

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»,**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство»

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Подана до захисту дисертаційна робота Бекетова О.В. присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми - підвищенню комплексу механічних властивостей прокату з низьковуглецевих низьколегованих будівельних сталей до рівня, необхідного для сучасного висотного і великопрольотного будівництва, що є однією з найгостріших науково-технічних та економічних проблем в Україні.

Сталі, які в даний час використовуються в будівництві, не повною мірою відповідають сучасним вимогам, що висуваються до матеріалу для каркасів висотних будівель або великопрольотних споруд, у першу чергу за рахунок значної анізотропії комплексу експлуатаційних властивостей у трьох напрямках.

Вирішення цієї проблеми пов'язане з питаннями розвитку матеріалознавства, а саме з одержанням нових можливостей удосконалення структури і властивостей металопрокату шляхом зменшення розмірів структурних складових сталей, призначених для будівельних металевих конструкцій.

Збільшити властивості міцності при збереженні показників пластичності і в'язкості можливо отриманням нанорозмірних структурних елементів в металопрокаті, для вирішення цієї проблеми необхідно проведення комплексу досліджень.

Перелічені аргументи стали підставою для поглиблених досліджень, спрямованих на пошук нових резервних можливостей удосконалення структури і властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей, розробку нових та вдосконалення існуючих технологій одержання високоміцного товстолистового металопрокату, який задовольняє сучасним потребам будівництва. Поставлене завдання має вагомое як наукове, так і практичне значення.

В.м. №34-05/116

01.04.2021

Вищенаведене характеризує тему дисертаційної роботи Бекетова О.В., що рецензується як актуальну і підтверджує відповідність дисертації встановленим вимогам з ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

Зв'язок дисертаційної роботи з державними науковими програмами, планами, темами, пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі матеріалознавства і обробки матеріалів Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» 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.); «Теоретично – експериментальне дослідження механізмів впливу нанорозмірних параметрів структури на закономірності зруйнування 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).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, та їх достовірність.

Обґрунтованість результатів, одержаних у дисертаційній роботі Бекетова О.В., забезпечена використанням для їх отримання широкого інструментарію сучасних методів досліджень та відповідного обладнання, а саме: оптичної мікроскопії з застосування оптичного мікроскопу Neophot 20; растрової елеронної мікроскопії з застосуванням скануючого електронного мікроскопу РЕМ – 106И; дифракційної електронної мікроскопії з застосуванням трансмісійних електронних мікроскопів ПЕМ – 125К та Jeol – 200; загальних методів кількісного та напівкількісного металографічного аналізу. Для визначення комплексу механічних властивостей застосовувались традиційні методи статичних та динамічних випробувань. З метою отримання кількісних залежностей між параметрами процесів, які досліджувалися, та побудови відповідних фізико – математичних моделей застосовувався математичний апарат теорії обробки масивів експериментальних даних: первинна статистична обробка, кореляційний аналіз, одно та багатофакторний дисперсійний аналізи, одно та багатофакторний регресивний аналізи; квазіньютонівський метод перевірки адекватності отриманих моделей.

Сформульовані положення і висновки по роботі, що рецензується, не вступають у протиріччя з фундаментальними основами матеріалознавства, обробки металів тиском і технології машинобудування.

Достовірність отриманих у дисертації теоретичних напрацювань, положень, висновків і рекомендацій підтвердженні достатньо точним збігом

їх з отриманими експериментальними даними, співпаданням результатів виконаних різними методами експериментів та апробацією результатів досліджень у виробних умовах, про що свідчать акти впровадження, наведені у «Додатках» до дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів

У роботі отримано ряд нових результатів, що становлять наукову новизну отриманих досліджень, серед яких слід виділити наступні найголовніші:

1. На підставі аналізу тонкої структури каркасу колоній квазіевтектоїду та аналізу відмінностей в морфології перлітних колоній низьковуглецевих низко-, мікро- та нелегованих сталей широкого спектру технологій виробництва товстолистого прокату встановлено основні теоретичні закономірності розпаду деформованого нерекристалізованого аустеніту – **зробленого вперше.**

