

Спеціалізованій вченій раді Д 08.085.02  
при Державному вищому навчальному  
закладі «Придніпровська державна  
академія будівництва та архітектури»

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Бекетова Олександра Вадимовича** на тему:  
**«Теоретичні основи формування субструктури переохолодженого  
аустеніту та механічних властивостей мікролегованих будівельних  
сталей»**, яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у  
спеціалізованій вченій раді Д 08.085.02 за спеціальністю 05.02.01 –  
матеріалознавство

### **Актуальність обраної теми.**

Основний резерв підвищення ефективності застосування прокату високої якості з низьколегованих сталей – вдосконалення нормативної бази при поставці прокату, при проектуванні та виготовленні конструкцій, а також вдосконалення методів випробувань на всіх стадіях виготовлення металу й конструкцій. Технічні вимоги до сталей для металевих конструкцій різноманітні й часто суперечливі. Забезпечення загального високого комплексу робочих властивостей прокату впливає з необхідності створення споруд як з високою експлуатаційною надійністю, так і з економічною ефективністю. В остаточному підсумку загальні вимоги визначають хімічний склад сталей, методи виробництва, способи й технологію зміцнюючої обробки, а також методи виготовлення конструкцій на заводах і в умовах монтажу.

У цілому, вимоги високих споживчих властивостей можна звести до наступних груп: вимоги високого комплексу експлуатаційних властивостей (опір матеріалу статичним, динамічним, змінним навантаженням при її роботі в елементах конструкцій, у тому числі в умовах впливу негативних кліматичних температур і природних агресивних середовищ); вимоги гарної технологічності (зварюваність і здатність до холодної деформації, оброблюваність матеріалів сучасними високопродуктивними способами, вимоги економічної ефективності).

Саме цьому, представлена дисертаційна робота, спрямована на розробку нових теоретичних положень, методичних і технологічних підходів та практичних рекомендацій щодо підвищення комплексу властивостей прокату з низьковуглецевих мікролегованих будівельних сталей, що виробляються вітчизняними підприємствами для сучасного висотного і великопрольотного будівництва, є актуальною.

**Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.**

*Роз. № 84 - 05 / 125*  
*23.04.2021*

Наукові положення, результати та висновки роботи базуються на використанні фундаментальних основ матеріалознавства; праць визнаних учених і фахівців у галузі металознавства і матеріалознавства; застосування сучасних добре апробованих методів і методик дослідження, зокрема просвічуючої та растрової електронної мікроскопії, апаратури, обладнання, лабораторного устаткування, сучасної обчислювальної техніки та програмного забезпечення; математичного апарату теорії обробки масивів експериментальних даних.

Достовірність наукових положень, висновків і результатів доведено кількісною та якісною мікроскопією, збіжністю результатів аналітичних і експериментальних досліджень, чітким трактуванням одержаних результатів, які не суперечать загальноприйнятим науковим положенням, а також досвідом практичного використання одержаних результатів та їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі матеріалознавства і обробки матеріалів ДВНЗ ПДАБА за планами науково-дослідних робіт та фундаментальних досліджень у рамках тем (де здобувач був виконавцем і відповідальним виконавцем): «Теоретичні основи отримання наноструктурованих елементів та їх вплив на комплекс властивостей будівельних сталей» (№ ДР 0103U005240, 0113U000127, 2013...2015 рр.); «Теоретико-експериментальне дослідження механізмів впливу нанорозмірних параметрів структури на закономірності руйнування низьковуглецевих мікролегованих сталей» (№ ДР 0106U011369, 0116U000219, 2016...2018 рр.); «Дослідження структури та властивостей, прогнозування якісних характеристик та розробка газотермічних покриттів конструкційних матеріалів» (№ ДР 0211U006483, 2011...2015 рр.); «Дослідження взаємозв'язку між механізмами формування структури та комплексом властивостей будівельних матеріалів» (№ ДР 0113U000775, 0116U004538 2016...2020 рр.).

