

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Курпе Олександр Геннадійович



УДК 621.771.23 : 621.771.06-114 :
621.771.06-115 : 621.771.09 :
620.178.4/.6 : 620.186.5

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ
ПЛОСКОЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ З ОТРИМАННЯМ ПІДВИЩЕНОГО РІВНЯ
МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Кухар Володимир Валентинович
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (м. Маріуполь), завідувач кафедри «Обробка металів тиском»

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Грибков Едуард Петрович
Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ), завідувач кафедри «Автоматизовані металургійні машини і обладнання»

доктор технічних наук, професор
Максименко Олег Павлович
Дніпровський державний технічний університет (м. Кам'янське), завідувач кафедри «Обробка металів тиском»

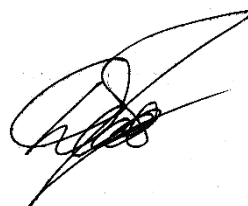
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Приходько Ігор Юрійович
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро), завідувач відділу процесів та машин обробки металів тиском

Захист відбудеться « 28 » квітня 2021 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус).

Автореферат розісланий « 26 » березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01



Ю.К. Доброносів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

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

З літературних джерел та виробничого досвіду відомі механізми впровадження технології ТМСП на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля. Але галузеве засвоєння технології ТМСП стримується через неповноту уявлень про механізми впливу режимів деформації на механізми еволюції та формування зеренної структури, керування розподілом деформації за товщиною прокату, механізми оцінки та забезпечення рівномірності розподілу температур в металі, що необхідно для забезпечення підвищеного рівня та стабільності розподілу механічних властивостей в прокаті. Відсутність та неповнота таких відомостей обмежує застосування процесів ТМСП у прокатці. Застосування такої технології потребує єдиних підходів до оцінки можливостей різних типів прокатних станів.

Тому робота, яка спрямована на розв'язання вищезазначеної проблеми шляхом розвитку наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей та розширенням сортаменту продукції, що виробляється, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з пріоритетними напрямками наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності на 2018-2020 роки ДВНЗ «ПДТУ»: «Проблеми розвитку металургії, машинобудування, енергетики та енергоефективності, архітектури та будівництва, економіки, права та соціально-гуманітарної сфери, ресурсозбереження та охорони навколишнього середовища»; «Нові речовини і

матеріали, нанотехнології: створення і освоєння нових технологій отримання, обробки, з'єднання, в тому числі, наплавлення і зварювання, конструкційних, функціональних і інструментальних матеріалів». Базовими для дисертації є науково-дослідницькі роботи: «Розвиток наукових і технологічних основ виробництва металопродукції підвищеної якості з листа та композитів спеціального призначення», (2017–2019 рр.), № ДР 0117U002269; «Розвиток теорії, дослідження та вдосконалення процесів пластичного деформування матеріалів», (2019 р.), № ДР 0118U006912; «Превентивне керування якістю металопродукції з листа та композитів для захисту спеціальної та броньованої техніки» (2020 р. – по тепер), № ДР 0120U102154. Автор дисертації – виконавець робіт.

Мета та завдання дослідження: Мета роботи полягає у розширенні сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей товстолистових, широкоштабових станів та станів Стеккеля на підставі розвитку наукових основ термомеханічної прокатки і розробки рекомендацій з удосконалення технологій, що враховують різний конструктивно-структурний склад основного прокатного устаткування.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і розв'язані задачі:

- проведення аналізу проблем, сучасних тенденцій і напрямків розвитку технології термомеханічної прокатки та відповідного устаткування для виробництва товстих листів та штаб в рулонах конструкційного та трубного призначення;
- систематизація технологічних етапів процесів термомеханічної прокатки в залежності від категорії міцності прокату та устаткування, що використовується;
- розвиток методу скінчених різниць щодо моделювання зміни температурного поля підкату, що охолоджується попереду термомеханічної прокатки, для визначення ділянок підстужування і розробка рекомендацій, що забезпечать зменшення градієнту температур по ширині штаби в умовах стану Стеккеля;
- аналіз впливу температурно-деформаційних режимів чорнової прокатки на формування рекристалізованого зерна аустеніту в умовах процесів ТМСП та встановлення закономірностей зміни розміру зерна аустеніту в залежності від ступеня деформації та температури і відповідно зміни опору деформації матеріалу, а також умов отримання якомога більш дрібного розміру зерна для успадкованого формування кінцевих механічних властивостей сталі категорії міцності Х65.
- розвиток методу фізичного моделювання для дослідження силових режимів прокатки сталей, що виробляються способом ТМСП, у лабораторних умовах і визначення температурно-деформаційних меж їх застосування;
- вивчення закономірностей впливу температурно-деформаційних умов процесу прокатки на підвищення рівномірності розподілу деформації по товщині підкату;
- рекомендації щодо розробки та впровадження технологічних процесів виробництва товстолистового та штабового прокату підвищеної міцності, що виготовляється термомеханічною прокаткою із урахуванням технічних характеристик та складу основного устаткування;
- розробка рекомендацій для промислового впровадження методологій керування якістю, освоєння нового сортаменту та технологічної стратегії;

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

Об'єкт дослідження. Технології та устаткування для термомеханічної прокатки товстолистового та рулонного прокату.

Предмет дослідження. Закономірності впливу складу технологічного устаткування та режимів термомеханічних процесів прокатки на формування підвищеного рівня механічних властивостей плоского прокату.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях теорії обробки металів тиском (ОМТ), теорій теплопровідності, теплопереносу, теорій фазових перетворень. Експериментальні та промислові дослідження включали методи фізичного моделювання, планування експерименту, визначення механічних властивостей, металографії та виконані з використанням устаткування й вимірювальних пристроїв, що пройшли метрологічний контроль. При проведенні досліджень також було використано методи скінчених елементів, скінчено-різницевої метод, результати експериментів оброблені за допомогою методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів.

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

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

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

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

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

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

Практичне значення отриманих результатів. Практичну цінність становлять:

- методика визначення значень технологічних факторів, що впливають на механічні властивості металопродукції, їх контроль і механізм корегування;
- аналітичні моделі розрахунку зміни температурних параметрів прокатки для безперервних станів з використанням установок CoilBox та станів Стеккеля з пічними моталками.
- математична модель розрахунку зміни температурного поля штаби при режимах ТМСР, яка охолоджується після пічної моталки на стані Стекеля та запропоновані рекомендації щодо коригування розподілу температур по ширині штаби;
- рекомендації з вибору температурно-деформаційних умов чорнової термомеханічної прокатки низьковуглецевої мікролегованої сталі 06Г2ДБ (Х65) трубного призначення, які забезпечують отримання якомога меншого успадкованого розміру зерна аустеніту;
- запропоновані схеми обтиснень та температурні режими чорнової прокатки конструкційної марки сталі S355JR+AR в умовах стану Стеккеля, що забезпечують зменшення нерівномірності деформації по товщині підкату;
- розроблені режими контрольованого повітряного охолодження рулонного прокату, що забезпечують зниження товщини повітряної окалини, яка утворюється після термомеханічної прокатки;
- рекомендації з розробки та вдосконалення технології термомеханічної прокатки на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля;
- рекомендації з удосконалення проектів реконструкції та модернізації прокатного устаткування широкоштабових станів для забезпечення виробництва термомеханічного прокату підвищеної міцності.

Теоретичні та експериментальні результати розробок використані в умовах: «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА» (технологічне завдання (ТЗ) ТЗ-ЦЛМК-№33/16-2Пр1 від 05.04.2016), (ТЗ-ЦЛМК-№59/16-2-Пр1 від 29.06.2016), (акт №1/216 від 19.08.2016), (акт №9 від 24.10.2017); «МК «АЗОВСТАЛЬ» (вимоги до виробництва продукції ТПП 232-39-2011 від. 01.07.2011); заводів Trameal (Італія) і Ferriera Valsider (Італія) (протокол від 29.10.2010). Матеріали роботи, технологічні рішення та рекомендації застосовані у навчальному процесі (довідка від 25.09.2020) та науково-дослідницьких роботах кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «ПДТУ» (акт від 23.09.2020).

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримані автором самостійно. При проведенні досліджень автором здійснені: обґрунтування мети роботи, розробка основних ідей і методик досліджень, постановка і рішення задач дисертаційної роботи; вдосконалення математичної моделі та дослідження зміни розподілу температури по ширині штаб; розробка залежностей та дослідження впливу температурно-деформаційних параметрів на розмір зерна аустеніту та опір деформації мікролегованих сталей групи міцності Х65, розробка залежностей для фізичного моделювання процесів ТМСР; розробка методики для оцінки рівномірності проникнення деформації по товщині прокату; розробка залежностей для розрахунку зміни температури металу в установці CoilBox та пічних моталках; розробка

комплексу аналітичних моделей для розрахунку технологічних параметрів прокатки на товстолистових, ширококутових та станах Стеккеля. Автор планував та проводив експериментальні дослідження, виконував обробку та аналіз отриманих результатів, розробив технологічні процеси виробництва прокату на товстолистових, ширококутовому та стані Стеккеля, виконував розрахунки технічних параметрів устаткування стану 1700, яке необхідно реконструювати, для впровадження технології ТМСР, приймав активну участь у впровадженні результатів роботи у виробництво. Особистий внесок здобувача в працях, що опубліковані у співавторстві, викладено після списку робіт за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях та семінарах серед яких: Міжнародна конференція (МК) ФДУП «ЦНДІЧормет імені І.П. Бардина» «Сучасні тенденції розробки та виробництва сталей і труб для магістральних газів та нафтопроводів» (Москва, 2008 р.), очна форма участі, з доповіддю; Міжнародна науково-технічна конференція (МНТК) «Університетська наука – 2009–2012, 2014–2020» (Маріуполь, 2009–2012 рр., 2014–2020 рр.), очна форма участі, з доповіддю; VIII Конгрес прокатників (Магнітогорськ, 2010 р.), очна форма участі, з доповіддю; 9 Міжнародна технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти» (Київ, 2018 р.), заочна форма участі; IV МНТК «Машини і пластична деформація металу» (Кам'янське, Дніпро, 2018 р.), заочна форма участі; Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-хімічні геотехнології» (Дніпро, 2018 р.), заочна форма участі; Наукова конференція «Сучасні технології в механіці» (Хмельницький, 2018 р.), заочна форма участі; I МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (Вінниця, 2019 р.), заочна форма участі; X МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ-Херсон, 2019 р.), заочна форма участі; XI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (Харків, 2019 р.), заочна форма участі; 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing «The Innovation Exchange» (Lutsk, Ukraine, 2019 р.), очна форма участі, з доповіддю; дисертацію докладено в повному обсязі на XXIII МНТК «Досягнення та проблеми розвитку технології і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2020 р.), на науковому семінарі кафедри обробки металів тиском (ОМТ) ДВНЗ «ПДТУ» (Маріуполь, 2020 р.), а також на засіданні Придніпровського наукового семінару при кафедрі ОМТ НМетАУ (2020 р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 79 роботах, з яких 33 статті опубліковано в журналах і збірниках наукових праць, з них 7 статей в міжнародних наукових журналах, які входять до бази даних Scopus, 23 статті у наукових фахових виданнях України, 3 статті у виданнях, що не входять до переліку фахових, в тому числі 2 статті у зарубіжних виданнях; 27 робіт опубліковано в матеріалах та тезах міжнародних конференцій. Матеріали досліджень і розробок опубліковані також в 1 монографії та 3-х колективних монографіях, отримано 3 патенти України на винахід та 12 патентів України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 7 розділів, висновки, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 534 сторінки машинописного тексту, з них 272 сторінки основного тексту, 125 рисунків та 103 таблиці, в тому числі 24 рисунки та 11 таблиць розташовані на окремих 35 сторінках, список використаної літератури з 273 найменувань на 35 сторінках, анотації та 28 додатки, що знаходяться на 156 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, відзначено її зв'язок із науковими темами, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок, апробацію результатів дисертації та висвітлення у друкованих працях.

У першому розділі на основі літературних джерел проведено аналіз розвитку ТМСП процесу. Наведено перелік переваг цієї технології, комплекс яких забезпечує більш високі споживчі властивості одержуваної продукції. Відзначено сучасні напрямки та напрямки подальшого розвитку технології ТМСП. Виконано порівняльний аналіз вимог поширених стандартів з виробництва прокату. Показано, що технологія ТМСП за рахунок особливого хімічного складу та термомеханічних режимів забезпечує можливість виробництва більш широкого сортаменту, має більший комплекс властивостей, які характеризують якість і межі його застосування.

Зроблено оцінку сучасного стану та виконано порівняльний аналіз технології, устаткування та сортаменту, що виробляється на станах України та фірм, що працюють в кооперації з ними, у тому числі на товстолистових стані 3000 ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА», стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», стані 3200 заводу Trameal, Італія; широкоштабових станах, у тому числі на стані 1700 ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА», стані 1680 МК «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» та стані Стеккеля заводу Ferreira Valsider, Італія. Формалізовано сучасні тенденції вдосконалення прокатного устаткування по типах станів для виробництва продукції способом ТМСП. Виконано аналіз впливу кожного етапу технології ТМСП на подальше формування мікроструктури та механічні властивості прокату. Визначено, що при розробці технології ТМСП необхідно враховувати склад та параметри технологічного устаткування, від цього залежить комбінація технологічних операцій.

