникності.

Рішення варіаційного рівняння (4.1) не може бути отримано аналітично через складний та нелінійний вид функціоналу. Тому визначення істинного поля швидкостей використовується його властивість мінімальності. Варіаційне завдання зводиться до наступного: серед усіх кінематично можливих полів швидкостей, що задовольняють заданим граничним умовам та умові нестискання, необхідно знайти поле, що реалізує мінімум функціоналу (4.1). У цьому функціоналі кожен член є компонентом повної потужності.

Мінімізація функціоналу здійснюється шляхом пошуку на сітці невідомих параметрів. Інтервали зміни:

$$\lambda = 1 \dots \frac{h_{pr0}}{h_{pr1}}; a_1 = 1 \dots 1,15. \quad (4.2)$$

де h_{pr_0} , h_{pr_1} – середня висота заготовки перед прокаткою та середня висота профілю після прокатки, відповідно.

Для забезпечення умов безперервної прокатки деформаційні параметри для другого (наступного) проходу визначаються за аналогічною методикою, але з урахуванням силових впливів з боку першої кліті. Для цього спочатку вирішуємо варіаційну задачу для другого проходу при умові вільної прокатки. Далі обчислюють швидкість виходу металу після другого проходу:

$$v_{m_2} = a_2 \cdot v_{b_2},$$

де v_{m_2} – швидкість металу після другого проходу; a_2 – коефіцієнт випередження для другого проходу; v_{b_2} – середня кутова швидкість валків у другому проході.

Для визначення наявності стискаючих або розтягувальних напружень в розкаті між першою і другою клітями необхідно визначити швидкість входу металу в другий калібр для умов вільної прокатки:

$$v_{m_{02}} = \frac{v_{m_2}}{\lambda_2},$$

де λ_2 – коефіцієнт подовження у другому проході.

Далі порівнюються значення v_{m_1} та $v_{m_{02}}$. Якщо $v_{m_1} > v_{m_{02}}$, то в просторі між клітями виникає стискаюче напруження. Якщо швидкості рівні, то прокатка здійснюється без розтягуючих або стискаючих напружень між клітями. А якщо $v_{m_1} < v_{m_{02}}$, то у в розкаті між клітями спостерігається розтягуюче напруження.

За наявності стискаючих напружень розміри профілю, що прокатується, не змінюються в просторі між клітями, так як відстань між клітями значно більше перерізу розкату. Тоді за умови $v_{m_1} \geq v_{m_{02}}$ розрахунки розмірів розкату та умов прокатки у третьому проході проводять з використанням описаного вище методу без урахування силових впливів з боку попередньої кліті. Для умов прокатки з розтягненням між клітями, необхідно визначити розміри заготовки для другого

проходу безперервного прокатного стану, які зменшуються під дією розтягуючих напружень.

Для цього визначають величину подовження між клітками виходячи з різниці швидкостей:

$$\lambda_{mk_1} = \frac{v_{m_{02}}}{v_{m_1}}.$$

Умови деформації металу між клітками стану аналогічні процесу волочіння, коли профіль розтягується в подовжньому напрямку і одночасно стискається з усіх інших сторін. Для цього випадку справедлива залежність між ступенем деформації та коефіцієнтом подовження:

$$\varepsilon_{mk_1} = \frac{\lambda_{mk_1} - 1}{\lambda_{mk_1}}.$$

Вважаємо, що різницю швидкостей на вході в другу кліть і виході з першої рівномірно розподілена по простору між клітками. Звідси можна визначити середню швидкість деформації між клітками:

$$u_{mk_1} = \frac{v_{m_{02}} - v_{m_1}}{\ell_{mk_1}},$$

де ℓ_{mk_1} – відстань між осями валків першої та другої клітей.

Визначають розтягувальне напруження в просторі між першою і другою клітками. Так як середня швидкість деформації в просторі між клітками через велику відстань не перевищує 100 с^{-1} , то напруження можна розрахувати будь-яким відомим методом для розрахунку опору деформації при гарячій прокатці.

Зменшення розмірів заготовки, що надходить у другий осередок деформації, визначається:

$$h_{01}^t = h_{02} \cdot (1 - \nu \cdot \varepsilon_{mk_1}), \quad (4.3)$$

$$b_{0_1}^t = b_{0_2} \cdot (1 - \nu \cdot \varepsilon_{mk_1}), \quad (4.4)$$

де h_{0_2} , b_{0_2} – висота та ширина заготовки для другого проходу без урахування деформації між клітьми; ν – коефіцієнт Пуассона для сталі при температурі прокатки.

Коефіцієнт Пуассона для гарячої сталі приймається рівним $\nu = 0,44$.

Після цього коефіцієнт розширення для заданих розмірів заготовки визначається відповідно до універсального варіаційного методу розрахунку деформації при прокатці в калібрах системи «овал-круг». А ширина розкату після прокатки у другому проході визначається з урахуванням заднього натягіння. Така методика розрахунку зберігається всім наступних проходів безперервного стану.

В результаті отримуємо значення коефіцієнтів подовження з урахуванням натягіння прокату між клітьми по всіх проходах. Далі, знаючи значення коефіцієнта витяжки, визначають площу профілю після прокатки за кожен прохід безперервного стану. Потім, знаючи значення площі профілю, обчислюють дійсну ширину прокату після прокатки. Дійсна ширина відповідає площі, обмеженої контуром калібру та лінією бічної поверхні поперечного перерізу прокату.

На рис. 4.2 та 4.3 представлений загальний вигляд головного вікна програми. За результатами розрахунку у графічному полі будується контур заготовки та калібру, заповненого металом.

Як видно з рис. 4.2 та рис. 4.3, розроблена математична модель, незважаючи на спрощення, враховує заповнення овальних та круглих калібрів клітей безперервного прокатного стану.

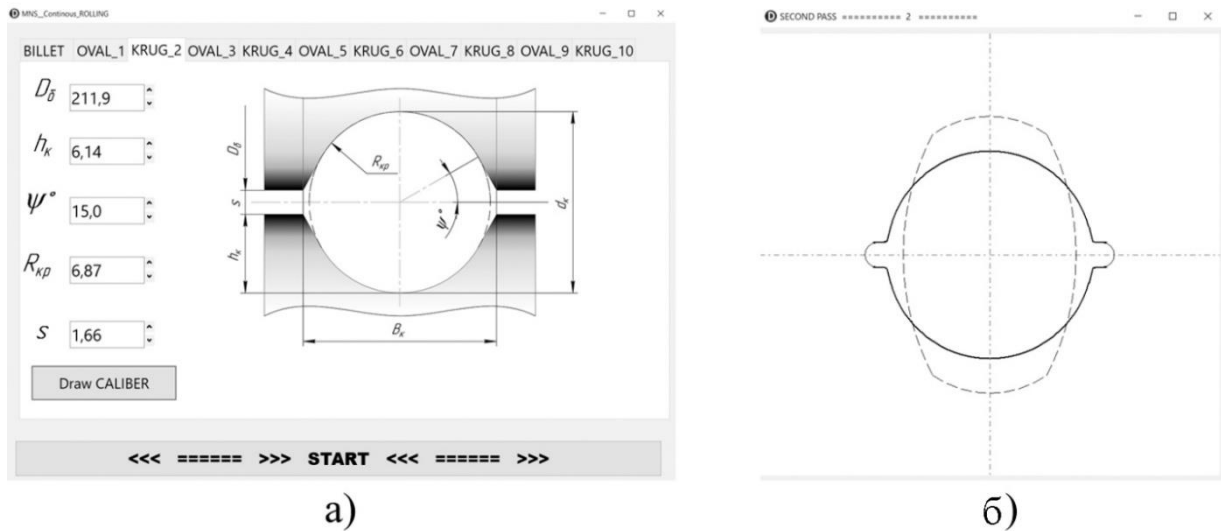


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд головного вікна програми розрахунку та побудови круглих калібрів (а) та графічне подання результатів розрахунку (б)