#### **Загальна характеристика змісту дисертації.**

Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 268 найменувань. Дисертація викладена на 341 сторінках машинописного тексту, обсяг основного тексту дисертації складає 267 сторінок та містить 128 рисунків, 41 таблицю.

**Вступ.** Відображено сутність науково-прикладної проблеми та актуальність теми дослідження, сформульовано мету, задачі об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, відзначено особистий внесок здобувача в наукові праці, опубліковані у співавторстві, представлено дані про апробацію результатів дисертації.

**Розділ 1.** Автором критично проаналізовано технології виробництва товстолистого прокату з низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей підвищеної міцності, у тому числі технології контрольованої прокатки. Відзначено внесок у розробку методів підвищення механічних

характеристик сталевих прокатів провідних учених України та зарубіжних країн.

Виконаний аналіз інформаційних джерел дозволив автору запропонувати класифікацію за розмірною ознакою елементів структури низьковуглецевих, низьколегованих сталей. Проаналізовано моделі формування перлітної складової в низьковуглецевих низьколегованих сталей. Показано, що перлітна реакція в сталях доєвтектоїдного складу може відбуватися при концентрації вуглецю менше 0,8%.

Науково обгрунтовані резервні можливості та показані принципові напрями підвищення механічних властивостей листового прокату шляхом отримання заданого структурного стану за рахунок удосконалення технології гарячої та контрольованої прокатки.

**Розділ 2.** Наведено сучасні методи і методики, застосовані в роботі для отримання достовірних результатів, приведено хімічний склад та механічні властивості сталей 10Г2ФБ, 09Г2С, 10ХСНД, Ст3 та 06Х1, які було використано у якості матеріалу для дослідження. Під час проведення досліджень використано сучасні методи, а саме: оптичну мікроскопію; растрову електронну мікроскопію; дифракційну електронну мікроскопію; загальні методи кількісного та напівкількісного металографічного аналізу; традиційні методи статичних та динамічних випробувань; математичний апарат теорії обробки масивів експериментальних даних.

**Розділ 3.** Проведені комплексні теоретичні та детальні експериментальні дослідження структурного стану низьковуглецевих, низько-, мікро- та нелегованих сталей після штатних технологічних схем виробництва, а саме: продемонстровані та інтерпретовані типові ансамблі з участю спеціальних низькоенергетичних границь у феритній складовій; проаналізовано тип орієнтаційних співвідношень в колоніях перліту між феритом і цементитом; досліджено відмінності у морфологічному каркасі цементитної складової колоній перліту.

Проведений комплекс досліджень дозволив автору запропонувати модель формування колонії квазієвтектоїду в низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталях, яка описує стадії еволюції колонії від зародження до повного формування морфологічної будови та враховує дефекти, які присутні в аустеніті. На підставі комплексного аналізу отриманих залежностей та даних мікроструктурного аналізу автором виділено три окремі морфологічні форми цементитного каркасу колоній квазієвтектоїду: стрічковий, зигзагоподібний та віяловий. Використовуючи класифікацію перлітних структур за типом цементитного каркасу, проаналізовано тип і властивості границь та підраховано їх поверхневу енергію.

Науково обгрунтовано, що для аналізу впливу нанорозмірних елементів на комплекс міцностних властивостей низьковуглецевих сталей необхідним є дослідження

зв'язку: структура металопрокату - тонка структура металопрокату - нанорозмірні елементи в структурі металопрокату – розповсюдження пластичної деформації – зародження руйнування.

**Розділ 4.** Наведено дані щодо досліджень впливу морфологічних особливостей структурного складу на формування комплексу механічних властивостей низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей. Сумісний аналіз результатів вимірювання мікротвердості з даними мікроструктурного аналізу дозволив встановити, що, з точки зору міцності, найбільш вигідними є колонії квазіевтектоїду з цементитним каркасом стрічкового типу.