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямків досліджень, прийнятих методів та методик теоретичних й експериментальних досліджень термомеханічних процесів прокатки. Виконано систематизацію технологічних етапів процесів ТМСП починаючи від розробки хімічного складу і закінчуючи остаточним охолодженням прокату, окремо для товстолистого та рулонного прокату, з урахуванням категорії міцності, що дозволяє генерувати нові комбінації в залежності від складу устаткування та необхідного сортаменту прокату. Суть комбінування технологічних операцій при термомеханічній прокатці полягає у виборі на кожному етапі технології варіанту, який забезпечить отримання необхідного рівня температурних і деформаційних умов прокатки для сортаменту відповідної категорії міцності.

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

різниць). Суть методу полягає в розділенні дослідного матеріалу, в нашому випадку це підкат, на елементарні шари вздовж ширини, а час охолодження - на елементарні відрізки часу, по яких і виконуються розрахунки з урахуванням теплофізичних властивостей матеріалу по кожному шару. Метод скінчених елементів (МСЕ) необхідний для дослідження процесів пластичного деформування металів та визначення температурно-деформаційних умов, які забезпечують отримання необхідної рівномірності розподілу механічних властивостей по товщині термомеханічного прокату, що будуть успадковані. Метод математичної фізики застосовували в дослідженні рекристалізаційних процесів при термомеханічній прокатці для інтерполяції даних по розміру зерна аустеніту, з метою вивчення впливу температурно-деформаційних умов на формування розміру зерна аустеніту. Комплексне дослідження силових процесів прокатки на свинцевих зразках з встановленням переліку марок сталей-аналогів та температурно-деформаційних умов їх застосування виконано шляхом поєднання методів фізичного моделювання, подоби та методу аналогій. Експериментальні дослідження з встановлення реологічних властивостей свинцю виконано в лабораторних умовах шляхом осаджування зразків на гідравлічній універсальній випробувальній машині моделі Р-20. Експериментальні промислові дослідження проводилися в умовах діючого прокатного виробництва на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», «МК «АЗОВСТАЛЬ», заводі Trametel та Ferriera Valsider.

У третьому розділі виконано теоретичні дослідження процесів зміни температурного поля штаби та процесів рекристалізації для керування механічними властивостями в умовах термомеханічного процесу прокатки.

В роботі шляхом математичного моделювання методом елементарних теплових балансів вдосконалено модель зміни температурного поля штаби, що охолоджується, шляхом врахування впливу конвекційного механізму теплопередачі. Кількість елементарних проміжків $\Delta\tau$, на які розбивали час від закінчення нагрівання заготовки до початку її деформування τ : $M = \frac{\tau}{\Delta\tau}$. Формула для розрахунку температури довільного проміжного (i – го) шару заготовки:

$$t_{i,j-1} = t_{i,j} + Fo_{\Delta x}(t_{i-1,j} - 2t_{i,j} + t_{i+1,j}) - Fo_{\Delta x} \cdot \frac{\sigma \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} \cdot \left[(t_{i,j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - Fo_{\Delta x} \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} (t_{i,j} - 20), \quad (1)$$

де $t_{i,j}$ – температура довільного шару в будь-якому проміжку часу, °С, i – номер довільного шару, j – номер проміжку часу; $Fo_{\Delta x} = a_m \cdot \Delta\tau / \Delta x^2$ – критерій Фур'є для елементарного об'єму шириною Δx ; коефіцієнт температуропровідності a_m , м²/с, матеріалу визначається як: $a_m = \lambda / \rho_3 \cdot c$; λ – коефіцієнт теплопровідності для матеріалу штаби при заданих умовах, Вт/м·град; ρ_3 – щільність сталі при заданій температурі, кг/м³; c – теплоємність матеріалу при заданій температурі, Дж/(кг·град); $\sigma = \varepsilon_{ст} \sigma_0$ – коефіцієнт випромінювання чорного тіла, де $\varepsilon_{ст} = 0,8$ – ступінь чорноти штаби, $\sigma_0 = 5,77 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·град⁴) – постійна Стефана–Больцмана для абсолютно чорного тіла; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); $B_0 = 2B_{0n}$ – половина ширини штаби, де B_{0n} – відстань між віссю та крайкою підкату.

Температура елементарного об'єму з порядковим номером $i = 1$ визначається як:

$$t_{1;j-1} = t_{1;j} + 2 \cdot Fo_{\Delta x} (t_{2;j} - t_{1;j}) - \sigma \cdot Fo_{\Delta x} \cdot \Delta x^2 \frac{[(t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4]}{\lambda B_0} - Fo_{\Delta x} \cdot \Delta x^2 \cdot \alpha \frac{(t_{1;j} - 20)}{\lambda B_0}. \quad (2)$$

Температура для шару на крайці з порядковим номером $i = N$ визначається як:

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + Fo_{\Delta x} \left\{ (t_{N;j} - t_{N+1;j}) - \frac{\Delta x \cdot (\Delta x + B_0)}{\lambda \cdot B_0} \left(\sigma \cdot [(t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4] - \alpha \cdot (t_{N;j} - 20) \right) \right\}. \quad (3)$$

Для розрахунку в математичній моделі теплофізичних властивостей вуглецевого та низьковуглецевого прокату отримано наступні залежності: а) середня теплоємність сталі, c при $t=100-800$ °C $c = 0,4556e^{0,0005t}$, при $t > 800$ °C до 1300 °C $c = -3 \times 10^{-5}t + 0,7211$; б) коефіцієнт теплопровідності, λ при $t=100-900$ °C $\lambda = -0,0363t + 59,381$, при $t > 900$ °C до 1200 °C $\lambda = 20,848e^{0,0003t}$.

Опробування розробленої математичної моделі виконано для умов стану Стеккеля: матеріал штаби – сталь групи міцності X65 відповідно до вимог стандарту API-5L; розміри штаби: товщина – $h_0 = 40$ мм, ширина – $B_0 = 2B_{on} = 1510$ мм; температура нагрівання штаби в пічній моталці $t = 825$ °C; час між виходом штаби з пічної моталки до початку її прокатування = 8 с. Результати моделювання наведено на рис. 1.

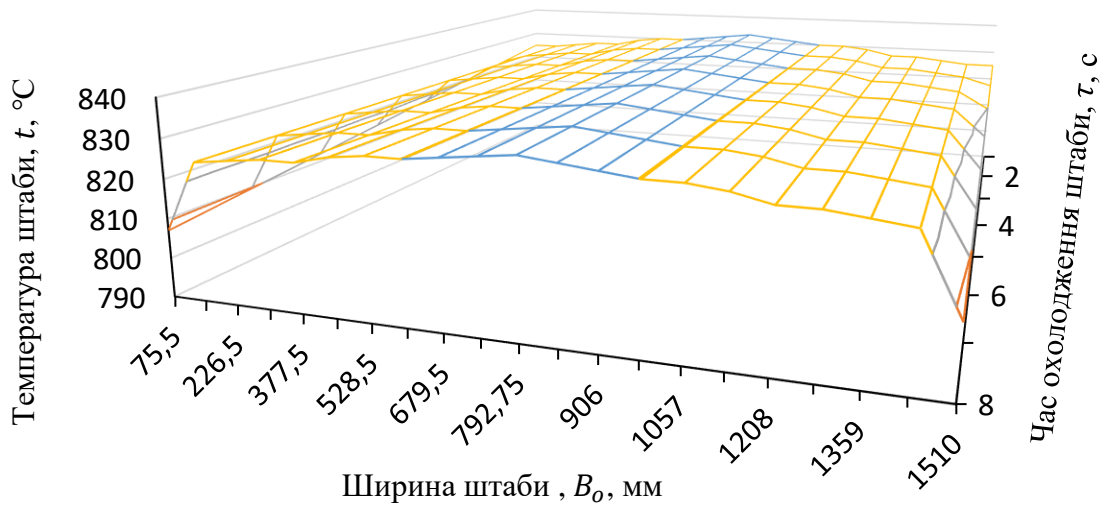


Рис. 1. Моделювання зміни температури штаби за режимами ТМСР

Встановлено, що перед третім проходом різниця між температурою в середині ширини штаби та на крайці збільшується до 44 °C, це перевищує 25 °C, встановлені для виконання процесу ТМСР. Розроблено рекомендації щодо мінімізації розподілу температури по ширині штаби та відповідного зменшення його впливу на механічні властивості готового прокату. Виконано оцінку впливу конвекції при моделюванні зміни розподілу температури штаби по ширині, який за режимами ТМСР для температур 790-830 °C на крайці становить 93 %, рис. 2, по гарячекатаних режимах для температур 1050-1100 °C становить 1 %, рис. 3, що обґрунтовує напрямок вдосконалення математичної моделі.

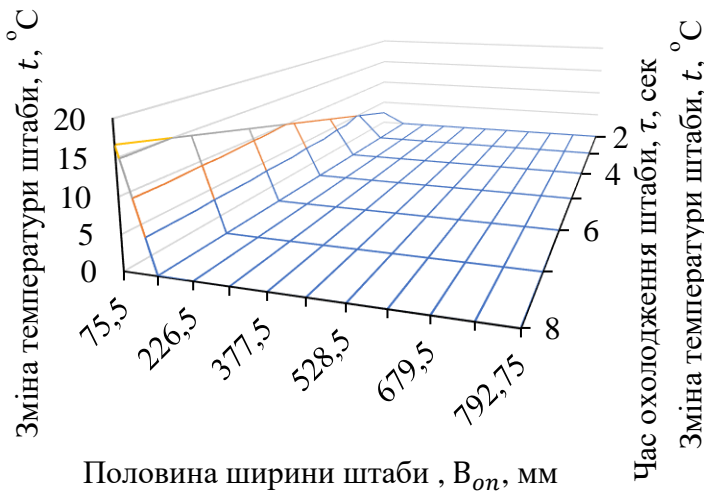


Рис. 2. Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби за режимами ТМСР

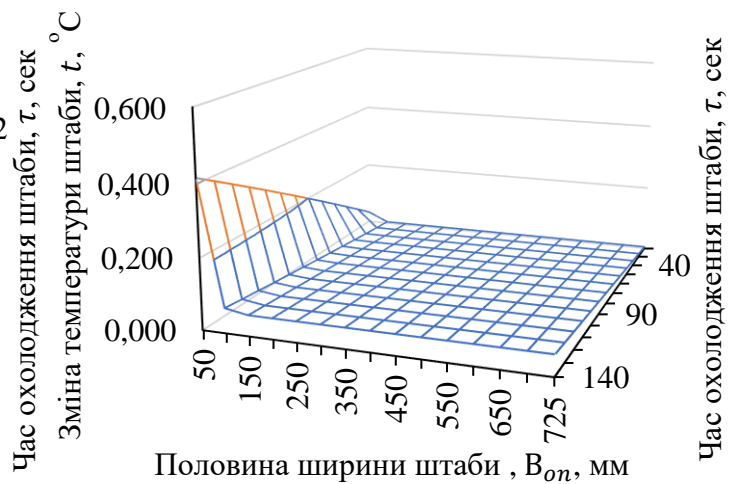


Рис. 3. Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби за режимами гарячої прокатки

З метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту в прокаті на етапі проектування технології ТМСР використано методику та програмне забезпечення в пакеті Borland C ++ Builder 4 (програма «Recrystallization») для обробки та аналізу діаграм рекристалізації з використанням співвідношень Холла-Петча. Межі застосування програмного забезпечення – низьковуглецеві марки сталі.

Виконано дослідження процесів рекристалізації низьколегованої маловуглецевої сталі марки 06Г2ДБ (Х65), яка виробляється способом ТМСР, шляхом обробки дослідних даних, з метою встановлення межі деформації, яка забезпечує цільове зменшення аустенітного зерна. В дослідженні виконано поєднання дослідних даних авторів по розміру зерен аустеніту при температурі 1050 °С, яка передує температурі початку гальмування рекристалізації, та ступені деформації 0,1- 0,7 відн. од. з результатами пластометричних досліджень сталі категорії міцності Х70, яка є наближеним аналогом до сталі марки 06Г2ДБ (Х65). Для розрахунку опору деформації сталі категорії міцності Х70 використовували вдосконалену залежність:

$$\sigma_{t(X70)} = 3661,2 \exp(-0,0047t) \times (0,1126 \ln(\varepsilon) + 0,9543) \times (2,1583u^{0,126}) \times (0,1344 \exp^{0,0021t}), \quad (4)$$

де t – температура деформації, °С; ε – ступінь деформації, %; u – швидкість деформації, s^{-1} , множник $(0,1344 \exp^{0,0021t})$ є фактором спадковості K_n та характеризує вплив властивостей, що успадковані з попередніх процесів обробки металу (аустенізація, природне та примусове охолодження перед прокаткою).

Отримано залежність (5) площі зерен аустеніту від ступеня деформації сталі категорії міцності Х65, рис. 4.

$$S = 391,94 \times \varepsilon^{-0,709}, \quad (5)$$

де ε – ступінь деформації, відн. од.

Визначення опору деформації в залежності від діаметру зерна аустеніту виконували з використанням співвідношення Холла-Петча, яке має наступний вигляд: $\sigma_T = \sigma_0 + k/\sqrt{D}$, де σ_0 – напруження, яке характеризує опір пластичної деформації з боку кристалічної решітки, МПа; k – коефіцієнт, який характеризує внесок в зміцнення з боку границь зерен; D – діаметр зерна аустеніту, мкм.

Шляхом поєднання результатів розрахунків за формулами (4) та (5), виконаних при однакових температурно-деформаційних умовах, отримано наступні показники, для адаптації співвідношення Холла-Петча до розрахунку опору деформації сталі категорії міцності Х65: $\sigma_0 = 48,383$ МПа, $k = 257,19$ МПа \times мкм^{-1/2} (рис. 5). На підставі отриманих результатів виконано розрахунок опору деформації сталі категорії міцності Х65 в залежності від розміру зерна аустеніту по всьому діапазону досліджених даних, результати наведені на рис. 6. В нашому випадку опір деформації $\sigma_t = \sigma_T$.

