

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.

Дисертаційна робота Бекетова А.В. присвячена вирішенню важливої
науково-прикладної проблеми отримання металопрокату для зварних
будівельних конструкцій підвищеного рівня властивостей.

Зараз перед будівельниками України гостро постала проблема побудови
багатоповерхових споруд. Це пов'язано з тим, що у центральних частинах
мегаполісів площі під будівництво дуже обмежені, а вартість землі різко
збільшилась. Одним з можливих шляхів розв'язання цієї проблеми є
підвищення поверховості будівель, що дозволить збільшити щільність
заселення. Вирішення цієї проблеми стане можливим, якщо при виготовленні
металевих конструкцій для каркасів таких споруд будуть застосовані нові
високоміцні, економнолеговані, добре зварювальні сталі. У першу чергу, це
пов'язано з тим, що будівництво споруджень, висотою більш ніж 30
поверхів, з використанням тільки залізобетонних конструкцій не можливо.

При цьому, необхідною умовою, що забезпечить широке використання
таких сталей при багатоповерховому будівництві є забезпечення певного
комплексу механічних властивостей - високої міцності, пластичності, ударної
в'язкості при низьких температурах, високий спротив атмосферної корозії та
крихкому руйнуванню при мінімальної анізотропії властивостей у вздовж,
поперек та по товщині прокату.

Дисертаційна робота, яка спрямована на вирішення проблеми підвищення
механічних властивостей товстолистового металопрокату шляхом розробці
нової технології виробництва, яка може бути застосована на вже існуючому
на металургійних підприємствах України обладнанню безумовно є
актуальною та своєчасною.

Вас. № 97 - 25/119

20.04.2001

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

Обґрунтованість наукових положень, висновків і результатів забезпечено використанню у роботі праць визнаних учених і фахівців у галузі прикладного матеріалознавства; застосуванню добре апробованих методів дослідження, зокрема методів дослідження тонкої структури матеріалів, для формування передумов, обмежень, припущень і гіпотез, прийнятих при розробці методів та методик, теорії ймовірностей і математичної статистики, кореляційного і регресійного аналізів для відбору, обробки та аналізу вихідних даних.

Достовірність наукових положень, висновків і результатів доведено збіжністю результатів аналітичних і експериментальних досліджень, використанням в експериментальних дослідженнях сучасних методів і методик, апаратури, обладнання, лабораторного устаткування, сучасної обчислювальної техніки та програмного забезпечення, чітким трактуванням одержаних результатів, які не суперечать загальноприйнятим науковим положенням, а також досвідом практичного використання одержаних результатів та їх апробацією на наукових міжнародних науково-практичних конференціях. Практична апробація одержаних результатів в проектно-будівельних організаціях підтвердила їх адекватність реальному процесу.

Отже, наукові положення, висновки і результати, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованим та достовірними.

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, в яких 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.

У вступі 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.

У першому розділі автором критично проаналізовано технології виробництва товстолистового прокату з низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей підвищеної міцності, моделі формування перлітної складової в низьковуглецевих низьколегованих сталей, загальні концепції теорії зернограничної будови полікристалів.

Автором показано, що сталі, які зараз застосовуються при виготовленні будівельних металевих конструкцій не завжди відповідають вимогам сучасного будівництва, оскільки вони мають високу ступень легування та високу вартість. При цьому, дисертант вважає, що одним з можливих шляхів розв'язання цієї проблеми є використання в будівництві низьковуглецевих мікролегованих сталей при умові покращення їх властивостей за рахунок корегування структурного стану.

У другому розділі наведено матеріал, методи і методики, застосовані в роботі для проведення досліджень.

У роботі використано сучасні методи дослідження структури, тонкої структури та комплексу властивостей низьковуглецевих, низько-, мікро- та нелегованих сталей, а саме: загальні методи кількісного та напівкількісного металографічного аналізу з застосуванням оптичного мікроскопу Neophot 20; растрову електронну мікроскопію з застосуванням скануючого електронного мікроскопу РЕМ-106И; дифракційну електронну мікроскопію з застосуванням трансмісійного електронного мікроскопу ЕМ-125К. Для визначення комплексу властивостей застосовувались традиційні методи статичних та динамічних випробувань. З метою отримання кількісних залежностей між параметрами процесів, які досліджувались та побудови відповідних фізико-математичних моделей застосовувався математичний апарат теорії обробки масивів експериментальних даних, а саме: первинна статистична обробка, кореляційний аналіз, одно та багатofакторний

дисперсійний аналізи, одно та багатофакторний регресійний аналіз; квазіньютонівський метод перевірки адекватності отриманих моделей.