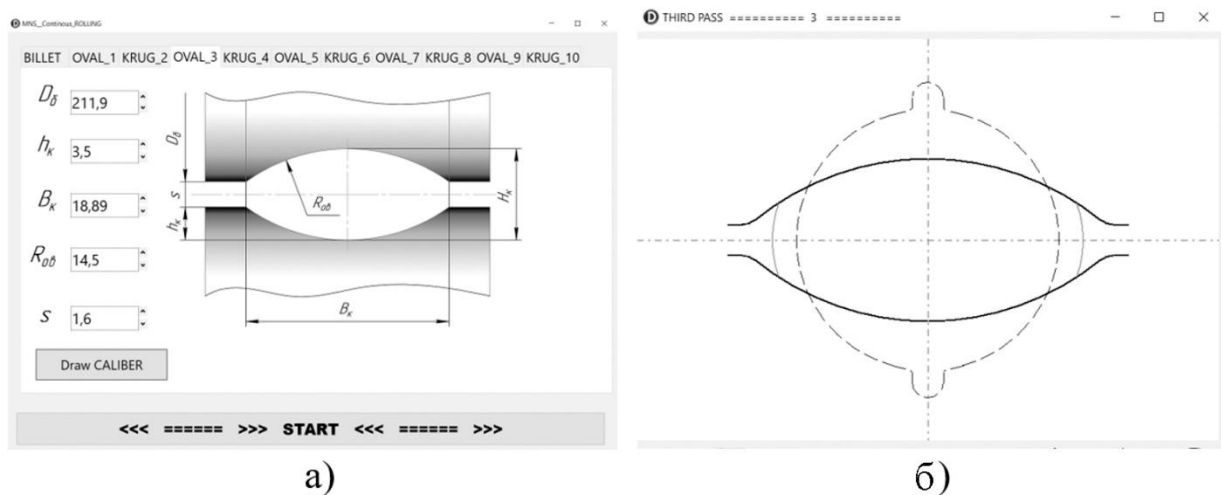


Рисунок 4.3 – Загальний вигляд головного вікна програми розрахунку та побудови овальних калібрів (а) та графічне подання результатів розрахунку (б)

Висновки

У роботі розроблено універсальну математичну модель процесу безперервної прокатки в калібрах системи «овал – коло». При виведенні математичної моделі використані варіаційні принципи механіки суцільних середовищ, що ґрунтуються на мінімальних властивостях дійсного поля швидкостей. Для забезпечення універсальності запропонованої моделі визначення формозміни металу в овальних та кругових калібрах пропонується

замінити профіль заготовки еквівалентним прямокутним перерізом з використанням методу відповідної смуги. При цьому форма круглого або овального калібру замінюється на «гладку бочку» також за правилами методу відповідної смуги. Умови безперервної прокатки враховуються шляхом розрахунку наведених розмірів заготовки під дією розтягуючих сил між клітями прокатного стану. Заповнення калібру визначається зворотним перетворенням із відповідного прямокутного перерізу в область, обмежену контуром калібру та лінією бічної поверхні, що описується радіусом.

На основі запропонованої універсальної математичної моделі процесу безперервної прокатки простих профілів у овальних та круглих калібрах розроблено програму для визначення зміни форми розкату при прокатці у круглих та овальних калібрах з урахуванням форми профілю заготовки. У графічному вікні програми користувач може бачити фактичний контур заготовки та ступінь заповнення калібрів. В результаті може бути обраний оптимальний режим роботи стану без переповнення калібрів.

Розроблена математична модель може бути використана для дослідження формозміни металу при безперервній прокатці на сортових станах у системі калібрів «овал – круг». Дана модель також рекомендується до використання як розрахунковий модуль для визначення деформації металу при прокатці у високошвидкісному проволочному блоці із загальним приводом.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДА СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ

Вступ. Шпінель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) має високу температуру плавлення і утворюється як деформоване включення типу С у сталях, що містять наднизький вміст кисню. Тому дуже важливо уникнути утворення шпінелі в процесі розкислення високоякісного дроту та підшипникових сталей. При цьому механізм та фазова стійкість утворення шпінелі в рідкій сталі ще недостатньо вивчена через нестачу надійної термодинамічної інформації про її утворення.

У роботах [57–61] було досліджено термодинамічну рівновагу в системі магнію кальцію та алюмінію в рідкому залізі з точки зору стійкості фази шпінелі у розплаві сталі. Результати цих досліджень показують, що стабільність шпінелі залежить від вмісту кисню, алюмінію та магнію. Однак в цих роботах відсутні дані вільної енергії утворення шпінелі за температур сталеваріння та активностей компонентів у діапазоні твердого розчину шпінелі.

Деякі дані про вільну енергію цих систем наведено у літературі [62–66]. Однак дані цих досліджень не знаходять узгодження, оскільки більшість з них була проведена за температур нижчих ніж температури сталеплавильного виробництва. Лише у дослідженнях [5] було проведено визначення вільної енергії утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ за температури 1873 К з урахуванням активності MgO та Al_2O_3 у шлаках $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ за лінією ліквідусу утворення шпінелі. Фазові рівноваги в системах MgO -шпінелі, Al_2O_3 -шпінелі та системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ поблизу температур виробництва сталі були вивчено у роботах [66]. У дослідженнях [65] було проведено термодинамічну оцінку системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$. Показано, що шпінель має широкий діапазон вмісту твердих розчинів, від 50 до 65 мол.% Al_2O_3 , тому активність стехіометричної шпінелі, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, повинна змінюватися як функція складу в діапазоні однорідних твердих розчинів.

Слід зауважити, що немає жодних даних про активність – склад діаграми шпінелі у діапазоні твердих розчинів. В роботах [60, 61] було зроблено припущення, що твердий розчин шпінелі є ідеальним розчином та визначено термодинамічні умови фазової стабільності шпінелі в процесі розкислення рідкої сталі, але термодинамічних характеристик шпінелі у цьому дослідженні не розглядали.

Методи та методики дослідження.

З використанням методу хімічної рівноваги визначення значення вільної енергії Гіббса утворення шпінелі з простих оксидів, $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та зміну активностей компонентів в області гомогенного твердого розчину фази шпінелі.

Метою роботи було:

- визначення вільної енергії утворення Mg та $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, а також активності складових частин твердого розчину шпінелі та самої шпінелі за температур сталеплавильних процесів;
- визначення границі фаз твердого розчину шпінелі з використанням методу дифузійних пар.

Методикою досліджень був термодинамічний аналіз, метод хімічної рівноваги, а також метод дифузійних пар.

Визначення вільної енергії утворення MgO .

Для визначення вільної енергії $\Delta G_f^0 \text{MgO}$ проводились експерименти шляхом встановлення рівноваги між рідкою міддю, що містить графіт у тиглі з MgO у атмосфері $\text{Ar} - \text{CO}$. В результаті було встановлено наступну рівноважну реакцію:



Зміна вільної енергії рівняння (1) пов'язана з константою рівноваги цього процесу K_1 :

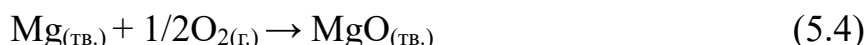
$$\Delta G_1^0 = -RT \ln K_1 = -RT \ln \frac{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{C}}}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}} \quad (5.2)$$

де a_{MgO} , a_{C} та a_{Mg} - активність компонентів, що приймають участь у рівноважній реакції; P_{CO} - парціальний тиск, атм; R – універсальна газова стала Дж/моль·К; T – температура, К. Оскільки активність MgO та вуглецю дорівнює одиниці, у зв'язку з використанням чистого тигля MgO та графіту, вираз для константи рівноваги може набути наступного вигляду:

$$K_1 = \frac{1}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}} = \frac{1}{\gamma_{\text{Mg}} \cdot X_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}} \quad (5.3)$$

де γ_{Mg} - коефіцієнт активності магнію, X_{Mg} - масова частка магнію у рідкій міді, % відповідно.