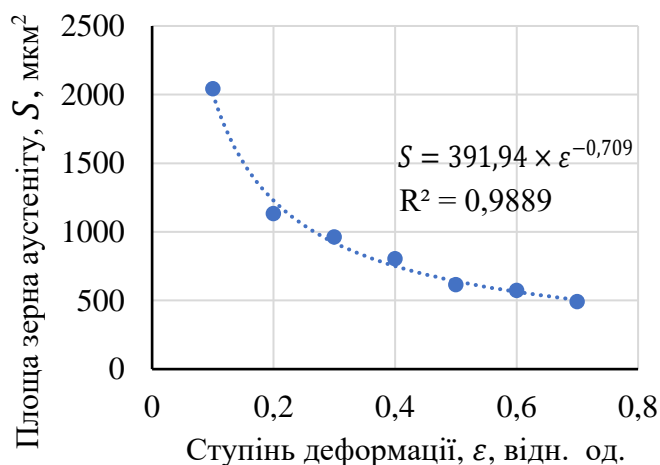


Рис. 4. Залежність площі зерна аустеніту від ступеня деформації сталі категорії міцності Х65

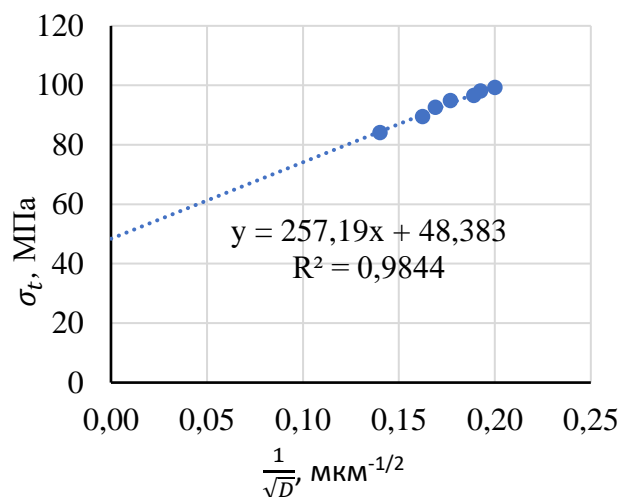


Рис. 5. Залежність σ_t від $\frac{1}{\sqrt{D}}$ для розрахунку показників σ_0 та k

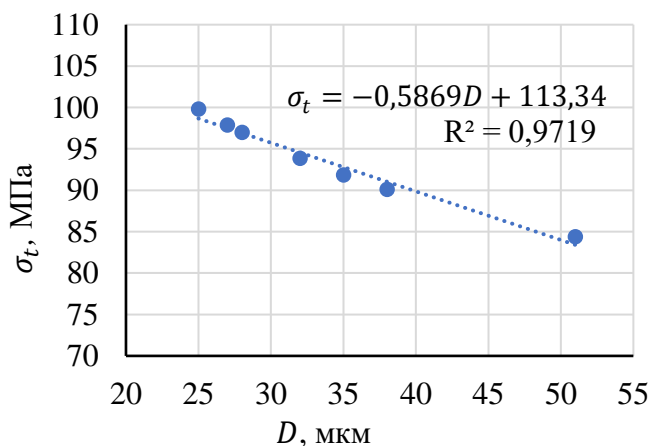


Рис. 6. Залежність σ_t , від діаметру зерна аустеніту

Отримана аналітична залежність для розрахунку опору деформації сталі категорії міцності Х65 має наступний вигляд:

$$\sigma_t = -0,5869D + 113,34. \quad (6)$$

Визначено, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту сталі категорії міцності Х65 при чорновій прокатці, в дослідженому діапазоні, відбувається при деформації від 10 % до 20 %, тобто з 51 мкм до 38 мкм, що становить 50 %.

Встановлено, що при чорновій прокатці мікролегованих марок сталі, зокрема сталі марки 06Г2ДБ (Х65), ступінь деформації за прохід повинен бути ≥ 20 %. Така деформація забезпечує отримання більш дрібного розміру зерна аустеніту. Раніше вважалось, що при схожих умовах достатньо деформації у 10 %.

В четвертому розділі на підставі проведеного експерименту зі стиснення зразків встановлено опір деформації свинцю, який є основним модельним матеріалом

для сталі в гарячому стані, при швидкості деформації $u = 1 \text{ c}^{-1}$, ступені деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. Визначено перелік марок сталі (сплаву) та температурно-деформаційні умови, при яких вони є більш наближеними за опором деформації до свинцю, рис. 7. Отримано поліноміальні залежності 4-го рівня істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю (7) та марок сталі (сплаву)-аналогу (8)-(14) з відповідною величиною вірогідності апроксимації R^2 . Розраховано коефіцієнти пропорційності як співвідношення відповідних коефіцієнтів регресії в залежності істинного опору деформації аналога та в залежності істинного опору деформації свинцю, табл. 1, які дозволяють перераховувати результати експериментів зі свинцем на відповідну марку сталі (сплав)-аналог за умовами прокатки: температура деформації $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, швидкість деформації $u = 1 \text{ c}^{-1}$, ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

$$\sigma_{Pb} = -3059,9x^4 + 4073,8x^3 - 1832x^2 + 321,82x - 0,1057; R^2 = 0,992. \quad (7)$$

$$\sigma_{X18M\Phi T} = -4696x^4 + 6004,8x^3 - 2647,8x^2 + 474,28x + 0,1175; R^2 = 0,996. \quad (8)$$

$$\sigma_{15X25T} = -5378,2x^4 + 6870,1x^3 - 3022,6x^2 + 537,27x + 0,1351; R^2 = 0,996. \quad (9)$$

$$\sigma_{DD11} = -6445,7x^4 + 8308,4x^3 - 3722,3x^2 + 706,37x + 0,1572; R^2 = 0,998. \quad (10)$$

$$\sigma_{65\Gamma} = -6026x^4 + 7796,2x^3 - 3529,2x^2 + 694,54x + 0,1448; R^2 = 0,998. \quad (11)$$

$$\sigma_{X80} = -8385x^4 + 10783x^3 - 4811,5x^2 + 891,99x + 0,2053; R^2 = 0,997. \quad (12)$$

$$\sigma_{X70} = -9558,6x^4 + 12251x^3 - 5427,5x^2 + 984,91x + 0,2371; R^2 = 0,996. \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{СтЗсп}} = -8411,1x^4 + 10835x^3 - 4857x^2 + 921,64x + 0,2051; R^2 = 0,998. \quad (14)$$

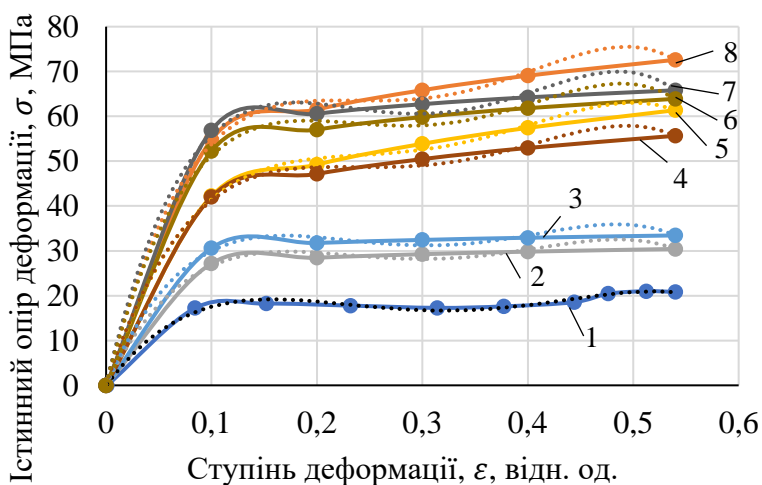


Рис. 7. Порівняння кривих зміцнення свинцю при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (1) та марок сталі (сплавів)-аналогів 0X18MФТ (2), 15X25T (3), DD11 (4), 65Г (5), X80 (6), X70 (7), СтЗсп (8) при температурі $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, пунктиром вказані лінії тренду

Таблиця 1
Розраховані коефіцієнти пропорційності для марок сталі (сплаву) - аналогів

Марка сталі (сплав)-аналог	Коефіцієнт пропорційності n_i , для відповідного коефіцієнту поліному				
	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4
0X18MФТ	1,535	1,474	1,445	1,474	-1,112
15X25T	1,758	1,686	1,650	1,669	-1,278
DD11	2,107	2,039	2,032	2,195	-1,487
65Г	1,969	1,914	1,926	2,158	-1,370
X80	2,740	2,647	2,626	2,772	-1,942
X70	3,124	3,007	2,963	3,060	-2,243
СтЗсп	2,749	2,660	2,651	2,864	-1,940

Розширено можливості фізичного моделювання, на підставі виконання додаткової оцінки впливу ступеня деформації на істинний опір деформації марок сталі (сплаву)-аналогів при температурах від $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, (рис. 8, аналогічну

оцінку виконано по всіх марках сталей-аналогів), та введено коефіцієнт зміни істинного опору деформації K_σ .

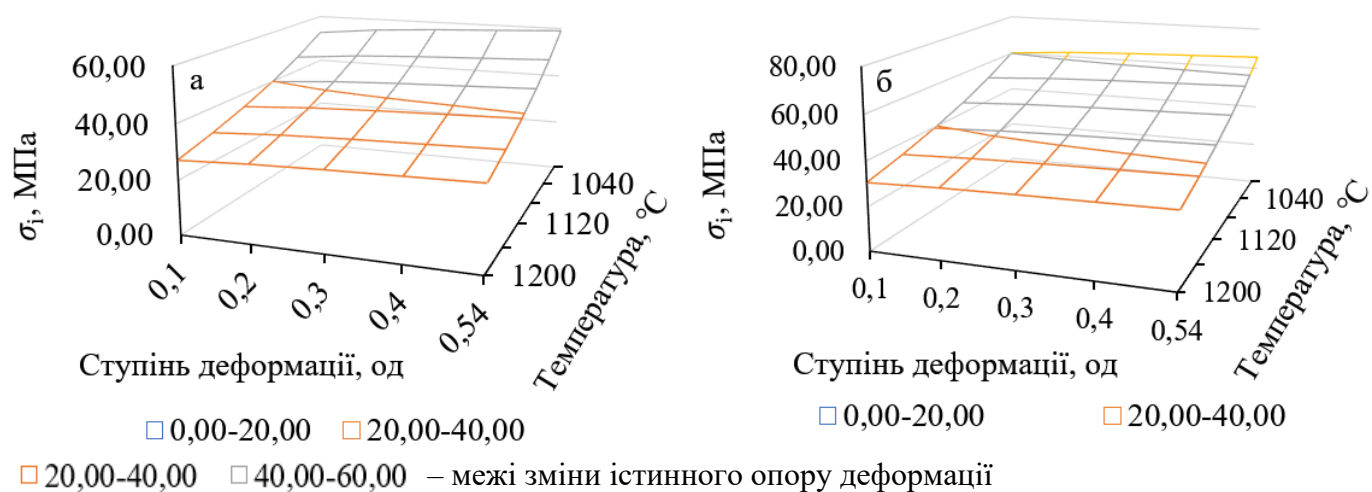


Рис. 8. Зміна істинного опору деформації при різних температурно-деформаційних параметрах за результатами розрахунків сплаву 0X18MTФ (а), марки сталі 15X25T (б)

Для кожної з марок сталі (сплаву)-аналогів отримано залежності для розрахунку K_σ :

$$\text{для сплаву 0X18MTФ: } K_\sigma = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,64}; R^2 = 1, \quad (15)$$

де t - температура деформації, °C; R^2 - величина вірогідності апроксимації.

$$\text{для сталі марки 15X25T: } K_\sigma = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,7}; R^2 = 1. \quad (16)$$

$$\text{для сталі марки DD11: } K_\sigma = 2 \times 10^{10} \times t^{-3,33}; R^2 = 1. \quad (17)$$

$$\text{для сталі марки 65Г: } K_\sigma = 2 \times 10^9 \times t^{-3,02}; R^2 = 1. \quad (18)$$

$$\text{для сталі категорії міцності X80: } K_\sigma = 3 \times 10^{11} \times t^{-3,703}; R^2 = 0,999. \quad (19)$$

$$\text{для сталі категорії міцності X70: } K_\sigma = 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}; R^2 = 0,9993. \quad (20)$$

$$\text{для сталі марки СтЗсп: } K_\sigma = 7 \times 10^7 \times t^{-2,54}; R^2 = 1. \quad (21)$$

Розраховані коефіцієнти пропорційності та отримані рівняння K_σ при сумісному застосуванні дозволяють моделювати процеси прокатки та перераховувати результати експериментів зі свинцем на сплав 0X18MTФ та марки сталі 15X25T, DD11, 65Г, X80, X70, СтЗсп при наступних умовах: температура деформації 1200-1000 °C, швидкість деформації $u = 1 \text{ c}^{-1}$, ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од. Дані умови відповідають параметрам гарячої прокатки в чорнових клітках товстолистових та широкоштабових станів, що дозволяє використовувати отримані результати у подальшому дослідженні процесів прокатки.

