

Спеціалізована вчена
рада Д 12.105.01
Донбаська державна
машинобудівна академія,
м. Краматорськ

Відгук офіційного опонента
на дисертацію **Курпе Олександра Геннадійовича**
«Розвиток наукових основ термомеханічної прокатки плоскої
металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних
властивостей»

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

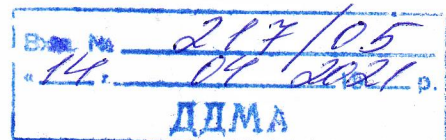
Оцінка структури, змісту і завершеності дисертації

Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Вона викладена на 534 сторінках, з них 272 сторінки основного тексту. Робота містить 125 рисунків і 103 таблиці. Список використаних джерел з 273 найменувань займає 35 сторінок, додатки – на 156 сторінках.

Загальний зміст роботи відзеркалює сутність виконаного наукового дослідження. Подана робота виконана у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України та є завершеною науковою працею.

Експертиза змісту розділів дисертації

У **вступі** наведені відомості про загальну структуру роботи, її характеристика з точки зору актуальності теми, наукової новизни та практичної значимості, поставлена мета й задачі дослідження, визначено особистий внесок автора, подані відомості щодо апробації та публікацій за темою дисертації. У **першому розділі** висвітлений стан теорії та практики термомеханічної прокатки (ТМСП). Наведені відомості про вплив технологічних параметрів та параметрів устаткування на механічні властивості сталей при виробництві товстолистового та рулонного прокату. Виконаний аналіз сучасного стану устаткування деяких прокатних станів та зроблено оцінку потенціалу з виробництва сортаменту способом термомеханічної прокатки. **Другий розділ** містить опис теоретичних, лабораторних та промислових методів досліджень процесів термомеханічної прокатки. Автором виконано систематизацію технологічних операцій процесу термомеханічної прокатки, показано змінення технологічних операцій та їх параметрів зі зміненням категорії міцності прокату. У **третьому розділі** наведено результати теоретичних досліджень змінення температурного поля штаби по ширині. Дослідження виконано з використанням методу елементарних теплових балансів. Вдосконалену математичну модель автор застосував для розрахунку змінення температурного поля штабі на дільниці між пічною моталкою та



кліттю стану Стеккеля. Встановлено, що більш охолодженими є кромки штаби, для вирівнювання температури яких автором запропоновано технологічне рішення. Наведено результати дослідження рекристалізації сталі марки 06Г2ДБ, результати яких дозволяють оцінити вплив температури та деформації на розмір зерна аустеніту і на опір деформації прокату, для визначення якого використано співвідношення Холла-Петча. Визначено умови, які дозволяють отримати якомога менший розмір зерна аустеніту. **Четвертий розділ** містить результати лабораторного експерименту з встановлення реологічних властивостей свинцю. Автором визначено перелік сталей та температурно-деформаційні умови при яких ці сталі мають схожі реологічні властивості. Отримано коефіцієнти, які дозволяють прогнозувати силові параметри прокатки сплаву 0Х18МФТ та марок сталей 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, СтЗсп на підставі силових даних прокатки свинцю. **П'ятий розділ** містить результати дослідження умов проникнення напружень та деформації по товщині прокату, що виконано методом скінчених елементів. Автором обґрунтовано застосування коефіцієнту $K_{нд}$, який характеризує ступінь рівномірності деформації та встановлено умови, які забезпечують максимальну рівномірність розподілу деформації по товщині. **В шостому розділі** наведено результати розробки технології термомеханічної прокатки, спрямованої на розширення сортаменту виробництва товстолистового та рулонного прокату на вітчизняних та деяких закордонних станах з різним складом устаткування. **В сьомому розділі** наведено пропозиції та розрахунки щодо проекту реконструкції стану 1700 ММК ім. Ілліча (Маріуполь), сформовано перелік устаткування, що підлягає реконструкції та розраховано його характеристики.

Після кожного розділу дисертаційної роботи наведені висновки. **Загальні висновки** роботи повною мірою підбивають підсумок усієї роботи. У **додатках** наведено матеріали, що підтверджують використання результатів роботи у промисловості та навчальному процесі.

Таким чином, робота виконана на достатньому науковому рівні з використанням методів аналізу, які адекватно відображають явища та процеси, що відбуваються при термомеханічній прокатці. Основні положення дисертації не суперечать сучасним уявленням про процеси плоскої прокатки.

