Голові разової спеціалізованої вченої ради Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

доктору технічних наук, професору

Колосову Дмитру Леонідовичу

# ВІДГУК ОПОНЕНТА

**доктора технічних наук, професора Середи Бориса Петровича** на дисертаційну роботу **Козечко Валентина Івановича** «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство

# Загальна характеристика роботи

Повний обсяг роботи складає 119 сторінок, з яких 104 сторінки – основний текст. Робота складається з анотації, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, список використаних джерел налічує 131 найменування.

До розгляду подано дисертацію на здобуття ступеня доктора філософії та копії усіх опублікованих автором робіт, які відображають результати та зміст дослідження.

# Оцінка актуальності теми дисертації

Актуальність теми дисертації визначається її значним науковим та практичним значенням. Робота присвячена дослідженню процесів формування механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей залежно від товщини металопрокату. Це є важливим для вирішення проблем в будівельній індустрії, зокрема для зниження собівартості будівельних конструкцій, підвищення їхньої надійності та довговічності.

В роботі удосконалено теоретичні аспекти впливу товщини металопрокату на механізми руйнування та пластичну деформацію.

Запропоновані нові фізико-математичні моделі, які враховують особливості структури металу та його здатність до опору руйнуванню.

Результати роботи мають прикладне значення для розробки технологій виробництва сталі з поліпшеними властивостями, що знижує витрати на матеріали та підвищує економічну ефективність будівельних проектів.

Отримані результати впроваджено в освітній процес та у виробничу практику на підприємствах.

Суттєвим є те, що у роботі враховано необхідність підвищення конкурентоспроможності вітчизняного металопрокату в умовах глобального ринку.

Запропоновані підходи сприяють розширенню сфер використання низьковуглецевих сталей, особливо в умовах підвищених навантажень.

Таким чином, **дисертаційна робота Козечко Валентина Івановича** **є актуальною** не лише з наукового, але й з економічного та технологічного поглядів, сприяючи розвитку будівельної галузі та матеріалознавства.

# Оцінка наукових результатів дисертації

Наукове значення роботи полягає у кількісному та якісному визначенні взаємозв'язку між параметрами структури будівельних сталей, які формуються під час термічної обробки металопрокату різної товщини, параметрами відповідних поверхонь руйнування та ударною в'язкістю листового прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей. У ході виконання роботи удосконалено загально прийняту теорію зародження та розповсюдження в’язкого руйнування за рахунок аналізу параметрів відповідного структурного стану. Під час виконання роботи одержані наступні нові наукові результати:

1. Удосконалено енергетичні аспекти теорії зародження мікропор на поверхнях розділу між матрицею і частинками при в’язкому руйнуванні низьковуглецевих мікролегованих сталей з урахуванням товщини металопрокату (набуло подальшого розвитку). Розроблена концепція відрізняється урахуванням не тільки типу зв’язку частки з матрицею, а й аналізом хімічного складу частки, її розмірами та спроможністю формувати пори, тобто бути потенціальними місцем для зародження в’язкої тріщини.

2. Концепція зв’язку між розповсюдженням пластичної деформації та параметрами структурних складових (зроблено вперше). Запропонована фізико-математична модель враховує спроможність елементів структури низьковуглецевих мікролегованих сталей до опору розповсюдження в структурі пластичної деформації і, як наслідок, руйнування. Аналогічні моделі розповсюдження в’язкого руйнування зазначені факти не враховують.

3. Досліджено процес руйнування сталей у ферито-перлітному структурному стані з урахуванням товщини металопрокату з точки зору проходження тріщиною трьох послідовних стадій: зародження, повільного зростання та швидкого зростання (набуло подальшого розвитку). Отримані фізичні моделі враховують вплив геометричних розмірів та відсоткового вмісту структурних складових низьковуглецевих мікролегованих сталей на зародження (формування мікротріщин за квазікрихким механізмом руйнування) та розповсюдження руйнування (розподіл пластичної деформації по структурним складовим).

4. Побудовано та проаналізовано фізико-математичні моделі впливу параметрів структури на ударну в’язкість низьковуглецевих мікролегованих сталей з урахуванням товщини металопрокату (зроблено вперше). Запропонована концепція базується на результатах комплексних досліджень поверхонь зламів, відповідних дослідженнях структурного стану та теоретичному аналізу можливих механізмів, які працюють під час руйнування низьковуглецевих мікролегованих сталей.