Виконано перевірку адекватності отриманих залежностей шляхом порівняння розрахованої з використанням вдосконаленої аналітичної моделі сили прокатки з фактичною, отриманою по проходах при чорновій прокатці товстих листів на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», зі сталі категорії міцності X70 з розмірами слябу 300×1850×3003 мм, кінцеві розміри прокату 17,5×3268×12200 мм. Середня похибка становить 11,6 %, що є задовільним рівнем. Підтверджено можливість використання отриманих даних по марках сталі (сплаву)-аналогу для подальшого фізичного моделювання силових параметрів процесів гарячої прокатки.

У п'ятому розділі досліджено процес гарячої прокатки на стані Стеккеля шляхом моделювання МСЕ в системі Abaqus CAE. В якості матеріалу дослідження використано сляб зі сталі марки S355JR+AR згідно з вимогами EN 10025-2, з розмірами 220×1520×9800 мм, з якого прокатувався рулон розмірами 15×1500 мм. За результатами моделювання отримано розрахунки полів еквівалентних напружень S , еквівалентної пластичної деформації PEEQ, сили прокатки Force та моменту прокатки Moment по проходах в кліті стану 3170 (чорнова кліть дуо) та в кліті стану 1780 (чистова кліть кварто з пічними моталками).

Встановлено, що при моделюванні режимів прокатки сталі марки S355JR+AR в кліті стану 3170, рівномірність проникнення еквівалентних напружень по товщині заготовки на рівні 90 % від максимального їх рівня спостерігається починаючи з шостого проходу, рис. 9, в якому починає формуватися суцільний шар або поле напружень, при інших відповідних умовах прокатки. Фактор форми $l_d/h_{cp}=0,83$ (l_d та h_{cp} – довжина дуги та середня висота осередку деформації). При подальшій прокатці, в наступних проходах, відбувається збільшення довжини цього суцільного поля напружень разом зі збільшенням величини еквівалентної пластичної деформації.

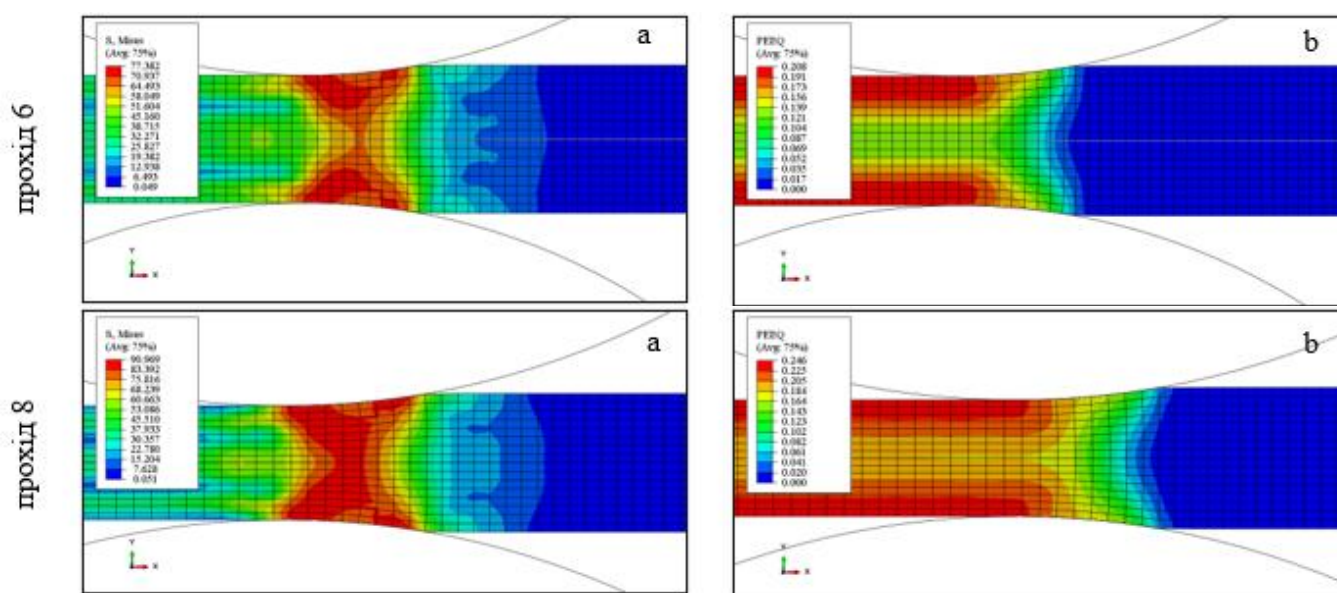


Рис. 9. Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а) та еквівалентної пластичної деформації (б) по проходах на стані 3170

В проході 8, див. рис. 9, вже спостерігається формування суцільного шару з максимального напруження з подальшим його розширенням та змішуванням з шаром напружень, який дорівнює 90 %, з урахуванням розмірів осередку деформації. Фактор форми l_d/h_{cp} становить 1,13. Встановлено, що при моделюванні режимів прокатки сталі марки S355JR+AR в кліті стану 1780, по всіх трьох проходах спостерігається рівномірне проникнення еквівалентних напружень на всю глибину заготовки по товщині при інших відповідних умовах прокатки, рис. 10. Еквівалентна деформація на виході з осередку деформації по шарах є майже однаковою по всій товщині прокату. Фактор форми l_d/h_{cp} по проходах становить 2,09-1,83-2,01 відповідно.

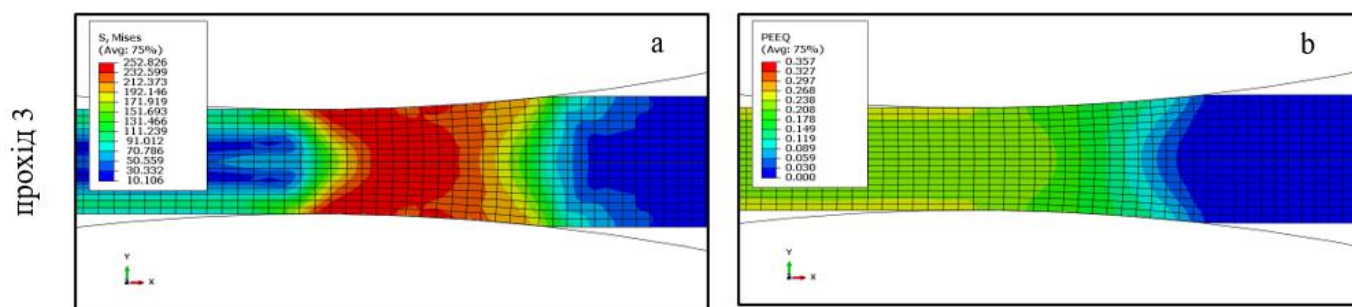


Рис. 10. Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а) та еквівалентної пластичної деформації (б) по проходах на стані 1780 (Стеккеля)

Виконано порівняння результатів розрахунку сили прокатки по проходах, отриманих за допомогою МСЕ в системі Abaqus CAE та вдосконаленої аналітичної моделі з фактичними результатами прокатки рулонів на стані Стеккеля, рис. 11.

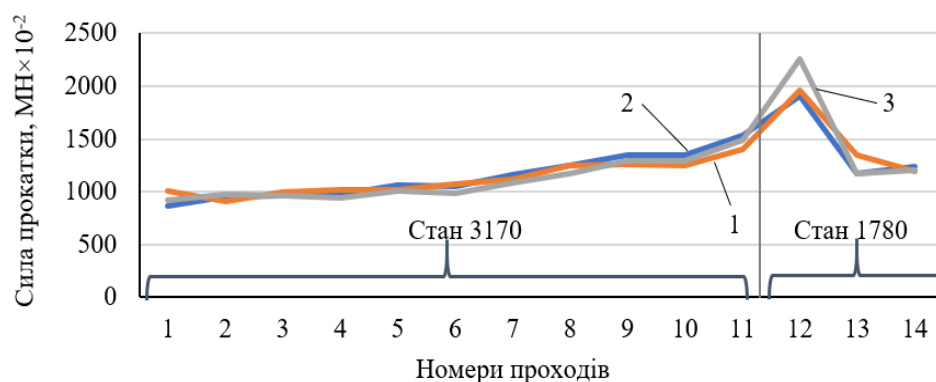


Рис. 11. Зміна сили прокатки по проходах по фактичних даних (1), по аналітичних розрахунках (2), по результатах математичного моделювання (3)

Для дослідженого сортаменту середнє значення отриманих відхилень за моделями сили прокатки, для стану 3170 не перевищує 1,54 %, а для стану 1780 не перевищує -1,77 %.

Запропоновано визначення аналітичним методом умов прокатки,

які забезпечують рівномірність розподілу еквівалентних напружень та еквівалентної деформації по товщині, що виражена коефіцієнтом $K_{нд}$, на рівні 90 %, та характеризує проникнення максимального еквівалентного напруження та еквівалентної деформації в центральну частину заготовки, для умов прокатки на стані 3170 та 1780, рис. 12.

Встановлено, що отримання коефіцієнту $K_{нд}$ на рівні 90 % для еквівалентного напруження в центральній частині заготовки забезпечується при ступені деформації 14 %, що відповідає деформації в 6 проході чорнової кліти стану Стеккеля. Рівномірність проникнення еквівалентної деформації $K_{нд}$, яка дорівнює 90 %, по перерізу заготовки, забезпечується при ступені деформації 20 %, що відповідає деформації в 11 проході чорнової кліти стану Стеккеля, рис. 13. Таким чином встановлено деформаційні умови при чорновій прокатці, які забезпечують покращення параметрів якості по перерізу в кінцевому прокаті та знаходяться в межах від 14 % до 20 %. При чистовій прокатці на стані 1780, по всіх проходах в умовах квазістаціонарного розподілу температур на стані Стеккеля деформація, яка відбувається, є достатньою для забезпечення рівномірності розподілу коефіцієнту $K_{нд}$ еквівалентних напружень та еквівалентної деформації на рівні 90 %, рис. 14.

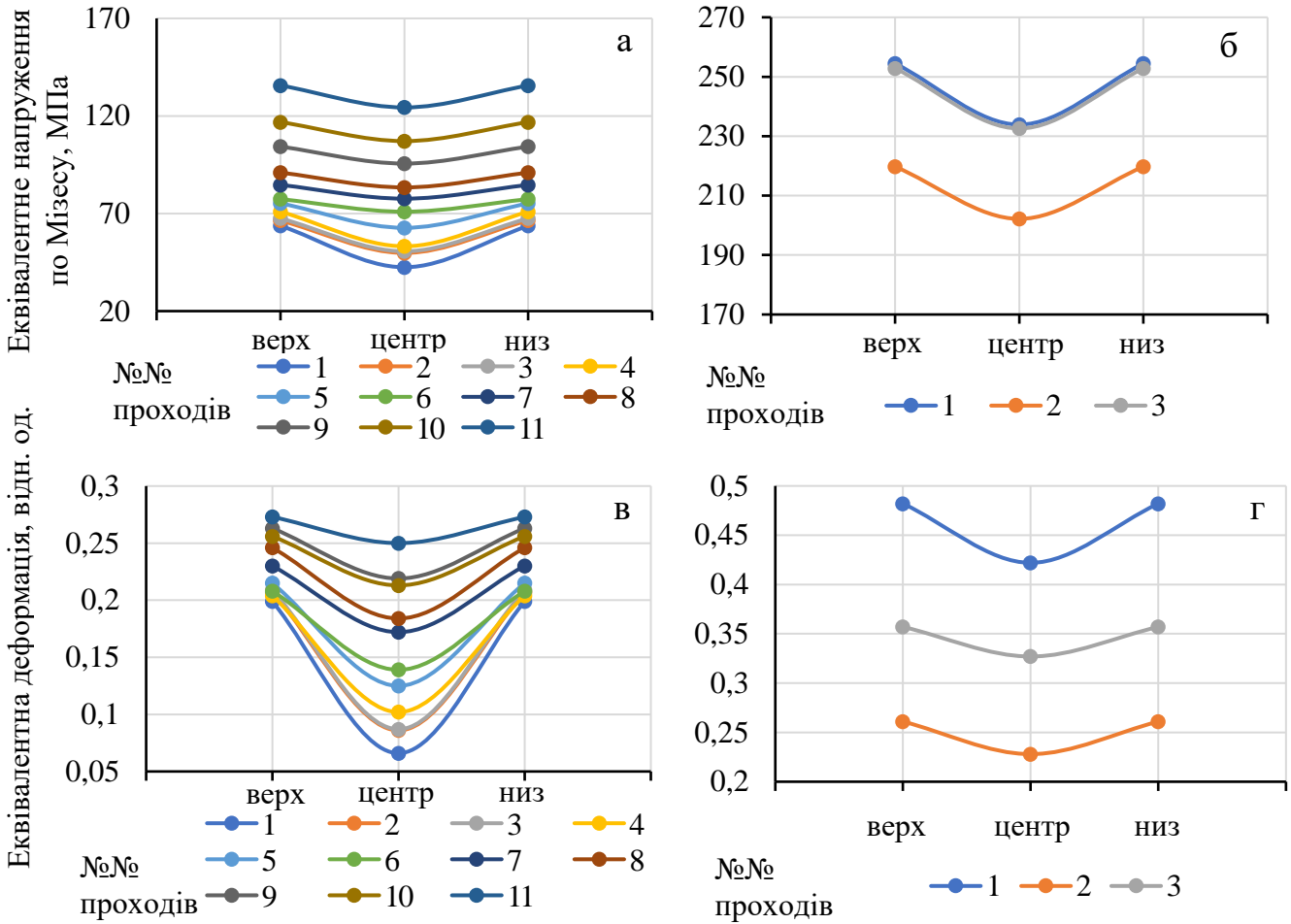


Рис. 12. Розподіл по проходах в кліті 3170 та кліті 1780 еквівалентних напружень по Мізесу (а), (б), та еквівалентної деформації (в), (г) відповідно.