Значення коефіцієнтів активності магнію у рідкій міді було досліджено у роботі [63]. Дані цих досліджень свідчать, що коефіцієнт активності магнію слабо залежить від температури. Звідси випливає, що при визначенні константи рівноваги процесу утворення MgO можна користуватися рівноважною концентрацією Mg у рідкій міді. Отже зміна вільної енергії утворення MgO можна представити наступним чином:



$$\Delta G_2^0 = -116560 - 84,8T \frac{\text{Дж}}{\text{моль}} \quad (5.6)$$

Визначення вільної енергії утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Реакція стехіометрично утворення шпінелі з чистих оксидів має наступний вигляд:



$$\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = -RT \ln K_2 = -RT \ln \frac{a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}, \quad (5.8)$$

де $a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ та $a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}$ - активність Al_2O_3 та $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, відповідно.

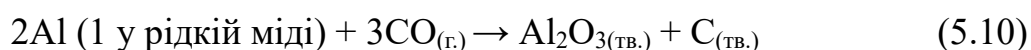
В наших дослідженнях ми приймаємо стандартну активність шпінелі як її стехіометричний склад $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, тоді вираз для визначення вільної енергії Гіббса набуде вигляду:

$$\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = -RT \ln \frac{1}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (5.9)$$

В рівняння (5.9) впливає, що для визначення вільної енергії утворення шпінелі необхідно визначити активності MgO та Al_2O_3 у рівновазі з чистим $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Для визначення $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ нами було використано стехіометрично чистий $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, який знаходився у рівновазі з рідкою міддю та поміщений у графітовий тигель з фіксованим співвідношенням суміші газів $\text{Ar} - \text{CO}$.

Рівновага реакції



відбувається за умов реакції (1).

Зміна енергії Гіббса буде визначатися у відповідності рівняння:

$$\Delta G_2^0 = -RT \ln K_2 = -RT \ln \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot a_{\text{C}}^3}{a_{\text{Al}} \cdot P_{\text{CO}}^3} \quad (5.11)$$

де a_{Al} - активність алюмінію.

Оскільки активність вуглецю дорівнює 1, оскільки використовується графітовий тигель, активність Al_2O_3 може бути виражена рівнянням:

$$a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = K_2 \cdot a_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3 = K_2 \cdot \gamma_{\text{Al}}^2 \cdot X_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3, \quad (5.12)$$

де γ_{Al} - коефіцієнт активності алюмінію в розплаві міді, X_{Al} - масова частка алюмінію у розплаві.

Значення K_2 можна знайти за значеннями стандартних енергій Гіббса ΔG_2^0 з використанням таблиць термодинамічних величин. Значення активності алюмінію a_{Al} було знайдено з використанням робіт [64–67]. Отже активність $a_{Al_2O_3}$ в стехіометричній сполуці може бути знайдена за рівноважним вмістом алюмінію у рідкій міді.

Активність MgO також можна визначити зі значення K_1 за значенням ΔG_1^0 , що визначається у відповідності рівняння (6). Отже рівняння для визначення активності MgO має наступний вигляд:

$$a_{MgO} = K_1 \cdot a_{Mg} \cdot P_{CO} \quad (5.13)$$

Вільна енергія рівняння (5.7) може бути визначена з рівняння (5.9) шляхом підстановки активності кожного учасника процесу.

Далі активність стехіометричної шпінелі у твердому розчині може бути отримана за наступним рівнянням:

$$a_{MgO \cdot Al_2O_3} = K_1 \cdot a_{MgO} \cdot a_{Al_2O_3} \quad (5.14)$$

Для виміру вільної енергії утворення MgO 5 г розплаву Cu – 0,1 мас.% Mg завантажували у тигель з MgO, що містив циліндричний графітовий блок, в якому було просвердлено 7 чи 8 отворів для забезпечення прямого контакту газової суміші CO – Ar з поверхнею розплавленої міді. При вимірюванні вільної енергії утворення шпінелі та активностей компонентів у твердому розчині шпінелі 5 г сплаву Cu – (0,005-0,03 мас.%) Mg – (0,1 – 1,1 мас.%) Al завантажували у графітовий тигель з таблеткою стехіометричної шпінелі. Утворення шпінелі було підтверджено методом рентгенівської дифракції,

електронно-зондовим мікроаналізатором з дисперсією довжин хвиль (ЕРМА) та мокрим хімічним аналізом.

Експериментальні результати вільної енергії утворення MgO наведено у таблиці 1.

Дані таблиці свідчать, що було досягнуто умови рівноваги у нашому експерименті між CO , MgO та рідкою міддю.

Таблиця 5.1 – Експериментальні результати вільної енергії утворення MgO

N	T, K	P_{CO} , атм	$X_{\text{MgO}} \times 10^4$, долі 1	$a_{\text{MgO}} \times 10^6$	ΔG_1^0 , кДж/моль
1	1700	0,516	1,22	8,411	- 174,52
2	1700	0,367	1,41	9,710	- 177,31
3	1700	0,247	2,05	1,407	- 177,68
4	1700	0,296	1,28	8,813	- 181,74
5	1800	0,984	2,74	2,184	- 160,85
6	1600	0,098	3,95	2,293	- 203,59
7	1700	0,975	7,23	4,996	- 172,97
8	1750	0,990	1,09	8,032	- 170,84

Тому вільна енергія, що ілюструється рівнянням хімічної реакції (5.4) ΔG_f^0 може бути визначена з ΔG_1^0 та ΔG_2^0 як функція температури у Дж/моль:

$$\Delta G_1^0 = 552790 - 220,0T \quad (5.16)$$

$$\Delta G_{\text{MgO}}^0 = -669350 + 135,0T \quad (5.17)$$

Далі нами було визначено вільну енергію утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Дані наведено у таблиці 2. Вільну енергію утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ з окремих оксидів, $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, визначали з рівняння температурної залежності як у Дж/моль:

$$\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = -20790 - 15,7T \quad (5.18)$$

Таблиця 5.2 – Експериментальні результати вільної енергії утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

N	T, K	P_{CO} , атм	X_{Al} у міді $\times 10^3$, долі 1	X_{Mg} у міді $\times 10^5$, долі 1	$a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	a_{MgO}	$\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, кДж/моль
1	1700	0,250	3,4	2,34	0,422	0,124	- 41,68
2	1651	0,100	4,5	1,31	0,519	0,079	- 43,91
3	1850	0,970	9,5	1,03	0,248	0,111	- 55,35
4	1850	0,990	9,8	1,38	0,296	0,154	- 47,52
5	1749	0,200	14,2	6,05	0,448	0,092	- 46,34
6	1798	0,700	7,1	5,1	0,472	0,105	- 44,86
7	1798	0,500	1,13	4,76	0,474	0,070	- 50,86

Відомо, що $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ має відносно широкий діапазон твердих розчинів за високої температури. Границі фаз твердого розчину ми визначали з використанням методу дифузійних пар. Встановлено діапазон існування твердих розчинів шпінелі від 48,4 до 57,5 моль% Al_2O_3 за 1700 К та від 46, до 64,2 моль% Al_2O_3 за 1900 К відповідно.

Далі нами було визначено активність MgO та Al_2O_3 у всьому діапазоні складу твердого розчину шпінелі за 1800 та 1873 К. Дані досліджень наведено у таблиці 5.3.