# Оцінка практичного значення результатів роботи

Практичне значення роботи спрямовано на підвищення механічних властивостей і розширення областей застосування прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозалежностей між структурою та кінетикою розповсюдження тріщини при динамічних механічних руйнуваннях, а саме:

1. Розроблено фізико-математичні моделі визначення взаємозв’язку між параметрами структури та ударною в’язкістю металопрокату для будівельних металевих конструкцій (впроваджено в практику TOB «Ciнерджі Ер Енд Ді».

2. В роботі показано, що використання високоміцних високов’язких сталей з різними товщинами конструктивних елементів може призвести до зниження вартості готового виробу більш ніж на 20% в порівнянні з класичним варіантом компоновки, що є суттєвим результатом для економіки підприємства. (впроваджено на ТОВ «Катаріос Транс»)

3. Розроблено рекомендації щодо використання отриманих наукових результатів при розробці технологічних схем виробництва металопрокату різної товщини для будівельної галузі, які забезпечують отримання сталей з підвищеним рівнем механічних властивостей.

4. Отримані результати дослідження прийняті до уваги та увійшли до освітньо-наукової програми зі спеціальності 132 Матеріалознавство для підготовки докторів філософії.

5. Отриманні результати впроваджено у навчальний процес кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну НТУ «Дніпровська політехніка» при підготовці наступних дисциплін: «Експертна оцінка матеріалів і виробів», «Методи структурного аналізу матеріалів».

# Оцінка достовірності та обґрунтованості основних положень і висновків дисертації

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, мають надійне теоретичне обґрунтування та підтверджуються результатами численних експериментів.

Отримані наукові результати знайшли своє відображення у 4 статтях, опублікованих у фахових українських виданнях, 3 доповіді на міжнародній конференції, 1 статті індексованій у Scopus. Результати дослідження отримали широку апробацію на наукових форумах як всеукраїнського, так і міжнародного рівнів. Кількість, змістовність та обсяг опублікованих наукових праць повністю відповідають вимогам, що пред’являються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

# Оцінка змісту й оформлення дисертації

Дисертаційна робота написана українською мовою. В роботі використаний науковий стиль та загальноприйнята термінологія. Робота виконана в чіткій логічній послідовності відповідно до поставлених мети та задач досліджень.

У **вступі** до дисертації детально обґрунтовано актуальність обраної теми, чітко сформульовано мету дослідження та конкретні завдання, які необхідно вирішити для її досягнення. Наукова новизна та практична значущість отриманих результатів також знайшли своє відображення у вступній частині роботи. Надано детальну інформацію про опубліковані наукові праці та їхню апробацію.

У **першому розділі** розглядається роль маловуглецевих сталей у виробництві будівельних елементів, таких як балки, ферми, колони, ємності та інші конструкції. Показано економічну доцільність використання мікролегованих сталей завдяки їх високій пластичності та міцності. Описуються процеси термічної та термомеханічної обробки, що впливають на формування структури сталі. Приділено увагу нормалізації, загартуванню та відпуску. Аналізується виникнення і поширення тріщин у металі залежно від його товщини та структурного стану.

У **другому розділі** обґрунтовано використання сталі 10Г2ФБ різних товщин (від 16 до 100 мм) як основного матеріалу для досліджень. Включають металографічний аналіз, сканувальну електронну мікроскопію, механічні випробування (розтяг і ударний вигін), а також математичне моделювання. Показано важливість статистичного аналізу для інтерпретації експериментальних даних. Вивчено вплив хімічних елементів, особливо мікролегуючих елементів, на механічні властивості сталі та її здатність до деформації.

У **третьому розділі** показано, що зі збільшенням товщини металопрокату у структурі сталі змінюється співвідношення феритної та перлітної складових. Для прокату товщиною 16 мм співвідношення становить 70% фериту і 30% перліту, тоді як для прокату товщиною 100 мм частка фериту зростає до 80%, а перліту зменшується до 20%. Ці зміни обумовлені умовами охолодження під час виробництва. У сталях меншої товщини феритні зерна мають більш рівномірну поліедричну форму, тоді як у товстих листах ферит формує витягнуті колонії, що пояснюється неоднорідністю охолодження через більший об'єм металу.

Виявлено, що зі збільшенням товщини металопрокату форма цементитного каркасу перлітних колоній змінюється з сфероподібної на віялоподібну. Це пояснюється сповільненням охолодження у товстих листах, що впливає на морфологію перліту.

Встановлено, що феритна фаза у всіх досліджених зразках формується з правильними поліедричними зернами, а зародження нових фаз відбувається на поверхні зерен аустеніту та включень. У товстих зразках спостерігається збільшення розмірів цементитних пластин, що утворюються вздовж границь зерен.