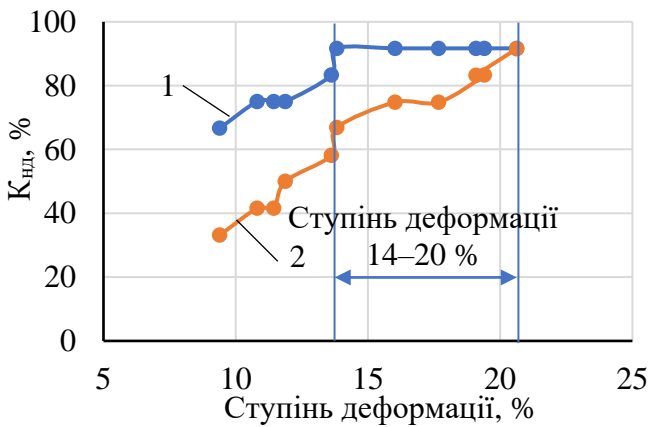


Рис. 13. Залежність рівномірності розподілу еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від ступеня деформації на стані 3170

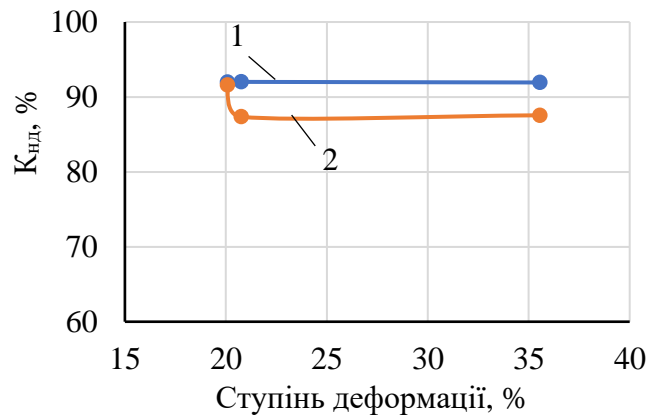


Рис. 14. Залежність рівномірності розподілу еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від ступеня деформації на стані 1780

Слід зазначити, що розраховані коефіцієнти $K_{нд}$ по стану 3170 та стану 1780 не перевищують значення 0,92 %, тому, обтиснення ≥ 20 % забезпечує найкращу рівномірність деформації в дослідженому діапазоні.

У шостому розділі наведено результати розробки та впровадження технологічних процесів із засвоєнням виробництва нового сортаменту на товстолистових станах, широкоштабовому стані та стані Стеккеля. Наведено результати розробки технології виробництва листового прокату розмірами $4 \times 3125 \times 16000$ на стані 3200 заводу Trameal зі слябу товщиною 220 мм (замість слябу 150 мм) виробництва «МК «АЗОВСТАЛЬ». Розроблена технологія може використовуватись для виробництва прокату способом гарячої, нормалізувальної, контрольованої або ТМСП технології. Результат досягнуто за рахунок розрахованих на основі результатів досліджень зменшення часу пауз та відповідного підвищення температури металу по проходах, що призвело до зниження сили прокатки та дозволило оптимізувати увесь режим шляхом зменшення кількості проходів з 15 до 13 та отримати температуру закінчення прокатки на рівні 826°C .

Наведено результати розробки технології виробництва ТМСП прокату на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider. В межах розробки технології виконано уточнення методики розрахунків теплових втрат на станах Стеккеля за рахунок уточнення залежностей для розрахунку сумарного часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією, а також розробці залежностей для розрахунку зміни температури металу в пічних моталках. Розрахунок зміни температури металу в пічній моталці виконано для умов одностороннього нагріву термічно тонкого тіла, згідно з залежністю:

$$t_{met/fur} = t_{fur} - (t_{fur} - t_{met}) \times \exp\left(\alpha_{\Sigma} \times \frac{-\tau_w}{\frac{h}{1000} \times 7,85 \times c_p}\right), \quad (22)$$

де t_{fur} – температура в печі, $^\circ\text{C}$; t_{met} – температура металу перед піччю, $^\circ\text{C}$; α_{Σ} – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, визначається як: $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{conv} + \alpha_{rad}$, де α_{conv} – коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію, визначається як: $\alpha_{conv} = 5,7 + (3,13v_{rol} \times \rho_g)$, де ρ_g – щільність димових газів, $\text{кг}/\text{м}^3$ (для природного газу $0,7 \text{ кг}/\text{м}^3$), v_{rol} – швидкість прокатки, $\text{м}/\text{с}$, α_{rad} – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначається як: $\alpha_{rad} = 5,7 \times 0,8 \times \frac{\left(\frac{t_{fur}+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{met}+273}{100}\right)^4}{t_{fur}-t_{met}}$; c_p – теплоємність сталі, $\text{Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$, визначається за залежністю

$c_p = 1000 \times [(-1 \times 10^{-7}) \times t_{met}^2 + 0,0004t_{met} + 0,4281]$; h – товщина прокату, мм ; τ_w – тривалість намотування останнього вітка на барабан пічної моталки, с , визначається як: $\tau_w = \frac{2\pi R_{d/met}}{v_{rol}}$, де $R_{d/met}$ – радіус барабану з металом, м ,

розраховується за формулою: $R_{d/met} = \sqrt{\frac{h \times l}{\pi \times 1000} + R_d^2}$, де h, l – товщина та довжина прокату відповідно, мм , R_d – радіус барабану пічної моталки, м .

За результатами перевірки вдосконаленої методики розрахунку теплових втрат на станах Стеккеля відхилення розрахованих температур прокату від фактичних, отриманих при виробництві рулонів розмірами $6 \times 1500 \text{ мм}$ з мікролегованої сталі типу В638 (аналог сталь категорії міцності Х60 згідно зі стандартом АРІ 5L), склало від $0,09\%$ до $-2,1\%$. Також в межах розробки технології виробництва ТМСП прокату на стані Стеккеля виконано перевірку та підтверджено можливість використання

вдосконаленої аналітичної моделі для проектування технологічних режимів прокатки на станах Стеккеля з різною компоновкою технологічного устаткування. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки сталі марки S355 в чорновій кліті на стані 3170 склала від -8,27 % до -9,11 %, в чистовій кліті на стані 1780 - від 0,003 % до -0,92 %. Середня похибка при моделюванні сили прокатки на стані 3170 склала від 0,5 % до 5,7 %, на стані 1780 - від -4,89 % до 6,59 %. З використанням результатів досліджень вперше розроблено технологію термомеханічного процесу прокатки з прискореним охолодженням рулонів розмірами 12×1510 мм зі сталі категорії міцності X65. В якості заготовки передбачено використання слябів «МК «АЗОВСТАЛЬ». Особливістю технології є реалізація чорнової прокатки у дві стадії, що сприяє формуванню більш дрібного аустенітного зерна, а отже більш дисперсної та однорідної успадкованої феритної структури в готовому прокаті. Утримання температури в пічних моталках на потрібному рівні, який є низьким відносно діючої технології, здійснено шляхом регулювання кількості пальників. Схему ТМСР процесу прокатки рулонів зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля наведено на рис. 15, динаміку зміни розрахованих сили прокатки та температури наведено на рис. 16.



Рис. 15. Схема термомеханічного процесу прокатки сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля

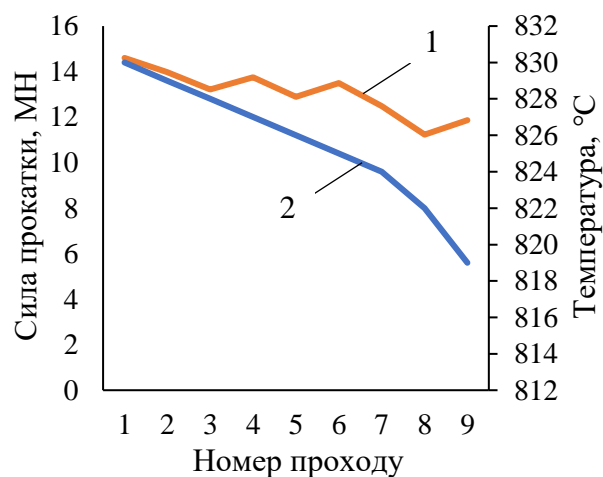


Рис. 16. Динаміка зміни сили прокатки (1) та температури (2) по проходах в кліті Стеккеля

Наведено результати вперше впроваджених, на підставі результатів досліджень, на українських підприємствах технології та сортаменту прокату: - рулонного прокату конструкційного призначення на стані 1700 ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА» розмірами 6×1500 мм зі сталі марки S355MC та рулонного прокату розмірами 2,5×1000 мм зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2 та EN 10051, який вироблявся за технологією ТМСР з прискореним охолодженням. Вперше, при виробництві розроблено та застосовано технологію додаткового контрольованого повітряного охолодження прокату після термомеханічної прокатки, що дозволило зменшити товщину шару повітряної окалини; - рулонного прокату трубного призначення на стані 1700 ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА» розмірами 4,7×1190 мм та 5,7×1190 мм зі сталі марки В та розмірами 8×1260 мм зі сталі X52М для подальшого виробництва електрозварних труб згідно стандарту API-5L, який вироблявся за

технологією ТМСР з прискореним охолодженням. Підтверджено позитивний вплив Nb на формування мікроструктури та властивості прокату при термомеханічному способі обробки. Встановлено технологічні обмеження щодо засвоєння прокату способом термомеханічної прокатки на стані 1700 ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Наведено результати освоєння виробництва товстолистового прокату з судносталі марки EN36 розмірами 25×2150×8000 мм, згідно з Правилами Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»». Прокатку було здійснено за ТМСР режимами. Такий режим прокатки раніше не використовувався для цього сортаменту.

Таким чином, на основі результатів проведених досліджень вперше розроблені та впроваджені на вітчизняних підприємствах технологічні процеси термомеханічної прокатки.

У цьому розділі виконано аналіз додаткових вимог до прокату, які є більш жорсткими в порівнянні з встановленими в стандартах. Встановлено, що підставою для появи таких вимог є конкурентна якість продукції, на підставі якої сформовано підвищений рівень якості, а також високі технічні можливості конкурентних виробників, які дозволяють перевищувати вимоги нормативних документів.

В залежності від кінцевого призначення продукції додаткові вимоги об'єднані в групи з метою отримання комплексу напрямків, рис. 17.

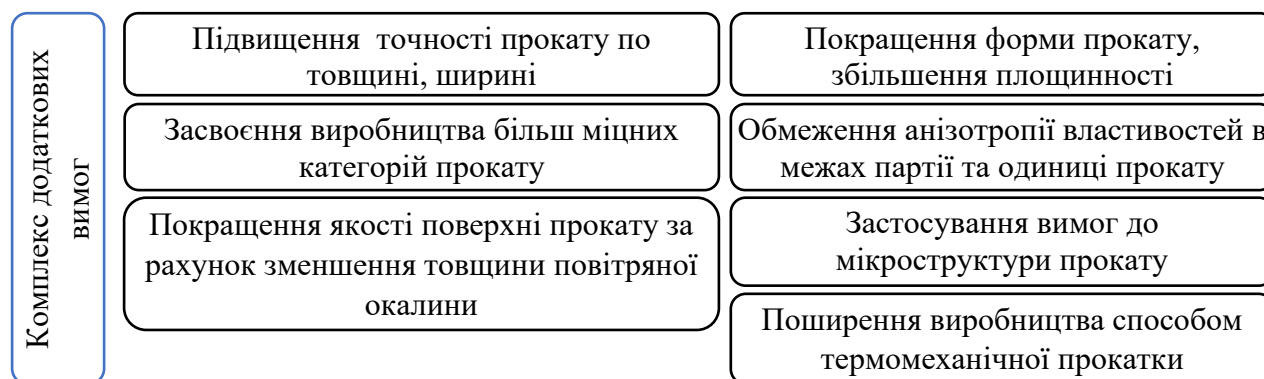


Рис. 17. Комплекс додаткових вимоги до гарячекатаного рулонного та товстолистового прокату

Встановлено, що тенденція подальшого посилення додаткових вимог пов'язана з поточною якістю продукції та станом існуючого вітчизняного устаткування. Застосування додаткових вимог до продукції, що поставляється з України, дозволяє вітчизняним виробникам оцінити поточний рівень якості продукції, встановити її цільовий рівень, а також розробити технологічну стратегію розвитку та модернізації свого устаткування.

З метою забезпечення стабільності механічних властивостей, що формуються в процесі ТМСР обґрунтовано впровадження методології керування якістю, яка встановлює зв'язок між параметрами якості, в тому числі механічними властивостями прокату та технологічними показниками з використанням інструментів статистичної обробки даних, серед яких метод Парето, правила «трьох сигм», карти Шухарта, багатофакторний регресійний аналіз та впровадження трирівневої системи кольорових маркерів для оцінки стабільності технології (стабільний рівень, рівень який потребує уваги та порушення процесу). Опробування запропонованої

методології виконано на листовому прокаті зі сталі групи міцності K60, товщиною 14 мм, що вироблявся за режимами ТМСР з прискореним охолодженням на стані 3600 МК «АЗОВСТАЛЬ». Встановлено можливість підвищення стабільності технології та механічних властивостей зі зменшенням стандартного відхилення границі плинності (рис. 18, 19, аналогічну оцінку виконано і по інших механічних властивостях), тимчасового опору та відносного видовження на 44 %, 31 % та 46 % відповідно.