Активності MgO та Al_2O_3 для кожної границі насичення дорівнювали одиниці. Активність стехіометричної шпінелі $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ у твердому розчині було визначено за активностями MgO та Al_2O_3 та $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Активність $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ було розраховано з використанням рівнянь (5.19) та (5.20) де псевдо-бінарні суміші $\text{MgO} - \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ вважалися ідеальними розчинами.

$$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{X_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{1 - X_{\text{Al}_2\text{O}_3}} (\text{MgO} - \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) \quad (5.19)$$

$$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{1 - X_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{X_{\text{Al}_2\text{O}_3}} (\text{MgO} - \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) \quad (5.20)$$

Таблиця 5.3 – Експериментальні результати активностей компонентів у твердому розчині шпінелі

N	T, K	P _{CO} , атм	Фаза рідкої міді		Фаза шпінелі			
			X _{Al} , долі 1	X _{Mg} ×10 ⁴ , долі 1	X _{Al₂O₃}	a _{Al₂O₃}	a _{MgO}	a _{MgO·Al₂O₃}
1	1800	0,811	0,0016	3,99	47,3	0,032	0,917	0,781
2	1801	0,383	0,0131	1,03	48,0	0,257	0,109	0,745
3	1801	0,398	0,0132	6,90	48,1	0,293	0,076	0,592
4	1802	0,516	0,0111	6,50	50,0	0,416	0,091	1,006
5	1798	0,499	0,0134	3,55	52,5	0,682	0,052	0,942
6	1799	0,503	0,0144	2,75	54,8	0,786	0,040	0,832
7	1801	0,340	0,0258	2,45	57,3	0,884	0,023	0,541
8	1800	0,287	0,0327	2,34	61,1	1,020	0,019	0,513
9	1873	0,993	0,0056	12,9	47,0	0,034	0,954	0,810
10	1874	0,986	0,0136	2,52	47,9	0,218	0,181	0,989
11	1871	0,988	0,0220	6,34	53,8	0,754	0,048	0,910
12	1874	0,986	0,0244	4,77	57,3	0,852	0,034	0,731
13	1875	0,992	0,0256	4,10	58,5	0,937	0,029	0,682
14	1873	0,990	0,0254	2,57	63,4	0,991	0,019	0,468

Розрахунками показано, що розчин стехіометричної шпінелі MgO·Al₂O₃ демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля.

Висновки і пропозиції

В результаті проведених досліджень визначено вільні енергії утворення MgO та MgO·Al₂O₃, а також активності компонентів у твердому розчині шпінелі методом хімічної рівноваги.

Встановлено:

- 1) рівняння для визначення вільної енергії утворення MgO та MgO · Al₂O₃;
- 2) показано, що твердий розчин MgO · Al₂O₃ демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля;
- 3) визначено коефіцієнт активності MgO · Al₂O₃ при насичених MgO та Al₂O₃.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У межах виконання першого етапу НДР вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності металургійних процесів шляхом удосконалення технологій підготовки сировини, виробництва та обробки металопродукції, а також розвитку цифрових методів моделювання та автоматизованого проєктування технологічних процесів. Отримані результати спрямовані на підвищення енергоефективності виробництва, якості металопродукції та рівня цифровізації підприємств гірничо-металургійного комплексу.

2. Встановлено закономірності впливу властивостей шихти та застосування поверхнево-активних речовин на показники роботи випалювальних машин. Показано можливість підвищення енергетичної ефективності виробництва залізорудних окатишів шляхом оптимізації параметрів шихти, режимів випалу та використання технологічних добавок, що забезпечують покращення якості сирих і випалених окатишів.

3. Визначено особливості формування структури та механічних властивостей сталей при реалізації технології термомеханічно контрольованої прокатки на ливарно-прокатних комплексах. Показано перспективність використання ливарно-прокатних модулів для виробництва високоякісного плоского прокату з підвищеними експлуатаційними характеристиками та зниженими питомими витратами енергоресурсів.

4. Розроблено математичні моделі процесу прокатки листового металу в еджерних валках та отримано регресійні залежності для визначення енергосилових параметрів процесу. Встановлено вплив величини обтиснення на параметри деформації металу та підтверджено можливість використання розроблених моделей для автоматизованого проєктування режимів прокатки.

5. Розроблено цифрове рішення для автоматизованого проєктування калібрів валків на основі математичної моделі безперервної прокатки в системі калібрів «овал–круг». Запропонований підхід дозволяє підвищити точність

розрахунків, скоротити обсяг виробничих експериментів та прискорити технологічну підготовку виробництва сортового прокату.

6. Визначено термодинамічні характеристики утворення шпінельних включень $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ у сталевих розплавах, зокрема значення вільної енергії утворення та активності компонентів у системі $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$. Отримані результати поглиблюють уявлення про механізми формування неметалевих включень та створюють наукову основу для підвищення чистоти сталі і якості металопродукції.

7. Подальшого розвитку набули підходи до цифрового моделювання металургійних процесів, автоматизації інженерних розрахунків та використання математичних моделей для підтримки прийняття технологічних рішень. Показано перспективність застосування цифрових технологій при проєктуванні та оптимізації металургійного виробництва.

8. Отримані результати можуть бути використані на гірничо-збагачувальних комбінатах, металургійних і прокатних підприємствах, у науково-дослідних та проєктних організаціях для підвищення енергоефективності виробництва, якості металопродукції та рівня цифровізації технологічних процесів.

9. Результати науково-дослідної роботи опубліковані у наукових працях [68–115]. Основні результати впроваджено у навчальний процес ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» у 2025–2026 навчальному році (див. Додаток).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Hirlekar O., Kolte A., Vasa L. Transition in the mining industry with green energy: Economic dynamics in mining demand. *Resources Policy*. Vol. 100. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.105409
2. Hooey L., Riesbeck J., Wikström J.-O., Björkman B. Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking. *ISIJ International*. Vol. 54, no. 3. P. 596–604. DOI: 10.2355/isijinternational.54.596
3. He K., Wang L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 70. P. 1022–1039. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.007
4. Moraes S. L. de, Lima J. R. B. de, Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. / ed. by V. Shatokha. London: IntechOpen; 2018. DOI: 10.5772/intechopen.73164
5. Miranda T., Montero I., Sepúlveda F. J., Arranz J. I., Rojas C. V., Nogales S. A review of pellets from different sources. *Materials*. Vol. 8, no. 4. P. 1413–1427. DOI: 10.3390/ma8041413
6. Kruzhilko O., Maystrenko V., Tkalych I., Polukarov Yu., Kalinchyk V. P., Neklonskyi I., Ryzhchenko O. Study of the harmful factors influence on the occupational risk level: The example of the Ukrainian mining industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 110, no. 1. P. 35–41. DOI: 10.5604/01.3001.0015.7029
7. Kruzhilko O., Volodchenkova N., Maystrenko V., Bolibrukh B., Kalinchyk V. P., Zakora A., Feshchenko A., Yeremenko S. Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 108, no. 1. P. 35–41. DOI: 10.5604/01.3001.0015.4797
8. Azimova L., Mirbabayeva N. Method for reducing fuel consumption when roasting pellets from magnetite iron ore concentrate. *Engineering Headway*. Vol. 7. P. 45–50. DOI: 10.4028/p-hG5G1U

9. Iljana M., Paananen T., Mattila O., Kondrakov M., Fabritius T. Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties. *Metals*. Vol. 12, no. 2. P. 302. DOI: 10.3390/met12020302
10. Savchenko I., Shapoval O., Bakharev V., Chupilko T., Babaryka M., Dzyna N. Mathematical model of rheological processes of composite materials deformation. *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. P. 01–06. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005658
11. Eisele T. C., Kawatra S. K. A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. Vol. 24, no. 1. P. 1–90. DOI: 10.1080/08827500306896
12. Koval A. D., Efremenko V. G., Brykov M. N., Andrushchenko M. I., Kulikovskii R. A., Efremenko A. V. Principles of development of grinding media with increased wear resistance. Part 2. Optimization of steel composition to suit conditions of operation of grinding media. *Journal of Friction and Wear*. Vol. 33, no. 2. P. 153–159. DOI: 10.3103/S1068366612020079
13. Kumeda K., Nakamura H., Ohsaki S., Watano S., Fujiwara S., Iwami Y., Murao A. Relationship between the agitation torque of the wet iron ore powder and pellet properties. *ISIJ International*. Vol. 65, no. 1. P. 62–69. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-281
14. Kumar S., Singh M., Singh J., et al. Rheological characteristics of uni/bi-variant particulate iron ore slurry: Artificial neural network approach. *Journal of Mining Science*. Vol. 55, no. 2. P. 201–212. DOI: 10.1134/S1062739119025468
15. Mujumdar A. S. Drying in mineral processing. *Handbook of Industrial Drying*. 2nd ed. Vol. 2 / ed. by A. S. Mujumdar. New York : Marcel Dekker, 1995. P. 921–929.
16. Sheehan M. E. A systems and resistance analysis of heat loss through an industrial flighted rotary ore dryer. *Proc. 13th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-13)*. / Kyoto, 2006. P. 9. DOI: 10.1615/IHTC13.p24.110