У третьому розділі представлено результати дослідження мікро та тонкої структури складових, що формуються в низьковуглецевих низьколегованих сталях під час дифузійного механізму перетворення аустеніту.

На підставі дослідження зернограничної структури встановлено наявність спеціальних низькоенергетичних границь у феритній складовій низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей 10Г2ФБ, 09Г2С, Ст3, 06Х1 та оцінено відсоткове співвідношення різних типів границь.

Аналіз тонкої структури продуктів перетворення аустеніту показав: між феритом та цементитом в колоніях квазіевтектоїду виконуються орієнтаційні співвідношення Пітча та Ісаїчева; кристали евтектоїдного і доевтектоїдних фериту розподілені великокутовими границями.

На підставі отриманих даних автором запропоновано фізичну модель формування колонії квазіевтектоїду в низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталях. На підставі проведеного комплексу досліджень здійснено класифікацію колоній квазіевтектоїду за формою та властивостями цементитного каркасу на: стрічкові, колонії з пластинами зигзагоподібного типу, віялові.

У четвертому розділі наведено результати досліджень впливу морфологічних особливостей структурного стану на комплекс властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей.

Досліджено взаємозв'язок між морфологічним типом колонії перліту та її мікротвердістю. При цьому, як свідчать отримані результати, найвищу мікротвердість мають колонії стрічкового типу.

Автором доведено, що, при розповсюдженні, пластична деформація створює періодично неоднорідну зміцнену середу, яка буде визначати напрям розвитку тріщини. Як наслідок, за рахунок блокування пластичної деформації, можливо утворення великої кількості мікротріщин, які зрештою об'єднуються, утворюючи поверхню зламу зі зміною напрямку розвитку від зерна до зерна. Проведений комплекс досліджень дозволив запропонувати модель руйнування колоній квазіевтектоїду. Дана концепція базується на припущенні о неоднаковому сприйманні зовнішнього навантаження структурними складовими – евтектоїдним феритом та цементитом. Це припущення дало змогу при розробці моделі руйнування перлітної складової застосувати загальні концепції, які використовуються при аналізі руйнування волокнистих композиційних матеріалів. Розроблена модель дозволяє з'ясувати загальний вид областей руйнування колоній квазіевтектоїду.

У п'ятому розділі представлено результати досліджень по впливу параметрів виробництва на комплекс властивостей низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей.

Аналіз особливостей процесів структуроутворення, які відбуваються в металопрокаті з низьковуглецевих низьколегованих сталей при застосуванні найбільш поширених технологічних схем виробництва: гарячої та контрольованої прокатки показав, що ефективний і стабільний вплив деформації на структуру низьковуглецевих низьколегованих сталей визначається наявністю і величиною трьох температурних інтервалів, обмежених критичними точками перетворення і температурами рекристалізації деформованого аустеніту.

З застосуванням математичного апарату теорії обробки масивів експериментальних даних встановлено взаємозв'язок між параметрами технологічних схем (гаряча прокатка та контрольована прокатка) та основними механічними властивостями металопрокату. На підставі проведеного комплексу статистичних досліджень автором побудовано відповідні математичні моделі. Перевірка адекватності отриманих моделей здійснювалась графічними методами і показала високу збіжність отриманих результатів. Аналіз моделей показав, що підвищення температури початку чистової прокатки (для контрольованої прокатки) призведе до підвищення рівня міцностних характеристик. Для технологічної схеми гарячої прокатки позитивний вплив на комплекс властивостей буде оказувати розширення температурного діапазону гарячої деформації.

Показано, що зниження температури кінця прокатки до нижньої границі міжкритичного інтервалу температур з одночасною деформацією дозволить отримати в структурі металопрокату аустенітно-феритний комплекс з підвищеною щільністю дислокацій. Таким чином, фазове перетворення аустеніт-перліт призведе до формування в структурі сталі квазіевтектоїду з найбільш вигідною, с точки зору комплексу властивостей, формою цементитного каркасу. Таким чином автором доведено можливість корегування процесів формування структурних і субструктурних компонентів шляхом безперервного деформування в міжкритичному інтервалі температур. При цьому, зниження температури кінця гарячої прокатки до нижньої границі міжкритичного інтервалу дозволить додатково покращити та стабілізувати комплекс механічних характеристик прокату для будівельних конструкцій.

У шостому розділі наведено результати досліджень щодо розробці удосконаленого режиму прокатки низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей.

Автором запропоновано схему виробництва, яку засновано на збереженні стабільної полігональної структури аустеніту, яка формується під час деформації в між критичному 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 міцнісні властивості не тільки в сталях, які містять карбідоутворюючі елементи, але і матеріалах без додаткового легування.