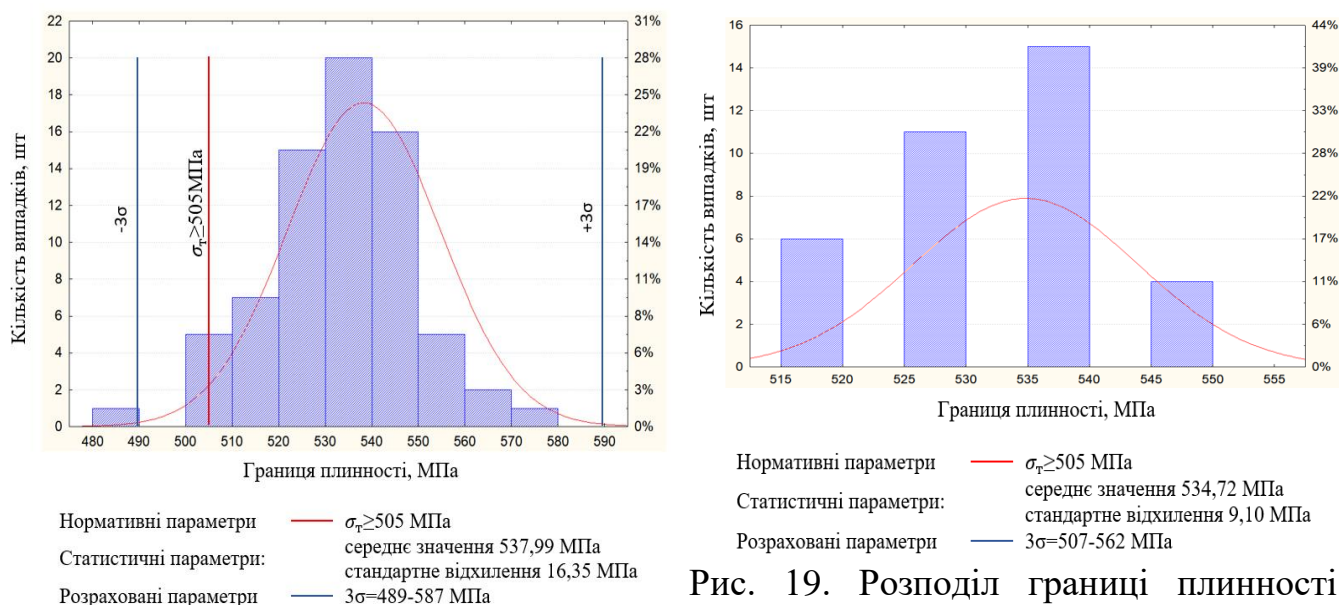


Рис. 18. Початковий розподіл границі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі групи міцності K60

Рис. 19. Розподіл границі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі групи міцності K60 після застосування розробленої методології

Виконано обґрунтування необхідності реконструкції стану 1700 на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» на підставі вимог до цільового сортаменту гарячекатаних рулонів, серед яких можливість виробництва прокату розмірами 1,2-12,7×900-1600 мм, максимальна вага рулонів 32 т, марки сталі (категорії міцності) від DD11, згідно з вимогами EN 10111 до X70, згідно з вимогами API-5L, товщина слябів 250 мм. Визначено, за допомогою вдосконаленої аналітичної моделі, на підставі розрахунків ТМСР процесу, для сортаменту рулонів зі сталі марки S355MC згідно з EN 10149-2, вагою 31 т, розмірами 2,65×1500 мм та розмірами слябів 250×1500×10500 мм, технологічні обмеження, які не дозволяють виробляти цільовий сортамент в умовах існуючого устаткування стану 1700.

З використанням вдосконаленої аналітичної моделі, за результатами досліджень та з урахуванням устаткування, яке було запропоноване до реконструкції, виконано розрахунок термомеханічного процесу прокатки рулонів найбільш показового у сукупності розмір/марка сталі сортаменту розмірами 1,8×1500 мм зі сталі марки S355MC та слябів розмірами 250×1500×10500 мм, що дало змогу визначити необхідний рівень технічних характеристик нового устаткування.

Вдосконалено методологію аналітичних розрахунків температурного режиму прокатки на широкоштабових станах з установкою CoilBox, яка є складовою загальної моделі розрахунку процесу прокатки, за рахунок уточнення часу на втрати тепла випромінюванням та конвекцією при прокатці в чорновій та чистовій групах

клітей, враховуючи особливості знаходження розкату на рольгангу та в клітках. Втрати температури розкату в установці CoilBox розраховуються за наступною формулою:

$$\Delta t_1 = \left(\frac{(2,0284 \ln(t_o) - 12,195)}{1000} \right) \times \left(\frac{\frac{L}{v_w \times 1000} + \frac{L}{v_{uw} \times 1000} + \tau_p}{\left(\sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2} - r \right) \times 1,05} \right) \times (t_o + 273) / 100^4, \quad (23)$$

де t_o – температура розкату, що поступає на установку CoilBox, °C; τ_c – тривалість технологічної операції, с; L – довжина розкату, мм; v_w – швидкість змотування, м/с; v_{uw} – швидкість розмотування, м/с; τ_p – час знаходження змотаного рулону на установці, с; H, L – товщина та довжина розкату, що змотується, мм; r – внутрішній радіус рулону що формується згідно з характеристиками устаткування, мм; 1,05 – коефіцієнт нещільності змотування.

Для урахування додаткових втрат температури металу від неврахованих факторів (вплив товщини підкату, втрати температури на початку змотування та наприкінці розмотування, вплив ефекту «термосу») отримано наступну залежність:

$$\Delta t_{ur} = -16,05 \ln(\tau_p) + 76,694. \quad (24)$$

З врахуванням залежності (23), сумарні втрати температури після CoilBox:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_1 + \Delta t_{ur}. \quad (25)$$

Отримані формули (23) – (25) застосовуються в температурному діапазоні 700-1100 °C, з часом охолодження рулону на установці від 30 с до 1000 с, для вуглецевих та мікролегованих марок сталі. Похибка при розрахунку температури металу на виході з CoilBox, порівняно з фактичними даними, склала від - 6,4 % до 0,39 %.

З метою збільшення ваги гарячекатаних рулонів, на проміжному етапі модернізації стану 1700, для підкату розмірами 23×1500 мм зі сталі марки S355 розроблено технологію синхронізації роботи клітей №01 та №1, при прокатці слябу розмірами 150×9320 мм, шляхом розрахунку деформаційно-швидкісних параметрів роботи клітей, що є наближеними між собою, за допомогою вдосконаленої аналітичної моделі. Розраховані режими відповідають деформаційним умовам чорної термомеханічної прокатки, що дозволяє, на проміжному етапі реконструкції, виробляти рулоні зі збільшеною з 9 т до 15,83 т вагою за технологією ТМСР.

У додатках наведено список публікацій за темою дисертації, апробацію результатів дисертації, порівняння вимог стандартів на виробництво прокатної продукції різноманітного призначення, технічні характеристики основного устаткування станів гарячої прокатки, які досліджені в роботі, результати статистичної обробки параметрів якості прокату, технологічні документи, протоколи, акти, довідки що підтверджують розробку, впровадження технології та реконструкційних заходів, результати досліджень та розрахунків, що було використано в роботі, технічні звіти за результатами прокатки та результати металографічних досліджень, запропоновані методології.

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішена важлива науково-практична проблема розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, що

виготовляється на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля на підставі розвитку наукових основ процесу термомеханічної прокатки і розробки методологій удосконалення технологій, що враховують різний конструктивний та структурний склад основного прокатного устаткування.

1. На підставі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що процес термомеханічної прокатки дозволяє підвищити механічні показники міцності, пластичності, покращити зварюваність і зменшити енерговитрати на виробництво. Однак, на даний момент існує ряд проблем, що стримують його широке впровадження, серед яких невизначеність розподілу температур у прокаті, ефекту впливу деформації на чорновій стадії прокатки на властивості металу, що успадковуються, вирішення яких можливе через поглиблене вивчення умов теплообміну та уточнення градієнту температур по ширині розкату, встановлення зв'язків між розміром зерна аустеніту (a , відповідно, і між опором деформації) від значень температури та обтиснення в процесі прокатки.

2. Уточнені закономірності розподілу температур при охолодженні підкату після пічних моталок або пристроїв міжклітьового перемотування шляхом скінчено-різницевого розв'язання задачі теплообміну, що уточнює вплив конвекційної складової в загальному тепловому балансі для умов термомеханічного процесу прокатки. Доведено необхідність врахування впливу конвекційного теплового потоку при зниженні температури підкату з $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, складова якого в загальному тепловому балансі на крайці підкату збільшується з 1% до 93% . Для стану Стеккеля встановлено, що впродовж кожного етапу нагрівання в пічних моталках та охолодження перед прокаткою в діапазоні температур $830\text{-}790\text{ }^{\circ}\text{C}$ різниця між температурами центральної частини та крайки штаби збільшується відповідно з $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ перед останнім проходом, що перевищує рекомендований для технології ТМСР перепад у $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Запропоновано технічне рішення, яке полягає у корегуванні режимів роботи пальників пічних моталок.

3. Встановлено, що ступінь деформацій при чорновій прокатці має суттєвий вплив на розмір зерна аустеніту, якій визначає такі успадковані механічні властивості, як границя плинності, тимчасовий опір, енергія удару, доля в'язкої складової. Зокрема встановлено, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту (з 51 мкм до 38 мкм , тобто на 50% в загально дослідженому діапазоні) сталей категорії міцності Х65 при температурі $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, яка передує температурі початку гальмування рекристалізації, відбувається при обтисненні від 10% до 20% . Подальше збільшення обтиснень з 20% до 70% є менш ефективним, через зменшення зерна аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм . Встановлено, що з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованих марок сталей категорії міцності Х65 та подальшого успадкованого зерна фериту ступінь деформації за прохід повинна бути $\geq 20\%$, на відміну від відомих результатів, в яких достатнім вважався рівень обтиснень у 10% .

4. Встановлено на основі результатів лабораторних та теоретичних досліджень, що реологічні властивості сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп при температурі деформації $1200\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, швидкості деформації $u = 1\text{ с}^{-1}$ та ступеню деформації $0,1\text{-}0,54$ відн. од. наближені до реологічних

властивостей свинцю марки ССу при температурі 20 °С, що обґрунтовано дозволяє його використовувати як основний модельний матеріал для фізичного моделювання процесів гарячої прокатки вказаних матеріалів. На підставі розрахункових поліноміальних моделей отримано коефіцієнти пропорційності n_i та коефіцієнти зміни істинного опору деформації K_σ , які дозволяють розраховувати опір деформації сплаву 0X18MФТ та сталей марок 15X25Т, DD11, 65Г, X80, X70, СтЗсп використовуючи моделі реологічних кривих свинцю марки ССу. Отримані залежності перевірено на фактичних даних силових режимів за результатами чорнової прокатки товстих листів зі сталі категорії міцності X70 на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», при цьому середня похибка для сили прокатки становить 11,6 %, що підтвердило можливість використання отриманих результатів.

5. Визначено, що комбінування температурно-деформаційних умов дозволяє підвищити рівномірність розподілу деформації по товщині підкату. Встановлено методом скінчено-елементного моделювання, що підвищення рівномірності деформації по товщині підкату при чорновій прокатці конструкційних марок сталі типу S355 досягається при ступенях деформації 14-20 %, що забезпечує підвищення рівномірності розподілу успадкованих механічних властивостей по товщині. Запропоновано коефіцієнт $K_{нд}$ для оцінки рівномірності деформації по товщині прокату, який розраховують як відношення мінімального до максимального значення еквівалентної деформації (інтенсивності деформації). Встановлено, що при обтисненнях 14-20 %, температурі ≤ 1150 °С та показнику осередку деформації $l_d/h_{cp} \geq 0,83$ значення коефіцієнту $K_{нд}$ становить 0,70-0,92 (70-92 %). Визначено, що обтиснення ≥ 20 % дозволяє досягти значення коефіцієнту $K_{нд}$ на рівні 0,92 (92 %), що забезпечує найкращу рівномірність деформації в дослідженому діапазоні. Отримані результати дозволяють підвищити рівномірність розподілу механічних властивостей в готовому прокаті.

6. На підставі результатів дослідження температурно-деформаційних та швидкісних режимів прокатки, виконаних за допомогою аналітичної моделі, підтверджено технічну можливість виробництва відносно тонкого прокату розмірами 4×3125×16000 мм за технологією гарячої, нормалізувальної та термомеханічної прокатки на товстолистовому стані 3200 заводу Tramet (Італія) зі слябу товщиною 220 мм замість слябу 150 мм. При розробці технології враховано скорочення часу пауз між проходами, що дозволило зберегти температуру розкату по проходах та температуру кінця прокатки не нижче 820 °С та, відповідно, отримати силові характеристики прокатки у встановлених обмеженнях.

Підтверджено шляхом промислового експерименту можливість впровадження технології термомеханічної прокатки товстого листа для суднобудування зі сталі марки EN36 згідно з Правилами Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» на підставі урахування результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату. Встановлено, що при застосуванні термомеханічної прокатки отримано більш високі механічні властивості (для границі плинності на 40 МПа, для тимчасового опору на 37 МПа), ніж при прокатці з термічною обробкою нормалізацією.

7. Отримано закономірності для розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією в умовах прокатки на стані Стеккеля, і залежність, яка дозволяє визначати зміну температури металу в пічній моталці та додатково враховує усереднену теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей, що нагріваються, радіус барабану моталки та рулону, довжину штаби і швидкість прокатки. Це дало змогу зменшити похибку розрахунків зазначеної температури металу на 11,25 % (з 9,15 % до -2,1 %). На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату шляхом аналітичного моделювання підтверджено можливість впровадження технології термомеханічної прокатки рулонів товщиною 12 мм зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider (Італія). Режими розроблено з урахуванням обмеженої потужності двигунів робочих клітей.