17. Athayde M., Cota M., Covcevic M. Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. Vol. 39, no. 4. P. 266–275. DOI: 10.1080/08827508.2017.1423295
18. Souza A. S. E., de Souza Pinto T. C., Sarkis A. M., de Pádua T. F., Béttega R. Energy analysis of the convective drying of iron ore fines. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. Vol. 29, no. 3. P. 189–200. DOI: 10.2298/CICEQ220208026S
19. Kukhar V., Balalayeva E., Hurkovska S., Sahirov Y., Markov O., Prysiaznyi A., Anishchenko O. The selection of options for closed-die forging of complex parts using computer simulation by the criteria of material savings and minimum forging force. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 989. P. 325–331
20. Khrebtova O., Shapoval O., Markov O., Kukhar V., Hrudkina N., Rudych M. Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005724
21. Souza Pinto T. C., Souza A. S., Batista J. N. M., Sarkis A. M., Leal Filho L. S., Pádua T. F. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*. Vol. 39, no. 10. P. 1359–1370. DOI: 10.1080/07373937.2020.1747073
22. Patra A. S., Makhija D., Mukherjee A. K., Tiwari R., Sahoo C. R., Mohanty B. D. Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. *Powder Technology*. Vol. 287. P. 43–50. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.09.030
23. Forsmo S. P. E., Forsmo S.-E., Björkman B. M. T., Samskog P.-O. Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. *Powder Technology*. Vol. 182, no. 3. P. 444–452. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.07.015
24. Kawatra S. K., Claremboux V. Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. Vol. 43, no. 4. P. 529–544. DOI: 10.1080/08827508.2021.1897586

25. Okamoto K., Wakamiya Y., Shimoda N., Itoh T., Wan H., Liu W. Process control system of ultra thin strip production line at Tangshan Iron and Steel Group Co. in China. *IFAC Proceedings Volumes*. 2003. Vol. 36(24). P. 263–268. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37640-1
26. Gi K. J., Um H. Y., Kang J. Y., Jeong H. J., Choi K. H., Lee S. H., Kim S. Y., Chung J. S., Kim H. S. Quantitative study on yield point phenomenon of low carbon steels processed by compact endless casting and rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 734. P. 408–415. DOI: 10.1016/j.msea.2018.08.006
27. Xu S., Wang S., Li S., Cao R., Wu H., Wu G., Gao J., Feng Q., Li H., Mao X. Achieving high strength and large elongation in a strip casting microalloyed steel by ageing treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 860. Article 144217. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144217
28. Peng W., Wei C., Yang J., Chen X., Qi B., Li X., Sun J., Zhang D. Rolling schedule design for the ESP rolling process based on NSGA-II-DE. *ISA Transactions*. 2025. Vol. 158. P. 427–441. DOI: 10.1016/j.isatra.2024.12.047
29. Motomura T., Ueda K., Imazeki T., Fukui Y., Yahiro K. Coiler control in endless hot strip rolling. *IFAC Proceedings Volumes*. 2005. Vol. 38(1). P. 57–62. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01688
30. Torres N., Greivel G., Betz J., Moreno E., Newman A., Thomas B. Optimizing steel coil production schedules under continuous casting and hot rolling. *European Journal of Operational Research*. 2024. Vol. 314(2). P. 496–508. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.10.005
31. Primetals Technologies Austria GmbH. *ARVEDI ESP Real Endless Strip Production*. Brochure No. T10-0-N022-L4-P-V3-EN. Linz, Austria : Primetals Technologies Austria GmbH, 2023. URL: <https://dam.primetals.com/m/413e30f3ec558b70/original/Arvedi-ESP-Zero-carbon-High-Quality-Rolling-since-2009.pdf>
32. SMS group GmbH. *CSP® Nexus Plant Supplied by SMS Group to JSW STEEL (Dolvi Works)*. Düsseldorf, Germany : SMS group GmbH, 2024. URL:

<https://www.sms-group.com/en-ca/press-and-media/press-releases/press-release-detail/cspr-nexus-plant-supplied-by-sms-group-to-jsw-steel-dolvi-works>

33. DUE® A revolutionary concept for thin slab casting and rolling. *Danieli & C. S.p.A.* 2025. URL: https://www.danieli.com/en/products/processes-technologies/product-lines/due_26_192.htm

34. Wang S., Shi Y., Liu S. Integrated scheduling for steelmaking continuous casting – hot rolling processes considering hot chain logistics. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Article ID 6902934. 10 p. DOI: 10.1155/2020/6902934

35. Steinboeck A., Mühlberger G., Kugi A. Control of strip tension in a rolling mill based on loopers and impedance control. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. Vol. 47(3). P. 10646–10651. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00993

36. Kwon W., Kim S., Won S. Active disturbance rejection control for strip steering control in hot strip finishing mill. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48(17). P. 42–47. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.10.075

37. Yokota S., Sekine H., Tsuchiya Y., Mugita H., Aimoto K. High productivity improvement in JFE Fukuyama no.1 hot strip mill. *IFAC Proceedings Volumes*. 2005. Vol. 38(1). P. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01710>

38. Li P., Li F. The optimal design of hot steel strip temperature control algorithm. *IFAC Proceedings Volumes*. 2003. Vol. 36(24). P. 129–132. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37615-2

39. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Chernenko S., Prysiashnyi A. Developing of X65 steel coils making at Steckel mill using thermo-mechanical control process. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. Article 07017. P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007017

40. Kurpe O.H., Kukhar V.V., Klimov E.S. Finite-element simulation of Steckel mill rolling. *Key Engineering Materials*. Switzerland. 2021. Vol. 887. P. 564–574. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.564

41. Курпе О.Г., Кухар В.В. Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65. *Вісник КрНУ імені*

Михайла Остроградського. *Матеріалознавство*. 2020. Вип. 2(121). С. 122–128.
DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.122-128

42. Капланов В.І., Курпе О.Г. Вдосконалена залежність для визначення пластичних властивостей сталі категорії міцності X70. *Університетська наука – 2009*: тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. ПДТУ. Маріуполь. 2009. С. 156–157.

43. Ginzburg V. B., Ballas R. Flat rolling fundamentals. CRC Press, 2000. 850 p. DOI: 10.1201/9781482277357

44. Liu Y.M., Hao P.J., Wang T. et al. Mathematical model for vertical rolling deformation based on energy method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 107. P. 875–883. DOI: 10.1007/s00170-020-05094-3

45. Shangwu X., Rodrigues J.M.C., Martins P.A.F. Three-dimensional modelling of the vertical–horizontal rolling process. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2003. Vol. 39, Issue 11. P. 1023-1037. DOI: 10.1016/S0168-874X(02)00154-3

46. Forouzan M.R., Salehi I., Adibi-sedeh A. H. A comparative study of slab deformation under heavy width reduction by sizing press and vertical rolling using FE analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209, Issue 2. P. 728-736. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.063

47. Yu H., Liu X., Zhao X., Kusaba Y. FEM analysis for V–H rolling process by updating geometric method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 180, Issues 1–3. P. 323-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.07.012>

48. World Investment Report 2017. Investment and the Digital Economy Geneva: UNCTAD, 2017, 238 p. URL: http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/wir2017_en.pdf (date of access: 22.06.2025).