Актуальність теми дисертації

В умовах безперервного інноваційного технічного розвитку та глобалізації ринків збуту перед металургійними компаніями, а, отже, і перед безпосередніми виробниками металопрокату стоїть 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 (ТМСР), по всіх напрямках. При засвоєнні такої продукції для технологів залишаються нерозв'язаними питаннями щодо можливостей впровадження технології ТМСР 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 ТМСР на існуючому прокатному устаткуванні.

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

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

Роботу виконано на кафедрі ОМТ ДВНЗ «ПДТУ» в рамках науково-дослідницьких робіт, що передбачені планами Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0117U002269, 0118U006912, 0120U102154). Автор дисертації був виконавцем робіт.

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Високий ступінь **обґрунтованості** та **достовірності** наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі забезпечується:

- аналізом іноземних та вітчизняних літературних джерел, присвячених дослідженню дисертаційної роботи;
- логічним підходом до реалізації дослідження, до якого входять: вдосконалення математичної моделі змінення температурного поля штаби для температурних умов термомеханічної прокатки, дослідження умов

підвищення рівномірності деформації методом скінчених елементів, перевірка адекватності математичних моделей;

- виконанням натурних експериментів в лабораторних та промислових умовах з використанням сучасного устаткування та вимірювальної техніки;

- аналізом та узагальненням отриманих в ході дослідження результатів.

- достатнім співпадінням теоретичних і експериментальних результатів.

За позитивний факт, що підтверджує достовірність наукових результатів, слід вважати результати впровадження розроблених технологій термомеханічної прокатки з освоєнням виробництва нового сортаменту на «МК «АЗОВСТАЛЬ» та «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», що підтверджено відповідними документами.

Новизна результатів дисертації

До нових наукових результатів, отриманих при дослідженнях за темою дисертації особисто автором, слід віднести наступні:

- 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.

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

- 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 міжкільцевого перемотування на подальший розподіл температури по ширині штаби, розрахований методом елементарних теплових балансів при температурах термомеханічної прокатки. Це дозволяє знизити похибку між методами розрахунку в дослідному діапазоні умов чистової термомеханічної прокатки на 4 %, а також забезпечувати умови рівномірного розподілу механічних властивостей прокату по ширині.

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

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

– Отримали подальший розвиток методологічні засади розробки та вдосконалення технологій виробництва гарячого прокату на товстолистових та штабових станах. Відмінності полягають у систематизації елементів процесів розробки технологій виробництва товстолистого та штабового прокату із встановленням рівнів впливу значень технологічних факторів на показники якості плоскої металопродукції за допомогою їх аналізу і обробки методами Парето, використання правила «трьох сигм» і карт Шухарта, багатфакторного 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.

Значимість роботи для науки і практики.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у тому, що результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволили:

- Розробити методологію керування якістю, методологію впровадження технологічної стратегії, методологію освоєння нового сортаменту, які спрямовані на забезпечення процесу безперервного вдосконалення та підвищення ефективності виробництва плоского металопрокату.

- Розробити аналітичні моделі розрахунку зміння температурних параметрів прокатки для умов безперервних станів з можливістю використання установки CoilBox та станів Стеккеля.

- Отримати результати дослідження зміни температурного поля штаби при режимах ТМСР, яка охолоджується після пічної моталки на стані Стеккеля та запропонувати коригуючі заходи.

- Отримати результати комплексного дослідження властивостей мікролегованої низьковуглецевої марки сталі 06Г2ДБ (Х65) трубного призначення в умовах чорнової прокатки.

- Розробити рекомендації щодо механізму зменшення нерівномірності деформації по товщині заготовки при чорновій прокатці конструкційної марки сталі S355JR+AR для умов стану Стеккеля.

Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Результати досліджень можна рекомендувати до застосування на металургійних підприємствах які мають у своєму складі товстолистові та рулонні стани гарячої прокатки, а також в дослідженнях у науково-дослідних організаціях та інститутах. Результати дисертаційної роботи введено у навчальний процес при читанні курсів «Напрямки розвитку процесів ОМТ», «Процеси та машини обробки тиском» та «Проектування цехів» (довідка ДВНЗ «ПДТУ» від 25.09.2020 р.), а також при виконанні студентами дипломних проектів і випускних магістерських робіт.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих роботах

Основні наукові і прикладні результати роботи викладені в 79 публікаціях. Серед них: 23 статті у наукових фахових виданнях України, 7 статей у міжнародних журналах що входять до бази даних Scopus, 3 статті у виданнях, що не входять до переліку фахових, 27 робіт опубліковано в матеріалах міжнародних конференцій, 1 монографія, 3 колективні монографії, 3 патенти України та 12 патентів України на корисну модель.