Представлено результати мікроструктурних досліджень щодо поширення пластичної деформації в структурі сталі 06X1. Встановлено, що протидія пластичній деформації відбувається в суміжних зонах. Досліджено роль границь зерен при розповсюдженні пластичної деформації та зародженні руйнування. При цьому, слід зазначити що колонії квазіевтектоїду майже не сприймають пластичну деформацію. Аналогічний комплекс досліджень було проведено на сталях 10Г2ФБ, 09Г2С, 10ХСНД та Ст3. Відповідні результати підтверджують дані, які було отримано для сталі 06X1.

Виходячи з морфологічних особливостей цементитного каркасу колоній квазіевтектоїду, автором запропоновано два типи руйнування перлітної складової низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей які відрізняються розподілом прикладеного навантаження на границі між пластинками фериту та цементиту.

**Розділ 5.** Наведено результати аналізу взаємозв'язку між параметрами технологічних схем, які використовуються на металургійних комбінатах України, та основними механічними властивостями металопрокату. Для отримання відповідних кількісних залежностей, автором було застосовано математичний апарат теорії обробки масивів експериментальних даних, а саме: попарний кореляційний аналіз, приватні коефіцієнти кореляції, однофакторний та багатофакторний дисперсійний аналіз, однопараметричний та багатопараметричний регресійний аналіз. Аналіз отриманих математичних моделей показав, що для контрольованої прокатки підвищення температури початку прокатки в чистовій кліті призведе до підвищення характеристик міцності. Відповідно, для технологічної схеми гарячої прокатки до аналогічного ефекту призведе розширення температурного діапазону гарячої деформації, тобто підвищення дрібності деформації та зниження температури кінця прокатки.

Аналіз побудованих математичних моделей дозволив автору провести лабораторну прокатку зразків зі сталі Ст3 та 10Г2ФБ, яка імітує сумарну деформацію в чистовій кліті, яка відбуваються на металургійних комбінатах при виготовленні товстого листа. При цьому, температура початку деформації була обрана таким чином, щоб імітувати кінець деформації в черновій кліті за режимами, які запропоновано в технологічній схемі контрольованої прокатки. Як наслідок, автором показано що зниження температури кінця

прокатки до нижньої границі міжкритичного інтервалу температур з одночасною деформацією, дозволить отримати в структурі металопрокату, виготовленого з обох сталей, аустенітно-феритний конгломерат з підвищеною щільністю дислокацій в аустеніті. Таким чином, фазове перетворення аустеніт-перліт призведе до формування в структурі сталі квазіевтектоїду з найбільш вигідною, с точки зору міцності, формою цементитного каркасу.

**Розділ 6.** На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблено новий науково обґрунтований режим виробництва прокату з низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей, що заснований на формуванні структурного стану, який характеризується дисперсною феритною складовою та перлітними колоніями з заданою морфологією цементитного каркасу.

Основною ідеєю запропонованої технологічної схеми є збереження стабільної полігональної структури аустеніту, яка формується під час деформації в міжкритичному інтервалі температур. Це призводить до формування розвиненої ферито-перлітної структури з заданим типом цементитного каркасу перлітної складової. За рахунок цього, виникає можливість підвищити і стабілізувати властивості міцності не тільки в сталях, які містять карбідоутворюючі елементи, але і матеріалах без додаткового легування.

Експериментальну перевірку запропонованого режиму здійснювали на сталях марки Ст3 (без карбонітридного зміцнення) та 10Г2ФБ (з карбонітридним зміцненням). Проведений комплекс металографічних досліджень показав, що для обох сталей спостерігається зменшення геометричних розмірів структурних складових при застосуванні технологічної схеми безперервної контрольованої прокатки порівняно зі штатними режимами виробництва. Аналіз механічних властивостей сталей показує, що застосування безперервної контрольованої прокатки призводить до підвищення характеристик міцності металопрокату порівняно з вихідним станом. При цьому, пластичні властивості залишаються на рівні, що задовольняє вимогам діючої у будівельній галузі нормативній документації.