49. Романов М. Цифрова трансформація виробничого підприємства. *Індустрія 4.0 в Україні*. URL: <https://industry4-0-ukraine.com.ua/2017/06/30/цифровая-трансформация-производстве/> (дата звернення: 22.06.2025).

50. The WICON rolling simulation software – for billet, bar and rod mills. *WICON*. URL: <http://www.wicon.se/index.html> (date of access: 22.06.2025).
51. Händemark M. Improved roll pass design for long products with WICON. *MILLENNIUM STEEL*. 2011. P. 144–151.
52. Fabík R., Kliber J., Mamuzic I., Kubina T., Aksenov S. Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (FEM). *Metallurgija*. Sisak then Zagreb. 2012. Vol. 51. P. 341–344.
53. Ganguly S., Wang X., Chandrashekhara K., Buchely M., Lekakh S., O'Malley R., Kumar A., Thapliyal V. Modeling and simulation of mass flow during hot rolling low carbon steel I-beam. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 285–293. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.023
54. Biba N., Stebunov S., Maltsev P., Belugin V., Alimov I. Integration of automated roll pass design and simulation for the development of shape rolling technology. *Materials Research Proceedings* 2024. Vol.44, P. 758–767. DOI: 10.21741/9781644903254-81
55. Солод В.С., Бенецький А.Г., Мамаєв А.Н. Моделювання процесу прокатки профілів з використанням програмного комплексу «Sort-pro» *Обробка матеріалів тиском. Збірник наукових праць Донбаської державної машинобудівної академії*. 2010. №3 (24). С. 60–63. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/article/10SVSPCS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/article/10SVSPCS.pdf) (accessed 22.06.2025).
56. Kobayashi S., Oh S. I., Altan T. *Metal Forming and the Finite-Element Method*. New York : Oxford University Press, 1989. 402 p. ISBN 0-19-504402-9.
57. Park J., Zhang L. Kinetic Modeling of Nonmetallic Inclusions Behavior in Molten Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2021. Vol. 51 (6). P. 2453–2482.
58. Sajjad M., Dekang R., Hongyu Z., Xin T. Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling under static and dynamic conditions. *Archives of Advanced Engineering Science*. 2025. Vol. 3(3). P. 197–204.

59. Wang Q., Zhang Y., Zheng Y., Wang J., Guo Z., Wu X, Zhang Q., Zhu L. Formation and high-temperature stability Mg-doped titanium nitrides in Mg – Ti treated steel: Experiment and first-principles calculation. *Materials Characterization*. 2026. Vol. 232. P. 234–241.
60. Liu Y., Cheng S., Liu T. Study of inclusions-removal and slag-metal dispersion phenomenon in gas-stirred ladle. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 2024. Vol. 22(7). P. 843–853.
61. Nishibata H., Miyatake T., Matsuda Y., Uddin M. A., Kato Y., Harada A. Effect of wettability, number of liquid phases, and agitation procedure on agglomeration/breakup/transfer of fine particles in liquid. *Steel Research International*. 2024. Vol. 95(1). P. 2300331.
62. Zhu Y. L., Cui H. N., Li T., Tan M., Tang G. Z., Xin Z. Y., Xiao, T. T. Study on the motion behavior of inclusion clusters at the steel–slag interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. Vol.54. P. 101–114.
63. Zhu Y. L., Li T., Tang G. Z., Gu Y. J., Cui H. N. Water model study on the flotation behaviors of inclusion clusters in molten steel. *ISIJ International*. 2022. Vol.62(7). P. 1408–1417.
64. Sigworth G. K., Elliott J. F. The thermodynamics of dilute liquid copper alloys. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1974. Vol. 13, No. 3. P. 455–461. DOI: 10.1179/cm.1974.13.3.455.
65. Zhou Y. L., Deng Z. Y., & Zhu, M. Y. Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel–slag interface using water modeling. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2017. Vol.24. P. 627–637.
66. Xuan C. J., Mu, W. Z. Dissolution kinetics of arbitrarily-shaped alumina in oxide melt: An integration of phase-field modelling and real-time observation study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol.834. 155168.
67. Xuan C. J., Mu W. Z. A mechanism theory of dissolution profile of oxide particles in oxide melt. *Journal of the American Ceramic Society*. 2021. Vol.104(1). P. 57–75.

68. Нізяєв К. Г., Стоянов О. М., Малій Х. В., Синегін Є. В., Рубан В. О. Визначення раціонального температурно-швидкісного режиму розливання легованих хромистих сталей. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 4. С. 211–217. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-4-28

69. Povazhnyi O., Kukhar V., Koifman O., Malii K., Pashynskyi V. Improving Condition Monitoring and Maintenance Framework for Refractory Linings in Induction Melting Furnaces through Continuous Improvement Methods. *Processes and Control Systems: Synthesis, Modeling, Optimization*. Kharkiv : Technology Center PC, 2025. P. 151–176. DOI: 10.15587/978-617-8360-19-1.ch5

70. Кухар В. В., Малій Х. В., Штуць А. А., Колісник М. А. Технології «зеленої» металургії для виплавки та обробки сталей сільськогосподарського призначення: від безкоксового виробництва до термомеханічної обробки. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 127–144. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-5-15

71. Єфімова В. Г., Смірнов Ю. О., Малій Х. В., Грудкіна Н. С. Дослідження активностей та вільної енергії компонентів при утворенні твердого розчину $MgO \cdot Al_2O_3$. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. С. 171–176. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-5-19

72. Єфімова В. Г., Смірнов О. М., Пашинський В. В., Малій Х. В. *Формування, коагуляція та асиміляція неметалевих включень у проміжному ковші МБРЗ : монографія*. Одеса : Олді+, 2025. 152 с. ISBN 978-617-8559-46-5

73. Чупринов Є., Кассім Д., Зайцев Г., Ляхова І., Малій Х. Термозміцнення залізородних окатишів на сталевих перфорованих подинах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. № 51. С. 79–85. DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344658

74. Shtoda M. Research on the Width Increasing Capability of Different Caliber Systems When Rolling Slabs. In: Campilho R. D., Ivanov V., Pinto G. F., Baptista A., Silva F. J. G. (eds.). *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. DSMIE 2025*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham : Springer, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-95218-0_15

75. Штода М. М., Павлюк Р. Д. Цифрове рішення для калібровки валків: математичне моделювання прокатки в калібрах «овал–круг». *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. Спецвипуск, присвячений 5-річчю Технічного університету «Метінвест Політехніка». 2025. № 4. С. 223–228. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-4-30

76. Kukhar V. V., Tymoshenko D. O., Volovnenko I. V., Kurpe O. H., Pashynskiy V. V., Shaulska L. V. Electricity Consumption in the Green Transition of Steelmaking: A Case Study of OHF/BF vs. Midrex-EAF at Zaporizhstal. *Proceedings of the 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, 2025. P. 1–5. DOI: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288608

77. Aikin M., Shalomeev V., Kukhar V., Kostryzhev A., Kuziev I., Kulynych V., Dykha O., Dytyniuk V., Shapoval O., Zagorskis A., Burko V., Khliestova O., Titov V., Hrushko O. Recent Advances in Biodegradable Magnesium Alloys for Medical Implants: Evolution, Innovations, and Clinical Translation. *Crystals*. 2025. Vol. 15, No. 8. Art. 671. DOI: 10.3390/cryst15080671

78. Tuzenko O., Kukhar V. V., Sidun N., Krasnianskyi P. Data Science/ML for Strength Prediction in Electric Resistance Butt Welding with Sparse Data. *Proceedings of the 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, 2025. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288697>.

79. Кухар В. В., Чупринов Є. В., Навольнєв І. Ю. Вплив властивостей шихти та застосування ПАР на енергоспоживання і продуктивність випалювальної машини: промислова оцінка та прогнозування. *Металургія*. 2025. Вип. 1. С. 121–132. DOI: 10.26661/2071-3789-2025-1-12.