8. На підставі проведених досліджень розроблено та впроваджено на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» технологію термомеханічної прокатки рулонів зі сталей марок S355MC та S460MC конструкційного сортаменту згідно зі стандартом EN 10149-2 та трубного сортаменту зі сталей марок B та X52M для подальшого виробництва електрозварних труб згідно зі стандартом API-5L. Визначено, що додаткове додавання 0,014 % Nb при виробництві сталі марки X52M та прокатки з неї штаби товщиною 8 мм дозволяє підвищити границю плинності на 40 МПа, тимчасовий опір на 20 МПа, зменшує бал смугастості мікроструктури на поверхні та в центрі на 1-2 бали відповідно, що частково дозволяє компенсувати вплив недостатньої потужності установки прискореного охолодження на формування механічних властивостей. Очікуваний економічний ефект від виробництва нового сортаменту складає 1,75 млн. грн/рік.

9. Для виконання проектних розрахунків при реконструкції стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» з метою визначення необхідного рівня технічних характеристик нового устаткування розроблено залежність для встановлення втрат температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування та часу знаходження рулону на установці. Крім того враховуються додаткові втрати, пов'язані з впливом товщини підкату, температури на початковому етапі змотування і наприкінці розмотування, ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. На основі перелічених факторів вдосконалено аналітичну модель для розрахунку параметрів термомеханічної прокатки на широкоштабових станах. Встановлено, що похибка запропонованої моделі розрахунку втрат температури металу у CoilBox у порівнянні з фактичними значеннями температур склала від -4,2 % до -6,4 %, що підтвердило можливість її використання. Уточнені необхідні технічні характеристики у проекту реконструкції стану 1700, який прийнято до реалізації на комбінаті «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Очікуваний економічний ефект від реконструкції стану 1700 складає 2,90 млн. грн/рік.

Методики і результати теоретичних та експериментальних досліджень використані в навчальному процесі та в науково-дослідних роботах ДВНЗ «ПДТУ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Кухарь, В.В., Присяжный, А.Г., Балалаева, Е.Ю., Тузенко, О.А., Курпе, А.Г., Анищенко, А.С., Кармазина, И.В. (2018), *Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств*, ПГТУ, Мариуполь, 144 с. ISBN 978-966-604-243-2.

2. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600”, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium: Collective monograph*, Stalowa Wola, Poland, Vol. 1, pp. 281-298. ISBN 978-9934-571-63-3.

3. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Developing of Manufacturing Technology for Hot Rolling Coils (Steel Grade S355MC) at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Scientific development and Achievements*, Science publishing London, Vol. 5, pp. 260-270. ISBN 978-1-9993071-0-3.

4. Kukhar, V.V., Kurpe, O.H., Klimov, E.S., Prysiazhnyi, A.H., Anishchenko, O.S. (2020), “Research and Improvement of Rolling Parameters at the Steckel Mill”, *Intellectual capital is the foundation of innovative development innovative engineering and technology, informatics: Monographic series «European Science» Book 3. Part 3*, ScientificWorld-NetAkhatAV, Karlsruhe, pp. 60-78. ISSN 2709-2313. DOI: 10.21893/2709-2313.2020-03-03-052.

Публікації у фахових виданнях України:

5. Кухарь, В.В., Курпе, А.Г. (2018), “Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА*, ДГМА, Краматорск, № 1 (46), сс. 159-166.

6. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Змазньєва, Є.В. (2018), “Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, № 1, pp. 78-84.

7. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва прокату товщиною 1,2 мм на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №5 (265), сс. 171-175.

8. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжный, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA”, *Mechanics and Advanced Technologies*, № 3 (84), сс. 98-105.

9. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Вдосконалення математичної моделі зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 11 (1336), сс. 31-35.

10. Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрий, С.Д. (2017), “Разработка и внедрение модели нормирования расхода топлива в методических печах стана 1700 в рамках функционирования системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011”, *Металл и литье Украины*, № 1, сс. 35-42.

11. Курпе, А.Г., Васильченко, С.Е., Негрий, С.Д., Шебаниц, О.Н. (2017), “Освоение технологии термомеханической контролируемой прокатки на стане 1700”, *Металл и литье Украины*, № 1, сс. 54-56.

12. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Варіант модернізації стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 23 (1299), сс. 33-38.

13. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 ПрАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА»”, *Вісник приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки*, Вип. 37, сс. 29-34.

14. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*, № 3, т. 29 (68), сс. 121-126.

15. Курпе, О.Г. (2018), “Проектування технології виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу «FERRIERA VALSIDER» (ІТАЛІЯ)”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6, т. 2, сс. 53- 59.

16. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск Машина І Пластична Деформація Металу*, Кам’янське, сс. 36-44.

17. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC на широкосмуговому стані 1700”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, Хмельницький, № 3, сс. 61-69.

18. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів із марки сталі В для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-L на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*, № 6, Т. 29 (68), Част. 2, сс. 56-63.

19. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки X52M для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-5L, на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*, Вип. 5(112), сс. 65-74.

20. Курпе, О.Г. (2018), “Термомеханічна прокатка товстих листів зі сталі марки EN36 на стані 3600 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. труд, ДГМА, Краматорск*, № 2 (47), сс. 146-155.

21. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2019), “Pilot production development of plate, steel grade EN36 applying thermo-mechanical controlled process at the rolling mill 3600”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, Хмельницький, Vol. 92, № 2, сс. 33-41.

22. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Фізичне моделювання силових процесів чорнової гарячої прокатки”, *Вчені записки Таврійського національного університету*

імені В. І. Вернадського. *Технічні науки*, № 3, т. 31 (70), сс. 185-190. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/29>.

23. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Матеріалознавство*, Вип. 2(121), сс. 122-128. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.122-128.

24. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Визначення реологічної подоби свинцю та сталей для плоскої гарячої прокатки”, *Збірник наукових праць національного гірничого університету. Матеріалознавство та галузеве машинобудування*, №61, сс. 153-162. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.153>.

25. Kurpe, O., Kukhar, V. (2020), “Investigation of the hot rolling process at the Steckel mill by means of modeling by the finite-element method”, *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, № 2 (98), pp. 68-79. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02.

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

27. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Визначення умов проникнення деформації по товщині прокату на стані Стеккеля”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА, ДГМА, Краматорск*, № 1 (50), сс. 249-258.

Публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

28. Zinchenko, Yu.A., Kurpe, A.G., Bagmet, O.A. (2008), “Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine”, *Metallurgist*, Vol. 52, №. 7-8, pp. 461-463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>. (Scopus)

29. Kukhar, Volodymyr., Kurpe, Oleksandr., Klimov, Eduard., Balalayeva, Elena., Dragobetskii, Vladimir. (2018), “Improvement of the Method for Calculating the Metal Temperature Loss on a Coilbox Unit at The Rolling on Hot Strip Mills”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), pp. 35-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19548>. (Scopus)

30. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Prysiaznyi, A. (2018), “Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena*, Vol. 291, pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.63>. (Scopus)

31. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V., Klimov, E.S., Chernenko, S.M. (2020), “Improvement of Process Parameters Calculation for Coil Rolling at the Steckel Mill”, *Materials Science and Metallurgical Technology II. Materials Science Forum*, Vol. 989, pp. 609-614. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609>. (Scopus)

32. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2018), “Development and Optimization of Flat Products Manufacturing at Rolling Mill 3200”, *Materials Science and Metallurgical Technology. Materials Science Forum*, Vol. 946, pp. 794-799. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.794>. (Scopus)

33. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2020), "Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, Lutsk, Ukraine, Springer Nature Switzerland AG*, pp. 418-429. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_42. (Scopus)

34. Kurpe, Oleksandr., Kukhar, Volodymyr., Puzyr, Ruslan., Burko, Vadym., Balalayeva, Elena., Klimov, Eduard. (2020), "Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill", *25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine*, pp. 510-513. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240818. (Scopus)

Публікації у виданнях, що не входять до переліку фахових:

35. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2018), "Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel SpA", *Металлургическая и горнорудная промышленность*, № 2, сс. 24-29.

36. Капланов, В.И., Володарский, В.В., Курпе, А.Г., Носоченко, А.О., Сагиров, Р.И., Ганошенко, И.В., Матросов, Ю.И. (2007), "Исследование прочностных свойств стали категории прочности X70 и X80", *Производство проката. Москва: Наука и Технологии*, №2, сс. 7-10.

37. Капланов, В.И., Курпе, А.Г., Володарский, В.В., Сагиров, Р.И. (2007), "Анализ математической модели технологического процесса прокатки на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»", *Производство проката. Москва: Наука и Технологии*, № 8, сс. 12-14.

Наукові праці апробаційного характеру:

38. Капланов, В.И., Курпе, А.Г. (2009), "Усовершенствованная зависимость для определения пластических свойств стали категории прочности X70", *Университетская наука – 2009: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 156-157.

39. Курпе, А.Г. (2010), "Освоение производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля", *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, т. 1, сс. 158-159.

40. Курпе, А.Г. (2010), "Проектирование технологии производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля", *Труды восьмого конгресса прокатчиков. МОО «Объединение прокатчиков», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.Н. Носова». Магнитогорск*, т. 2, сс. 123-130.

41. Капланов, В.И., Курпе, А.Г., Змазнева, Е.В. (2011), "Особенности проектирования технологии прокатки рулонов на стане Стеккеля", *Университетская наука – 2011: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Металлургический факультет, ПГТУ, Мариуполь*, сс. 144-145.

42. Курпе, А.Г., Змазнева, Е.В. (2018), "Анализ режимов деформации на стане Стеккеля", *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, т. 1, сс. 236-237.

43. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі процесу прокатки на стані Стеккеля щодо умов заводу Feetiera Valsider SpA”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти: «Київський політехнічний інститут»: матеріали 9 міжнародної технічної конференції*, сс. 152-156.

44. Курпе, А.Г., Кухар, В.В., Березка, В.В. (2018), “Уточненная методика расчета изменения температуры раската при прокатке на стане Стеккеля”. *Сучасні технології в механіці: збірник наукових праць. Укл. Скиба М. Є., Олександренко В. П., ФОП Мельник А. А., Хмельницький*, сс. 11-13.

45. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Математична модель зміни температурного поля смуги перед прокаткою на стані Стеккеля”, *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: тези I Міжнар. наук.-техн. конф. Вінниця: ВНТУ*, сс. 88-89.

46. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Оцінка впливу конвекційного теплообміну в розрахунках зміни температурного поля смуги при термомеханічній прокатці”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: тези X Міжнар. наук.-техн. конф. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Херсонський національний технічний університет. Київ-Херсон*, сс. 65-66.

47. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Математичне моделювання зміни температурного поля смуги на стані Стеккеля”, *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., Харків*, сс. 88-89.

48. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д. (2014), “Оптимизация параметров прокатки полос в черновой группе ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2014: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, т. 1, сс. 158-159.

49. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Изотов, Б.В., Васильченко, С.Е. (2015), “Расширение транзитного сортамента горячекатаных рулонов в ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 126-127.

50. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Чабан, В.В., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Кшевицкая, Т.С., Литовчук, В.В., Шаламов, Ю.Н. (2015), “Освоение технологии нагрева слябов толщиной 250 мм в нагревательных колодцах ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 175-176.

51. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Литовчук, В.В., Васильченко, С.Е., Негрий, С.Д., Медведев, В.В. (2017), “Освоение и развитие технологии нагрева непрерывнолитых слябов толщиной 250 мм в теплотехнических агрегатах ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, т. 1, сс. 213-214.

52. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрий, С.Д. (2017), “Разработка модели нормирования расхода топлива, функционирующей в рамках системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011, на примере методических печей ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”,

Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1, сс. 214-215.

53. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Глебова, Ю.М., Березка, В.В. (2018), “Розрахунок втрат температури розкату на безперервних листових станах гарячої прокатки при використанні установки COILBOX”, *Университетская наука – 2018: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, т. 1, сс. 114-115.*

54. Курпе, А.Г., Горлаков, А.Б. (2010), “Перспективные требования к сталям и листовому прокату для изготовления труб магистральных газонефтепроводов и их реализация в условиях ОАО «МК «Азовсталь»”, *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1, сс. 159-160.*

55. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Васильченко, С.Е. (2016), “Термомеханическая прокатка рулонов на стане 1700”, *Университетская наука – 2016: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, сс. 109-110.*

56. Курпе, А.Г., Шебаниц, О.Н. Васильченко, С.Е. (2017), “Освоение технологии производства рулонов для труб по API-5L на стане ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1, сс. 195- 196.*

57. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»”, *Машина і пластична деформація металу: тез. IV Междунар. науч.-техн. конф. Кам'янське, Дніпро: Дніпровський державний технічний університет НТУ «Дніпровська політехніка», сс. 22-23.*

58. Kurpe, O., Kukhar, V., Shebanitc, O. (2018), “Development of pilot batch and grade estimation of coils of steel grade S355MC at rolling mill "1700", PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS", *Physical & Chemical Geotechnologies – 2018: Materials of the International Scientific & Practical Conference (Program of report) = Фізико-хімічні геотехнології – 2018: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (програма виступів), м. Дніпро, 10-11 жовтня 2018 р. / ред. кол.: Р.О. Дичковський, О.М. Шашенко, П.Б. Саїк, В.Г. Лозинський. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», сс. 107-109.*

59. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2019), “Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *The Innovation Exchange: 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing. Book of Abstracts (June 11-14, 2019 y.), Lutsk, Ukraine, p. 101.*

60. Курпе, А.Г. (2012), “Опробование технологии термомеханической прокатки листов из судостали на стане 3600”, *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1, сс. 236-237.*

61. Зинченко, Ю.А., Курпе, А.Г., Багмет, О.А. (2009), “Перспективы развития технологии производства штрипса в ОАО «МК «Азовсталь»”, *Современные тенденции разработки и производства сталей и труб для магистральных газонефтепроводов: Сб. докладов, Металлургиздат, Москва, сс. 76-77.*

62. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Захаров, М.П., Пертік, Д.І. (2019), “Розробка та відпрацювання технології термомеханічної контрольованої прокатки рулонної сталі

за європейськими Стандартами”, *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., ПДТУ, Мариуполь*, т.1, сс. 39-41.

63. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Мирвода, К.Ю., Пертік, Д.І., Захаров, М.П. (2019), “Досягнення показників якості рулонного металопрокату зі сталей за Європейськими Стандартами, що вироблені в умовах НШПС 1700”, *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., ПДТУ, Мариуполь*, т.1, с. 41.

64. Кухар, В.В., Курпе, О.Г., Захаров, М.П., Калатало, А.В. (2020), “Недоліки та перспективи розвитку технології та устаткування ширококутних станів гарячої прокатки”, *Університетська наука – 2020: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., ПДТУ, Мариуполь*, т.1, сс. 56–57.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

65. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2012), “Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів”, *пат. 98214 Україна: МПК (2012.01), B21C 37/08 (2006.01) B21B 1/32 (2006.01) C22C 38/00 C21D 8/02 (2006.01) C21D 8/10 (2006.01) B23K 9/025 (2006.01) / № а 2010 11473; заявл. 27.09.2010; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. (патент на винахід).*

66. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2011), “Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів”, *пат. 96097 Україна: МПК (2011.01), B21C 37/08 (2006.01) C22C 38/00 C21D 1/00 B21B 1/22 (2006.01) B23K 9/00 / № а201011469; завл. 27.09.2010; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. (патент на винахід).*

67. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Ковура, О.Б., Зінченко, Ю.А., Кумуржи, Є.В., Чубань, А.М., Койфман, О.А., Курпе, О.Г., Змазнева, Є.В. (2010), “Спосіб нагрівання і підготовки заготовок перед прокаткою у станах гарячої прокатки”, *пат. 92950 Україна: МПК C21D 9/00, F27B 9/00, F27B 9/30, F27D 3/00 / № а 2009 00161; заявл. 09.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. (патент на винахід).*

68-79. Патенти України на корисну модель : 110812; 121374; 117875; 109260; 109976; 113959; 113589; 41713; 54343; 54506; 54507; 56651.

Особистий внесок автора у роботах, опублікованих у співавторстві:

[1] – розділ 5; [2, 3, 11, 16–19, 21, 30, 33, 55–59, 62, 63] – аналіз параметрів устаткування, розробка хімічного складу, розрахунок параметрів та впровадження ТМСР процесу, оцінка похибок; [5, 6, 29, 41, 44, 53, 70] – вдосконалення закономірностей розрахунку зміни температурних параметрів прокату для різних комплексів устаткування; [7, 48, 49] – аналіз параметрів устаткування, сортаменту, розрахунок технологічних параметрів прокатки, впровадження технології, оцінка похибки; [8, 31, 37, 43] – вдосконалення аналітичної моделі розрахунку параметрів процесу прокатки, порівняльний аналіз результатів; [9, 45–47] – вдосконалення математичної моделі, порівняльний аналіз результатів; [10, 51] – аналіз похибки розробленої моделі, порівняння з фактичними даними; [12, 64] – ідея, аналіз

параметрів устаткування, оцінка резервів, оцінка перспективних вимог до прокату, розрахунок технологічних параметрів, параметрів устаткування, обґрунтування устаткування, яке підлягає реконструкції; [13, 34] – ідея, технічне рішення, розрахунок параметрів та обґрунтування можливостей впровадження технології, порівняльний аналіз; [14, 32, 35, 42] – аналіз параметрів устаткування, порівняльна обробка фактичних даних, розрахунок параметрів прокатки; [22, 24] – визначення переліку марок сталі (сплаву)-аналогів, встановлення закономірних зв'язків, визначення меж застосування, визначення похибки розрахунків; [23] – проведення експерименту, аналіз даних, отримання залежностей, висновки; [4, 25, 27] – формування вихідних даних, порівняльний аналіз, висновки; [28, 54, 61] – оцінка перспективних вимог, аналіз тенденцій розвитку металургійних підприємств; [26] – методологія, методи обробки даних, визначення покращень; [36, 38] – планування експерименту, обробка дослідних даних, розробка аналітичних залежностей; [65, 66, 75–79] – розрахунок параметрів ТМСР процесу; [68, 69] – розробка хімічного складу та системи використання мікролегуючих елементів, розрахунок параметрів ТМСР процесу; [50, 51, 72, 73] – розробка нової схеми виробництва рулонного прокату, розрахунок параметрів; [67, 71] – оцінка впливу устаткування на зміну температурних параметрів прокату; [74] – оцінка технічних можливостей устаткування, параметрів якості заготовки та кінцевої продукції.

АНОТАЦІЇ

Курпе О.Г. Розвиток наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», Міністерство освіти і науки України, Маріуполь, 2020. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2020.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної та практичної проблеми розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, що виробляється на товстолистових та широкоштабових станах. Визначено проблеми і шляхи подальшого розвитку процесів термомеханічної прокатки, виконано систематизацію технологічних етапів. Розвинуто метод розрахунку розподілу температури по ширині штаби для умов прокатки в реверсивному стані з пічними моталками. Для мікролегованої сталі групи міцності Х65 встановлено залежність зміни опору гарячої деформації та розміру зерна аустеніту від температурно-деформаційних параметрів. Встановлено умови, при яких реологічні властивості сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, СтЗсп наближені до реологічних властивостей свинцю марки ССу. Визначено умови прокатки, при яких забезпечена максимальна рівномірність розподілу деформації по товщині розкатів. На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату розроблено

науково обґрунтовані рекомендації щодо розробки та впровадження технології термомеханічної прокатки рулонів та товстолистового прокату конструкційного, трубного й суднобудівного сортаменту, а також щодо розрахунків необхідного рівня технічних характеристик устаткування по проекту реконструкції широкоштабового стану 1700.

Ключові слова: термомеханічна прокатка, товстолистові стани, безперервні стани, прокат трубного призначення, конструкційний прокат, температурний режим прокатки, моделювання технологічних процесів, скінчено-елементний метод, фізичне моделювання.

Курпе А.Г. Развитие научных основ термомеханической прокатки плоской металлопродукции с получением повышенного уровня механических свойств. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 - процессы и машины обработки давлением. - Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», Министерство образования и науки Украины, Мариуполь, 2020. - Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2020.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической и практической проблемы расширения сортамента продукции с повышенным уровнем механических свойств, которая производится на толстолистовых и широкополосных станах. Определены проблемы и пути дальнейшего развития процессов термомеханической прокатки, выполнена систематизация технологических этапов. Развита метод расчета распределения температуры по ширине полосы для условий прокатки на реверсивном стане с печными моталками. Для микролегированной стали группы прочности Х65 установлена зависимость изменения сопротивления горячей деформации и размера зерна аустенита от температурно-деформационных параметров. Установлены условия, при которых реологические свойства сплава 0Х18МФТ и сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, СтЗсп приближены к реологическим свойствам свинца марки ССу. Установлены условия прокатки, при которых обеспечена максимальная равномерность распределения деформации по толщине раскатов. На основе уточнения расчета тепловых потерь и с учетом результатов исследований влияния температурно-деформационных условий прокатки на формирование наследуемых механических характеристик проката разработаны научно обоснованные рекомендации по разработке и внедрению технологии термомеханической прокатки рулонов и толстолистового проката конструкционного, трубного и судностроительного сортамента, а также по расчету необходимого уровня технических характеристик оборудования по проекту реконструкции широкополосного стана 1700.

Ключевые слова: термомеханическая прокатка, толстолистовые станы, непрерывные станы, прокат трубного назначения, конструкционный прокат, температурный режим прокатки, моделирование технологических процессов, конечно-элементный метод, физическое моделирование.

Kurpe O.H. Development of scientific bases of thermomechanical rolling of flat rolling products with obtaining the increased level of mechanical properties. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Priazovsky State Technical University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Mariupol, 2020. – Donbass State Engineering Academy, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2020.

The dissertation is aimed at solving an important scientific, technical and practical problem of expanding the product mix with a high level of mechanical properties, produced at plate and strip mills based on the development of scientific bases of thermomechanical rolling process and development of methods for improving technology with different construction and structural composition of basic rolling equipment.

Based on the analysis of literature sources, the problems and ways of further development of thermomechanical rolling processes have been identified. The systematization of technological stages of thermomechanical rolling processes depending on the category of rolling strength and the equipment used has been performed.

A method for calculating the temperature distribution over the width of the staff for rolling conditions in the reversible mill with furnace coilers has been developed. It is established based upon the improved mathematical model of a temperature field change of a strip which is cooled in the process of thermomechanical rolling that intensive decrease in temperature occurs at the edge. The necessity to take into account the influence of convective heat flux when reducing the rolling temperature from 1100 °C to 800 °C, the share of which in the total heat flux at the edge of the rolling products increases from 1% to 93%. To maintain the recommended temperature difference in the central part of the strip and at the edge, it is proposed to adjust the heating mode in the furnace coilers of the Steckel mill by adjusting the operation of the furnace burners located near the inlet / outlet window.

For the first time for microalloyed low-carbon steel grade 06G2DB strength group X65 the dependence of the change of hot deformation resistance on the austenite grain size and austenite grain size on the deformation parameters has been established. By combining experimental data on austenite grain diameter and high-temperature plastometric studies, it has been found that the most intensive reduction in austenite grain size of steel grade 06G2DB strength category X65 at a temperature of 1050 °C occurs at deformation from 10% to 20%, i.e. from 51 μm to 38 μm, which is 50% in the study range. It has been found that in order to obtain the smallest possible grain size of austenite, in roughing rolling of microalloyed steel grades and subsequent inherited ferrite grain, in particular steel grade 06G2DB (X65), the reduction per pass should be $\geq 20\%$, previously considered sufficient reduction of 10%.

It has been established, on the basis of results of laboratory and theoretical researches, that rheological properties of alloy 0X18MFT and steel grades 15X25T, DD11, 65G, X80, X70, St3sp at deformation temperature 1200-1000 °C, strain rate $u = 1 \text{ c}^{-1}$, engineering deformation from 0.1-0.54 are similar to the rheological properties of lead grade SSu at a temperature of 20 °C and the same deformation-rate conditions. Based on the calculated polynomial dependences, the coefficients of proportionality n_i and the coefficients of

change of the true deformation resistance K_{σ} have been obtained, which allow to calculate the rheological properties of alloy 0X18MFT and steel grades 15X25T, DD11, 65G, X80, X70, St3sp on the basis of the obtained properties of lead grade SSu.

It has been established by the finite-elements method that the reduction of non-uniformity of deformation along the thickness of semi-rolled products during roughing rolling of structural steel grade type S355JR + AR is achieved at a reduction of 14-20%, which increases the uniformity of inherited mechanical properties. It has been offered to introduce the coefficient K_{nd} to estimate the uniformity of deformation in the thickness of rolled products. It has been established that at the reduction of 14-20%, temperature ≤ 1150 °C and deformation zone index ≥ 0.83 the coefficient K_{nd} is from 70% to 92%. It has been determined that the maximum value of the coefficient K_{nd} does not exceed 92%, so increasing the deformation by more than 20% allows the best uniformity of the deformation. The obtained results allow to control the uniformity of the distribution of mechanical properties in the finished products.

Based on the specification of heat loss calculation and taking into account the research results of the influence of rolling temperature-deformation conditions on the formation of inherited mechanical properties of rolled products scientifically sound recommendations have been developed: - for the development of relatively thin rolled products with dimensions $4 \times 3125 \times 16000$ mm by technology of hot, normalized and thermomechanical rolling at the plate mill 3200 of Tramet plant, Italy, from slabs of 220 mm thickness, instead of slabs of 150 mm thickness; - development of thermomechanical rolling technology for coils with a thickness of 12 mm from steel of strength category X65 at the Steckel mill of Ferriera Valsider plant; - and implementation of thermomechanical rolling technologies of coils produced of structural rolling products from steel grades S355MC and S460MC, according to the standard EN 10149-2 and pipe rolling products from steel grades B, X52M for further production of electric welded pipes, according to API -5L, at 1700 ILYICH IRON AND STEEL WORKS facilities; - development of thermomechanical plate rolling technologies for shipbuilding from EH36 steel grade according to Rules of Bureau Veritas at the rolling mill 3600 of AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS, that was confirmed by the industrial experiment; - also, the recommendation as for calculations of the necessary level of equipment technical characteristics under the reconstruction project at the wide-strip mill 1700 of ILYICH IRON AND STEEL WORKS have been developed.

Keywords: thermomechanical rolling, plate rolling mills, continuous rolling mills, rolling products for pipe, structural rolling products, temperature rolling schedule, modeling of technological processes, finite-element method, physical modeling.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
просп. Перемоги, 37
м. Київ, 03056

Підп. до друку 24.03.2021. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друк – електрографічний. Ум. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,09. Наклад 100 пр.
Зам. № 21-034

Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського
Вул. Політехнічна, 14, корп. 15
м. Київ, 03056
тел. (044) 204-81-78