Аналіз даних металографічних досліджень показав, що після запропонованої технологічної схеми в структурі усіх досліджуваних сталей присутня дрібнозерниста ферито-перлітна структура. При цьому, спостерігається підвищення міцносних характеристик металопрокату порівняно з вихідним станом зі збереженням пластичних властивостей на рівні, що задовольняє вимогам діючої у будівельній галузі нормативній документації.

Проведений комплекс досліджень поведінки матеріалу під дією зовнішнього навантаження показав, що пластична деформація розподіляється не рівномірно, а концентрується переважно у зернах доєвтектоїдного фериту. У якості бар'єрів для розповсюдження виступають між фазні границі перліт-ферит.

Встановлено, що руйнування низьковуглецевих, низько-, мікро- та нелегованих сталей після безперервної контрольованої прокатки можливо за двома окремими механізмами: перший – структурні складові подрібнюються після незначної пластичної деформації; другий – структурні складові витягуються в напрямку дії пластичної деформації і формують поверхню руйнування волокнистого типу.

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

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше встановлені основні теоретичні закономірності розпаду деформованого нерекристалізованого аустеніту на підставі аналізу тонкої структури цементитного каркасу колоній квазієвтектоїду, аналізу відмінностей в морфології перлітних колоній низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей широкого спектру технологій виробництва товстолистового прокату.

2. Отримали подальший розвиток загальні концепції теорії збереження дислокаційної субструктури деформованого аустеніту низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей в верхній частині міжкритичного інтервалу температур.

3. Вперше науково обґрунтовано концепцію збереження дислокаційної субструктури аустеніту до нижньої границі міжкритичного інтервалу температур при контрольованій прокатці. Це реалізується шляхом гарячої прокатки в міжкритичному інтервалі температур, яка призводить до формування наддрібної структури деформованого фериту та перліту, характерною особливістю якої є відсутність ферито-перлітної смугастості.

4. Отримали подальший розвиток дослідження щодо особливостей морфологічної будови нанорозмірних елементів в феритній складовій низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей на підставі аналізу та інтерпретації ансамблів за участю спеціальних низькоенергетичних границь у структурних складових сталей.

5. Вперше на підставі аналізу тонкої структури продуктів дифузійного перетворення деформованого аустеніту низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей, встановлення потенційних місць зародження та загальних принципів росту перлітних колоній запропоновано модель перлітного перетворення у просторі з урахуванням морфології деформованого аустеніту.

6. Вперше встановлено основні етапи розвитку колоній квазієвтектоїду. Розроблена концепція базується на аналізі загальних закономірностей зросту перлітних колоній, а саме на тому, що колонії перліту в процесі росту зазнають кілька морфологічних переходів: спіральний двофазний зародок → розростання пластин і дефектів – стійких щілин → перехід пластинчастого цементиту в стрічковий → перетворення стрічок у стрижні.

7. Отримали подальший розвиток енергетичні аспекти теорії зародження руйнування на поверхнях розділу структурних складових низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей. Удосконалення загальновідомих принципів полягає в аналізі спроможності поверхонь розділу бути потенціальними місцем для зародження тріщини.

8. Вперше встановлено взаємозв'язок між розповсюдженням пластичної деформації та кількістю і типом структурних складових. Отримана модель враховує спроможність структурних складових до блокування пластичної деформації.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження.

Практична цінність роботи полягає в:

1. Запропоновано температурно-деформаційний режим гарячої прокатки в між критичному інтервалі температур. Ця концепція базується на збереженні дислокаційної субструктури аустеніту та фериту аж до нижньої границі міжкритичного інтервалу температур. В той же час, гаряча прокатка в міжкритичному інтервалі температур призводить до підвищення міцностних властивостей в трьох напрямках, підвищення ударної в'язкості, та зниження ризику розшарування. Ця концепція реалізована для низько-, мікро- та майже нелегованих сталей.

2. Розроблено та запропоновано для промислового використання технологічну схему прокатки низьковуглецевої низьколегованої сталі зі збереженням полігональної структури фериту, яка включає нагрів та витримку слябів, чорнову і чистову прокатки до потрібної товщини листа, примусове охолодження до температури 500°C та подальше уповільнене охолодження.

3. Розроблено та запропоновано для промислового технологічну схему виробництва листового прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей з формуванням полігонізованої субструктури аустеніту, що включає нагрів та витримку слябів, зниження температури кінця чорнової прокатки шляхом підвищення дрібності деформації до 850°C, наступне прискоренне охолодження до температур початку чистової прокатки.