80. Marchenko I., Balalayeva E., Piatykor O., Kukhar V. Image Compression Research Based on Convolutional Autoencoder. *Information Control Systems & Technologies 2025 : Proceedings of the 13th International Conference on Information Control Systems & Technologies (ICST 2025)*. Odesa, Ukraine, September 24–26, 2025. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4048. ISSN 1613-0073. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4048/paper23.pdf>

81. Тузенко О., Кухар В., Сідун Н., Краснянський П. Комп'ютерне моделювання експериментальних даних при стиковому зварюванні армуючих профілів. *Information Systems and Networks*. 2025. Вип. 18, ч. 1. С. 111–120. DOI: 10.23939/sisn2025.18.111.

82. Кухар В. В., Бойко І. О., Пашинський В. В., Циміданов Д. В. Мікроструктура зварного шва та зони термічного впливу армувальних профілів з киплячих сталей після лазерного зварювання. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 164–169. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-5-18.

83. Спічак О. Ю., Кухар В. В. Вплив технологічних факторів на чистоту поверхні холоднокатаного листового прокату. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 209–218. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-5-24.

84. Курпе О. Г., Кухар В. В. Вдосконалення технології виробництва штаб на ливарно-прокатних комплексах. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 199–207. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-5-23.

85. Kukhar V. V., Vasylevskyi O. V., Shtuts A. A. Investigation of the Causes of Operational Breakdowns in Metallurgical Equipment and Vehicle Parts Produced by Open Die Forging. *Advanced & Novel Technologies – Interdisciplinary Collaboration in Materials Science (ANTICM-2025)* : збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції, Запоріжжя, 25–27 лютого 2025 р. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. С. 42–43.

86. Tymoshenko D. O., Kukhar V. V. Prospects for the Modernization of PJSC «Zaporizhstal» to Expand the Green Steel Range of Specialized Grades. *Advanced & Novel Technologies – Interdisciplinary Collaboration in Materials Science (ANTICM-2025)* : збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції, Запоріжжя, 25–27 лютого 2025 р. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. С. 59–60.

87. Mazuru A., Kukhar V., Moraru S., Vrabie M., Bîcioc M., Paierele S., Mazuru S. *Cerere de brevet de invenție de scurtă durată «Procedeu de fabricare a angrenajului*

roților dințate». № s 2025 0101 ; depusă 24.10.2025 ; solicitant Universitatea Tehnică a Moldovei. 2025. 2 p.

88. Григор'єв Ю. І., Григор'єв І. Є., Пилипчук Д. І., Доброносів Ю. К. Використання спеціальних мобільних дробарно-перевантажувальних пристроїв як інструмент підвищення адаптивності гірничих робіт. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 256–261. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-5-29.

89. Доброносів Ю. К., Грибков Е. П. Проектування обладнання робочої кліти спеціального прокатного стану для нанесення текстури на поверхню смуги. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. № 5(154). С. 180–187. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.5.21

90. Грибков Е. П., Доброносів Ю. К., Каленков О. Ф., Бутурлін О. С. Автоматизоване проектування обтиснень в еджерних валках. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. Спецвипуск, присвячений 5-річчю Технічного університету «Метінвест Політехніка». 2025. № 4. С. 174–179. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-4-23

91. Кухар В. В., Курпе О. Г., Бутенко Е. О., Циміданов Д. В., Малій Х. В. Комплексний аналіз причин деградації цинкового покриття на гнутих сталевих профілях для будівельних конструкцій. *Обработка материалов тиском = Materials Working by Pressure : збірник наукових праць*. 2025. № 1 (54). С. 156–165. DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)156

92. Kukhar V., Kostyryzhev A., Dykha O., Makovkin O., Kuziev I., Vakulenko R., Kulynych V., Malii K., Butenko E., Hrudkina N. et al. Technological and Chemical Drivers of Zinc Coating Degradation in DX51d+Z140 Cold-Formed Steel Sections. *Metals*. 2026. Vol. 16. Art. 146. DOI: 10.3390/met16020146

93. Турчин Р. В., Малій Х. В. Енергоефективні рішення транспортування рідкого чавуну в сучасному металургійному виробництві. *Current Issues in Science, Education, and Technology: From Theoretical Foundations to Practical Solutions of the 21st Century : Proceedings of the International Scientific and Practical*

Conference, Austin, USA, January 22, 2026. Austin : Golden Quill Publishing, 2026. P. 89–92. URL: <https://www.economics.in.ua/2026/01/22.html>

94. Кухар В. В., Мойсеєнко К. Є., Малій Х. В. Кластеризація партнерств університету як інструмент управління взаємодією в моделі «education–science–industry». *Економічний вісник Донбасу*. 2026. № 1 (83). С. 100–106. DOI: 10.12958/1817-3772-2026-1(83)-100-106

95. Kukhar V. V., Malii K. V., Mazuru S. G., Hrudkina N. S., Butenko E. O. Identification of Early Degradation Mechanisms in Zinc Coating on Cold-Formed Steel Sections Through Analysis of the Production–Storage Chain. In: Altenbach H., Gao X. W., Syngellakis S., Cheng A. H. D., Lampart P., Tkachuk A. (eds.). *Advances in Mechanical and Power Engineering III. CAMPE 2025*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham : Springer, 2026. DOI: 10.1007/978-3-032-16381-3_17.

96. Рой С. Ю., Малій Х. В. Сучасні технології виробництва окатишів та їх вплив на якісні показники. *Актуальні питання розвитку галузей науки : матеріали VII Міжнародної наукової конференції*, м. Біла Церква, 24 квітня 2026 р. Вінниця : ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2026. С. 181–184. ISBN 978-617-8582-38-8. DOI: 10.62731/mcnd-24.04.2026.

97. Мокрушина О. М., Малій Х. В. Безперервне лиття сталі як основа підвищення ефективності металургійного виробництва. *Пріоритетні напрямки та вектори розвитку світової науки : матеріали X Міжнародної студентської наукової конференції*, м. Кременчук, 24 квітня 2026 р. Вінниця : ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2026. С. 132–134. ISBN 978-617-8582-39-5. DOI: 10.62732/liga-inter-24.04.2026.

98. Chuprynov Ye. V., Kassim D. A., Hrybkov E. P., Malii Kh. V., Rekov Yu. V. Development of the Service for Calculating the Material and Thermal Balance of Steel Smelting. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, т. 1. С. 206–213. DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359809.

99. Малій Х. В. Сучасні підходи до підготовки фахівців у металургії. *Трансформаційні процеси та перспективи розвитку науки, освіти, суспільства*

та технологій в Україні та світі : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції, Кременчук, 1 травня 2026 р. Кременчук : ЦФЕНД, 2026. С. 65–66. URL: <https://www.economics.in.ua/p/achive.html>

100. Malii Kh., Chekhuta O. Approaches in Metallurgy: Integration of Innovation and Sustainable Development. *Progressive Approaches in Science and Engineering : Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference*. Copenhagen, Denmark, May 20–22, 2026. Copenhagen : International Scientific Unity, 2026. P. 822–824. ISBN 979-8-89704-979-0. DOI: 10.70286/ISU-20.05.2026

101. Письмарьов К. Є., Єфімова В. Г., Смірнов Ю. О., Малій Х. В. Оцінка розподілу неметалевих включень в сталевій продукції з використанням методу стереологічної реконструкції. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2026. № 7. С. 124–129. DOI: 10.32782/3041-2080/2026-7-15

102. Kukhar V. V., Vasylevskyi O. O., Shtuts A. V. Investigation of the Causes of Operational Breakdowns in Metallurgical Equipment and Vehicle Parts Produced by Open Die Forging. *Advanced and Novel Technologies—Interdisciplinary Collaboration in Materials Science (ANTICM 2025). Advances in Science, Technology & Innovation*. Cham : Springer, 2026. P. 171–178. DOI: 10.1007/978-3-032-00373-7_23