Аналіз публікацій дає підставу вважати, що наукові висновки, результати та рекомендації, отримані в дисертаційній роботі, достатньо висвітлені в друкованих наукових працях.

Автореферат за змістом ідентичний основним положенням дисертаційної роботи та достатньо повно відображає основні результати здобувача.

Апробація результатів дисертаційної роботи

Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися та обговорювались на наукових конференціях та семінарах серед яких: Міжнародна конференція (МК) ФГУП «ЦНИИЧермет імені І. П. Бардина» «Сучасні тенденції розробки та виробництва сталей і труб для магістральних газів та нафтопроводів» (Москва, 2008 р.); Міжнародна науково-технічна конференція (МНТК) «Университетская наука – 2009–2012, 2014–2020» (Маріуполь, 2009–2012 рр., 2014–2020 рр.); VIII Конгрес прокатників (Магнітогорськ, 2010 р.); 9-та Міжнародна технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти» (Київ, 2018 р.); IV МНТК «Машини і пластична деформація металу» (Кам'янське, Дніпро, 2018 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-хімічні геотехнології» (Дніпро, 2018 р.); Наукова конференція «Сучасні технології в механіці» (Хмельницький, 2018 р.); I МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (Вінниця, 2019 р.); 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.); 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing «The Innovation Exchange» (Lutsk, Ukraine, 2019 р.); дисертацію докладено в повному обсязі на XXIII МНТК «Достижения и проблемы развития технологии и машин обработки давлением» (Краматорськ, 2020 р.), на науковому семінарі кафедри «ОМТ» ДВНЗ «ПДТУ» (Маріуполь, 2020 р), а також на засіданні Придніпровського наукового семінару при кафедрі «ОМТ» НМетАУ (2020).

Зауваження по дисертації

1. В першому розділі, при оцінці переваг термомеханічного процесу, не зроблене порівняння з властивостями прокату, отриманими способами термічної обробки.

2 В підрозділі 3.1 при моделюванні температурного поля бажано було обґрунтувати кількість розбиттів по ширині штаби, яка може впливати на точність розрахунку. В тому ж підрозділі слід було обґрунтувати ствердження о рівномірності температури металу по товщині штаби.

3 В підрозділі 3.2 не зрозуміло яким чином було визначено коефіцієнти апроксимації дослідних даних в формулах (3.61)...(3.65), так як ці коефіцієнти однозначно будуть впливати на результати розрахунку границі текучості.

4 Наведені в третьому розділі програмні комплекси з моделювання температурного поля та розробки технології термомеханічної прокатки бажано було описати у вигляді алгоритмів, методики або рекомендацій до постановки задачі.

5 Висновок 2 до розділу 3 носить констатуючий характер з розподілу температури по ширині штаби і потребує рекомендацій з доцільності

врахування цього фактору при розрахунках або рекомендацій з поліпшення температурних умов прокатки.

6 Результати скінченно-елементного моделювання (розділ 5) бажано було порівняти не тільки з результатами промислового експерименту, а й з результатами аналітичної моделі.

7 В п'ятому розділі дослідження рівномірності проникнення деформації виконано при певних умовах прокатки. При інших умовах прокатки результат з рівномірності проникнення деформації може бути іншим.

8 В розділах п'ять, шість та сім не наведено аналітичні моделі, за допомогою яких автор виконував розрахунки параметрів прокатки.

Висновок

Дисертаційна робота Курпе Олександра Геннадійовича «Розвиток наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском.

Дисертація є завершеною науковою працею, що містить вирішення наукової проблеми з розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей на товстостенових та широкоштабових станах на підставі розвитку наукових основ термомеханічної прокатки і розробки методик вдосконалення технології з різним конструктивно-структурним складом основного прокатного устаткування.

Дисертаційна робота містить не захищені раніше наукові положення.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п. 9, 10, 12 Постанови Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р., № 567 «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» (зі змінами, внесеними Постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р. і Наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р.), які висуваються до докторських дисертацій. Здобувач Курпе Олександр Геннадійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском.

Офіційний опонент

Завідувач кафедри автоматизованих металургійних машин та обладнання Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ), д.т.н., доцент

Е. П. Грибков

Підпис зав. каф. АММ, д-ра техн. наук, доцента Грибкова Е.П. засвідчую проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ)



М.А. Турчанін