В **четвертому розділі** показано, що зі збільшенням товщини металопрокату відбувається перехід від квазікрихкого до в’язкого механізму руйнування. Для тонких зразків (16 мм) руйнування відбувається за механізмом квазісколу, тоді як у товстих зразках (70–100 мм) переважає в’язке руйнування з ознаками значної пластичної деформації.

У тонких зразках поверхні руйнування мають гладкі фасетки із мінімальною кількістю пор. У зразках середньої товщини (20–50 мм) спостерігається локалізація пластичної деформації та збільшення в’язкої складової зламу. У товстих зразках з’являються округлі западини, що є наслідком злиття порожнин у процесі пластичної деформації.

Встановлено, що ключову роль у зародженні мікротріщин відіграють сульфіди марганцю та карбіди. Зародження пор здебільшого відбувається на поверхнях розділу між матрицею та частинками другої фази. Математичний аналіз показав, що залежність між вмістом хімічних елементів і ударною в’язкістю є функціональною.

Дослідження показали, що мікротріщини у тонких зразках переважно поширюються вздовж зерен фериту, тоді як у товстих зразках спостерігається злиття пор і розвиток тріщин через пластичну деформацію.

У **п’ятому розділі** дослідження показали, що збільшення товщини прокату зумовлює покращення в’язкості руйнування та здатності до пластичної деформації, але водночас призводить до зростання неоднорідності структури. Це впливає на рівномірність механічних властивостей по перерізу. Показано, що використання прокату різної товщини у конструкціях дозволяє знизити масу та металоємність виробів без втрати їх несучої здатності. Це досягається шляхом раціонального розподілу матеріалу відповідно до навантажень, які сприймають окремі елементи конструкцій.

Застосування прокату різної товщини дозволяє зменшити собівартість готових будівельних виробів більш ніж на 20% у порівнянні з класичними варіантами конструкцій. Основні фактори економії: зниження витрат на матеріали, транспортування, монтаж та обробку.

Розроблено рекомендації для проектування будівельних металоконструкцій із використанням прокату різної товщини. Зокрема, запропоновано використовувати модифікації сталей із покращеними механічними властивостями для зниження ваги конструкцій.

Результати математичного моделювання підтверджують можливість використання підходу варіативної товщини для створення сучасних металоконструкцій. Отримані залежності між товщиною, міцністю та пластичністю матеріалу демонструють високу кореляцію і можуть бути використані для оптимізації виробництва.

# Зауваження до дисертаційної роботи

1. Хоча в роботі згадується вплив мікролегуючих елементів на формування ферито-перлітної структури, детальний аналіз морфології включень (розмір, форма, розташування) та їхнього впливу на мікроструктуру і поведінку під навантаженням відсутній. Це обмежує розуміння механізмів впливу мікролегуючих елементів на структуру і, відповідно, на механічні властивості сталі.

2. У роботі недостатньо розглянуто, як змінюється вплив мікролегуючих елементів залежно від технологічних умов виробництва (температура і швидкість охолодження, тривалість термічної обробки). Такі дослідження могли б краще розкрити зв’язок між хімічним складом, процесом виробництва і кінцевими властивостями сталі.

3. Хоча в роботі розглянуто вплив хімічного складу сталі на її властивості, взаємозв’язок між мікролегуючими елементами і кінцевими характеристиками матеріалу викладено недостатньо деталізовано.

4. З роботи не ясно які рекомендації надано для практичного застосування результатів роботи.

5. Деякі графіки та таблиці містять недостатньо підписів або пояснень, що може ускладнювати розуміння представлених даних.

6. **Розділ 4 стор. 81 рис. 4.9. та 4.10** не дуже якісні рисунки. Потрібно було б використати більш чіткій рисунки.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

# Висновок про дисертаційну роботу

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, ознайомившись із науковими публікаціями та дисертацією В.І. Козечко, відзначаю відсутність порушень академічної доброчесності.

Вважаю, що дисертація Козечко Валентина Івановича на тему «Формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей в залежності від товщини металопрокату», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство, є завершеним науковим дослідженням, яке вирішує актуальну задачу підвищення ефективності використання низьковуглецевих мікролегованих сталей у будівельних металоконструкціях шляхом встановлення залежності між товщиною металопрокату, його мікроструктурою та механічними властивостями.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені наказом МОН України №40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Здобувач Козечко Валентин Іванович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

# Опонент:

доктор технічних наук, професор,

директор науково-дослідного центру

«Матеріалознавства та інноваційних

технологій» ДДТУ, завідувач кафедрою

автомобілів та транспортно-логістичних

систем Дніпровського державного

технічного університету Борис СЕРЕДА

Підпис доктора технічних наук, професора Бориса СЕРЕДИ засвідчую

Учений секретар ДДТУ Людмила СОРОКІНА