Проаналізовано вплив елементів структури, які формуються під час безперервної контрольованої прокатки, на механізм розповсюдження пластичної деформації та зародження руйнування. Отримані результати показують, що деформація колоній квазіевтектоїду з цементитним каркасом стрічкової морфології починається при механічних напруженнях, які майже відповідають тимчасового опору розриву. При цьому, міжфазні границі ферит-перліт блокують розповсюдження пластичної деформації внаслідок чого стають місцями концентрації напружень. Встановлено, що руйнування структурних складових відбувається за двома окремими механізмами: перший – структурні складові розщеплюються після незначної пластичної деформації; другий – структурні складові витягуються в напрямку дії пластичної деформації, що призводить до формування мікротріщин.

**Найбільш важливими результатами роботи, які мають наукову новизну, слід вважати:**

- вперше для низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей на підставі аналізу тонкої структури перлітних колоній встановлено основні закономірності розпаду деформованого нерекристалізованого аустеніту;
- отримали подальший розвиток теоретичні аспекти щодо збереження дислокаційної субструктури деформованого аустеніту низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей в верхній частині міжкритичного інтервалу температур;
- вперше експериментально обґрунтована концепція збереження дислокаційної субструктури аустеніту до нижньої границі міжкритичного інтервалу температур при контрольованій прокатці низько-, мікро- та майже нелегованих сталей;
- набула подальший розвиток концепція інтерпретації ансамблів за участю спеціальних низькоенергетичних границь у структурних складових ферито-перлітних сталей;
- вперше запропоновано модель перлітного перетворення у просторі з урахуванням морфології деформованого аустеніту;
- вперше встановлено основні етапи розвитку колоній квазіевтектоїду під час розпаду аустеніту низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей;
- отримала подальший розвиток теорія зародження руйнування на поверхнях розділу з урахуванням вільної енергії та спроможністю поверхонь розділу бути потенціальним місцем для зародження тріщини;
- вперше встановлено взаємозв'язок між розповсюдженням пластичної деформації та кількістю і типом структурних складових. Запропонована фізична модель, що враховує спроможність структурної складової до блокування пластичної деформації.

**Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження.**

Практична цінність роботи полягає в розробці рекомендацій з вдосконалення технології виробництва металопрокату з низьковуглецевих, низько-, мікро- та нелегованих сталей в умовах вітчизняних підприємств:

- для низько-, мікро- та майже нелегованих сталей запропоновано температурно-деформаційний режим гарячої прокатки в міжкритичному інтервалі температур;
- запропоновано для промислового використання технологічну схему прокатки низьковуглецевої низьколегованої сталі зі збереженням полігональної структури фериту;
- запропоновано для промислового використання технологічну схему виробництва листового прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей з формуванням полігонізованої субструктури аустеніту;
- для низьковуглецевих низьколегованих сталей розроблена та реалізована технологічна схема прокатки, яка направлена на

- збереження дислокаційної субструктури аустеніту, фериту та перліту;
- запропоновано для промислового виробництва прокату з низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей технологічну схему, яку засновано на збереженні стабільної полігональної структури аустеніту, яка формується під час деформації в міжкритичному інтервалі температур і наступною безперервною деформацією, що забезпечує формування розвиненої ферито-перлітної структури з заданим типом цементитного каркасу перлітної складової;
  - результати, отримані в роботі, було впроваджено в навчальний процес кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»;
  - розроблено методика визначення взаємозв'язку між нанорозмірними елементами тонкої структури та ударною в'язкістю металопродукату для будівельних металевих конструкцій.

**Повнота викладення результатів в опублікованих працях. Апробація результатів дисертації.**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 45 наукових працях, з яких: 7 статей у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних, 24 статті у фахових виданнях, 9 – в матеріалах міжнародних наукових конференцій, 5 патентів України. Основний зміст дисертації є достатньо висвітленим та апробований на 9 науково-практичних конференціях.