4. Вперше для низьковуглецевих низьколегованих сталей розроблена та реалізована технологічна схема прокатки, яка направлена на збереження дислокаційної субструктури аустеніту, фериту та перліту в діапазоні температур між 950...500°C.

5. Вперше розроблено та 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 між критичному інтервалі температур і наступною безперервною деформацією, що забезпечує формування розвиненої ферито-перлітної структури з заданим типом цементитного каркасу перлітної складової. За рахунок цього, виникає можливість підвищити і стабілізувати міцностні властивості не тільки в сталях, які містять карбідоутворюючі елементи, але і матеріалах без додаткового легування.

6. Результати, отримані в роботі було впроваджено в навчальний процес кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.

7. Розроблено методику визначення взаємозв'язку між нанорозмірними елементами тонкої структури та ударною в'язкістю металопрокату для будівельних металевих конструкцій. Дану методику було впроваджено в навчальний процес кафедри матеріалознавства і обробки матеріалів при підготовці бакалаврів і магістрів спеціальності 132 – матеріалознавство.

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 належне 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 п.п. 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. В першому пункті наукової новизни зазначено «Встановлено основні теоретичні закономірності розпаду деформованого не рекристалізованого аустеніту – зроблено вперше. Розроблена концепція базується на аналізі тонкої структури цементитного каркасу колоній квазіевтектоїду...». Разом з цим не зрозуміло, яким чином впливає морфологія границь деформованого фериту на формування цементитного каркасу колонії перліту.

2. Розділі 1. Одним із основних пунктів наукової новизни є нова *«модель дифузійного перлітного перетворення ... з формування колоній квазіевтектодів»*. У зв'язку з цим, вважаю що було би доцільно проаналізувати існуючі моделі формування перліту, їх спільні та відмінні риси, орієнтаційні співвідношення для кожної моделі та вплив режимів прокату на формування перліту.

3. Розділ 3. Загально відомо, що рівняння Янга найчастіше застосовують при аналізі поверхневої енергії однофазних матеріалів. Незрозуміло, завдяки яким умовам його можливо застосовувати для двофазних матеріалів?

4. У Розділі 3 вказано, що *« зародження колоній квазіевтектоїду може відбуватися в місцях, де присутній надлишок вільної енергії ... на частках другої фази»*. Разом з тим, надлишок вільної енергії залежить від параметрів атомної ґратки (складу, структури) часток. Тому у деяких випадках частинки (TiC, VC, NbC) будуть сприяти формуванню квазіевтектоїду, тоді як у інших (MnS, Al₂O₃) навпаки.

5. Розділі 4. Для більш детального аналізу доцільно було би привести відповідні математичні залежності, які описують процес розповсюдження пластичної деформації по структурним складовим низьковуглецевої сталі 06X1.

6. У Розділі 5 застосовано *«математичний апарат теорії обробки масивів експериментальних даних методів»* для встановлення взаємозв'язку між параметрами технологічних схем та механічними властивостями металопрокату. Разом з тим добре відомо, що механічні властивості головним чином визначаються параметрами структури (часткою, розміром, характером розподілу, хімічним складом). У зв'язку з цим, здається було б доцільним застосувати цей математичний апарат для встановлення зв'язку між структурою та основними механічними властивостями.

7. Розділ 5. У роботі зазначено *«...для визначення тісноти зв'язку між функцією відгуку та декількома незалежними зміними слід використовувати коефіцієнт множинної кореляції...»*. Не зрозуміло, чому надалі автор для кореляційного аналізу використовує приватні коефіцієнти кореляції.

8. Розділ 6. З тексту дисертації не зрозуміло, у яких випадках пластична деформація буде блокуватися на границях, а у яких такого блокування відбуватися не буде.

Наведені зауваження показують напрямок подальших досліджень автора та не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Мається можливість подальшого розвитку наукових досліджень в обраному автором напрямку та їх широкого застосування на практиці.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам. Дисертаційна робота та автореферат викладені в логічній послідовності, написані технічно та стилістично грамотною мовою із залучанням сучасної науково-технічної термінології. Основні розділи дисертаційній роботі 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 підвищення комплексу властивостей високоміцного товстолистового прокату з низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей до рівня, необхідного для сучасного висотного і багатопверхового 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
провідний науковий співробітник
відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів
ІЕЗ ім. Є. О. Патона
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Підпис д.т.н. Костіна В. А. засвідчую:
Вчений секретар ІЕЗ ім. Е. О. Патона



В. А. Костін

І. М. Клочков