103. Gribkov E., Kukhar V., Dobronosov Y., Vishtak I. Numerical Modeling and Optimization of Technological Parameters for Rotary Forming of Vehicle Wheel Rims. In: Tonkonogyi V., Ivanov V., Luściński S., Trojanowska J., Oborskyi G. (eds.). *Advanced Manufacturing Processes VII. InterPartner 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham : Springer, 2026. P. 139–150. DOI: 10.1007/978-3-032-14926-8_12

104. Kukhar V., Chuprynov Y., Navolniev I., Belan E. Energy Implications of Switching to Surfactant-Modified Concentrate in Iron Ore Pellet Induration. *Key Engineering Materials*. 2026. Vol. 1043. P. 21–32. DOI: 10.4028/p-fi3lOq

105. Kukhar V., Tymoshenko D., Volovnenko I., Kurpe O., Pashynskyi V., Shaulska L. Comparison of Electricity Consumption in the Obsolete and Modern

Steelmaking Process: IOSP+BF+OHF vs Midrex+EAF. *2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, September 18–21, 2024. IEEE, 2026. P. 1–5. DOI: 10.1109/MEES64070.2024.11405399

106. Навольнєв І. Ю., Кухар В. В., Чупринов Є. В. Оцінка електроспоживання випалювальної машини залежно від властивостей шихти та застосування поверхнево-активних речовин. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2026. № 6. С. 115–124. DOI: 10.32782/3041-2080/2026-6-15

107. Кухар В. В., Спічак О. Ю. Регресійний аналіз накопичення механічних домішок у прокатних емульсіях та алгоритм прогнозування рівня їх забрудненості. *Метал та лиття України*. 2026. Т. 34, № 1. С. 75–85. DOI: 10.15407/steelcast2026.01.075

108. Бушуй Н. М., Кухар В. В. Обґрунтування проєкту модернізації ливарного виробництва шляхом переходу на холоднотвердіючі суміші на основі аналізу енергоємності та регресійного моделювання процесу формування. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2026. № 7. С. 101–110. DOI: 10.32782/3041-2080/2026-7-12

109. Kukhar V., Balalayeva E., Khliestov H., Khliestova O., Mazuru S. Analysis of Technological Regimes of Open-Die Forging with Model Development for Digital Systems of Metallurgical Production. *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Bucharest. Series D: Mechanical Engineering*. 2026. Vol. 88, Iss. 2. P. 227–240. URL:

https://www.scientificbulletin.upb.ro/static/pdfs/a2026nr2d_15_16859_ICAMaT_2025_Kukhar_Balayeva_Khliestov_Khliestova_Mazuru_kv_24-01-2026.pdf

110. Шаповал О. О., Вакуленко Р. А., Кузєв І. О., Кухар В. В. Модель динамічної взаємодії труби та трубної решітки. *Актуальні проблеми інженерної механіки : тези доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції*, Одеса, 20–22 травня 2026 р. Одеса : ОДАБА, 2026. С. 217–220. URL: <https://drive.google.com/file/d/1y8imChVQYdYOz39GVIAgdOtYGDIOHhwu/view>

111. Бушуй Н. М., Кухар В. В. Обґрунтування переходу від піщано-глинистих до холоднотвердіючих сумішей із застосуванням регресійного моделювання та аналізу енергоємності процесу формування. *Литво. Металургія. 2026 : матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво-2026» та XV Міжнародної науково-практичної конференції «Металургія-2026»*, Харків–Київ, 26–28 травня 2026 р. / за заг. ред. О. І. Пономаренка. Харків : НТУ «ХПІ», 2026. С. 44–46. ISBN 978-617-05-0618-4. DOI: 10.15407/foundry-metallurgy-2026

112. Спічак О. Ю., Кухар В. В. Вдосконалення конструкції промислової системи очищення прокатної емульсії та печей відпалу з метою підвищення якості поверхні холодного прокату. *Литво. Металургія. 2026 : матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво-2026» та XV Міжнародної науково-практичної конференції «Металургія-2026»*, Харків–Київ, 26–28 травня 2026 р. / за заг. ред. О. І. Пономаренка. Харків : НТУ «ХПІ», 2026. С. 485–486. ISBN 978-617-05-0618-4. DOI: 10.15407/foundry-metallurgy-2026

113. Залужна В. П., Кухар В. В. Удосконалення технології підготовки агломераційної шихти для підвищення якості агломерату. *Start in Science : студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей*. Одеса Олді+ 2025. С. 58–61.

114. Залужний С. О., Кухар В. В. Оцінка впливу методів підготовки агломераційної шихти на якість агломерату. *Start in Science : студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей*. Одеса Олді+ 2025. С. 62–65.

115. Цибульський П. Г., Кухар В. В. Аналіз напрямів ефективного використання металургійних відходів у процесі агломерації. *Start in Science : студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей*. Одеса Олді+ 2025. С. 89–92.

Додаток**ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ****ЗАТВЕРДЖУЮ**

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



Наталія РЕКОВА

«15» червня 2026 року

ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ

Результати виконання науково-дослідної роботи «Модернізація металургійних процесів і моделей управління їх ефективністю в умовах сталого розвитку» (№ держреєстрації 0125U003641). Етап 1: «Аналіз і оптимізація сучасних металургійних процесів та формування цифрових моделей прогнозування ефективності» що містять:

- рекомендації щодо підвищення енергоефективності виробництва залізрудних окатишів та удосконалення режимів роботи випалювальних машин;
- результати досліджень процесів термомеханічно контрольованої прокатки та рекомендації щодо вибору режимів гарячої прокатки плоского прокату;
- математичні моделі та алгоритми автоматизованого проектування режимів прокатки в еджерних валках;
- цифрові рішення для автоматизованого проектування калібрів валків і моделювання процесів сортової прокатки;
- результати досліджень неметалевих включень у сталях та рекомендації щодо підвищення якості металопродукції;
- методичні підходи до цифрового моделювання та прогнозування параметрів металургійних процесів,

використовуються у навчальному процесі кафедри металургії та інноваційних технологій ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» при викладанні освітніх компонентів:

- ОПП «Металургія чорних металів»: «Підготовка металургійної сировини», «Металургія чавуну», «Металургія сталі», «Проектування металургійних цехів», «Прокатне виробництво у чорній металургії», «Енерго- та ресурсозберігальні технології в промисловості»;
 - ОПП «Аглодоменне виробництво»: «Перспективи розвитку металургії та позадоменне отримання заліза», «Ресурсозаощаджувальні технології та рециклінг в аглодоменному виробництві», «Сучасні технології формування структури та властивостей матеріалів та продукції»;
 - ОПП «Сучасні технології прокатного виробництва»: «Теорія та практика прокатного виробництва», «Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному виробництві», «Сучасні техніко-технологічні аспекти прокатного виробництва», «Спеціальні прокатні стани»;
 - ОНП «Управління модернізацією металургії»: «R&D в управлінні металургійними проектами», «Перспективні технології та кращі практики модернізації металургії», «Проектування модернізованих металургійних виробництв», «Наукові основи розвитку кластерів чорної металургії та операційне вдосконалення виробництв»;
 - освітньо-наукова програма третього освітньо-наукового рівня «Металургія»: «Концептуальні основи наукового світогляду та методологія наукових досліджень», «Стратегічні напрямки досліджень та кращі практики в металургії», «Експериментальні дослідження фізико-хімічних процесів в металургії», «Математичне та комп'ютерне моделювання в металургії»;
- а також при підготовці кваліфікаційних робіт здобувачів освітніх ступенів «Бакалавр», «Магістр» та «Доктор філософії» за спеціальністю G10 «Металургія».

Завідувач кафедри
металургії та інноваційних технологій,
д.т.н., професор

Едуард ГРИБКОВ