Опубліковані праці за темою дисертації містять результати особистої роботи автора на окремих етапах дослідження і відображають основні положення і висновки дисертаційної роботи.

**Відповідність дисертації та автореферату встановленим вимогам.**

Дисертація і автореферат написані грамотною технічною мовою, на високому науковому рівні, а стиль викладення в них результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує належну доступність їх сприйняття.

Дисертаційна робота і автореферат оформлені у відповідності до діючих вимог і відповідає затвердженому МОН України паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство. Дисертаційна робота містить наукові положення, які раніше не були захищені, і нові науково-обґрунтовані результати досліджень та задовольняє вимогам пп. 1, 2, 3, 7, 8 паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Автореферат за змістом є ідентичним основним положенням дисертаційної роботи.

**Основні зауваження щодо змісту дисертації.**

Разом з високою науковою і практичною оцінкою представленої дисертаційної роботи, слід навести наступні зауваження:

1. Загально відомо, що сталь марки Ст3 виготовляється по технологічній схемі гарячої прокатки. Якщо при виготовленні сталь Ст3 застосовувати технологічну схему контрольованої прокатки, то це призведе до підвищення собівартості готової продукції. Таким чином, не зрозуміло чи має сенс застосовувати запропоновану технологію при виготовленні нелегованих сталей.
2. В розділі 3 автором інтерпретуються ансамблі спеціальних низькоенергетичних границь у фериті. При цьому не відзначено, що такі границі чинять позитивний вплив не лише на механічні властивості, а також на корозійну стійкість прокату, що особливо актуально для будівельних конструкцій, які експлуатуються в умовах відкритої атмосфери.
3. Розділ 5. Автором не обґрунтовано, чому для проведення статистичної обробки обрано саме такі математичні методи теорії обробки масивів експериментальних даних.
4. Розділ 6. З тексту дисертаційної роботи не зрозуміло, чим саме відрізняються технологічні схеми полігонізаційної контрольованої прокатки, яку було запропоновано раніше, та безперервної контрольованої прокатки, яку розроблено автором.
5. При викладенні результатів досліджень у ряді випадків автор не приводить конкретні значення досягнутих показників, а обмежується висловами: „збільшується”, „покращується”, тощо.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

**Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.**

Загалом дисертаційна робота та автореферат оформлені акуратно, викладені в логічній послідовності, написані технічно та стилістично грамотною мовою із залучанням сучасної науково-технічної термінології. Основні розділи дисертаційної роботи достатньо повно проілюстровані рисунками та таблицями, відображають усі отримані наукові та експериментальні положення. Загальні висновки роботи відповідають завданням дослідження і меті роботи. Зміст автореферату цілковито відповідає тексту та положенням дисертаційної роботи.

Наукова новизна і результати, які виносяться на захист, повністю відповідають темі, меті та існуючій науково-прикладній проблемі. За темою, змістом та рівнем проведення теоретичних і експериментальних досліджень дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Дисертаційна робота **Бекетова Олександра Вадимовича «Теоретичні основи формування субструктури переохолодженого аустеніту та механічних властивостей мікролегованих будівельних сталей»** є завершеною кваліфікаційною науковою працею у якій вирішено важливу науково-прикладну проблему науково обґрунтованого підвищення комплексу властивостей високоміцного товстолистового прокату з



низьковуглецевих низко-, мікро- та нелегованих сталей до рівня, необхідного для сучасного висотного і великопрольотного будівництва.

Аналіз матеріалів дисертації, її новизна, висновки і рекомендації дозволяють стверджувати про відповідність вимогам пунктів 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України за № 567 від 24 липня 2013 р., зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 р. за № 656 та від 30.12.2015 р. за № 1159, а її автор Бекетов Олександр Вадимович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент

Директор Інститут чорної металургії  
ім. З. І. Некрасова НАН України  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник



О. І. Бабаченко