2. Виділення фериту не тільки по великокутовим, а й по дислокаційним полігональним границям аустеніту, що призводить до блокування процесів рекристалізації та збереженню відповідної дислокаційної субструктури деформованого аустеніту у верхній частині між критичного інтервалу температур – **набуло подальшого розвитку.**

3. Збереження дислокаційної субструктури аустеніту до нижньої границі між критичного інтервалу температур приконтрольованої прокатці – **зробленого вперше.**

4. Особливості будови нанорозмірних елементів у феритній складовій низьковуглецевих низко-, мікро- та нелегованих сталей (зокрема зерно границь ансамблів) – **набуло подальшого розвитку.**

5. На підставі аналізу тонкої структури продуктів дифузійного перетворення деформованого аустеніту низьковуглецевих низко-, мікро- та нелегованих сталей і встановлення потенційних місць зародження та загальних принципів зросту перлітних колоній запропоновано модель перлітного перетворення у просторі з урахуванням морфології деформованого аустеніту – **зроблено вперше.**

6. Основні етапи розвитку колоній квазіевтектоїду: спіральний двофазний зародок → розростання пластин і дефектів – стійких щілин → перехід пластинчастого цементиту в стрічковий → перетворення стрічок у стрижні – **зроблено вперше.**

7. Енергетичні аспекти теорії зародження руйнування на поверхнях розділу структурних складових низьковуглецевих низко-, мікро- та нелегованих сталей, а саме урахування вільної енергії та спроможністю поверхонь розділу бути потенціальними місцем для зародження тріщини – **набуло подальшого розвитку.**

8. Встановлено взаємозв'язок між розповсюдженням пластичної деформації, а саме її блокуванням, та кількістю і типом структурних складових – **зроблено вперше.**

Повнота опублікованих результатів

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 45 наукових працях, з яких: 7 статей у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних, 24 статі у фахових виданнях, 9 – в матеріалах міжнародних наукових конференцій, 5 патентів України.

Опубліковані праці вичерпано відображають основні положення, результати, висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертації.

Основні наукові положення та результати дослідження доповідались та були схвалені на численних конференціях, а саме: міжнародній конференції «Строительство, материаловедение, машиностроение» (Дніпро, Україна, 2007, 2009, 2011, 2018); Міжнародній конференції «The eight international scientific forum ALMS for future of engineering science (AFES 2007)» (Виніпег, Канада, 2007); Міжнародній конференції «Theoretical Foundation of Civil Engineering: Polish – Ukrainian Lithuanian Transactions» (Варшава, Польща 2011, 2013;) Міжнародній конференції « 10-th International Scientific day of metallurgy» (Фрайберг, Германія, 2012); Міжнародній конференції «Proceeding of the VI International Scientific and practical Conference: International Scientific and Technology» (Варшава, Польща 2018).

Загалом, положення стосовно повноти публікації та апробації роботи виконано у повному обсязі.

Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних 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** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані практична з мета, завдання і методи дослідження, наукова новизна, визначена практична значимість, наведені відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертації.

Перший розділ містить огляд технічної літератури з теоретичного аналізу виробництва низьковуглецевих, низьколегованих сталей, які застосовують на вітчизняних підприємствах. На основі проведеного аналізу визначено елементи структури низьковуглецевої сталі, які відносять до нанорозмірних. Теоретично досліджено закономірності перлітного перетворення, морфологічні особливості структурних складових, які формуються при зростанні перлітних колоній у доєвтектоїдних сталях, будови між фазних і внутрішньо фазних границь.

Особливості руйнування будівельних сталей ферито - перлітною структурою, кінетику розповсюдження пластичної деформації. Проведений дисертантом огляд технічної літератури свідчить про необхідність проведення спеціальних досліджень.

Виконаний автором дисертації аналітичний огляд літературних вітчизняних і закордонних джерел, проведений його глибокий аналіз є змістовним і цікавим з наукової точки зору.

У другому розділі дисертант зосереджується на розробленні апаратно-методичних засад одержання та дослідження матеріалів.

Важливим і ґрунтовним, на нашу думку, є обрані методики досліджень, які включають як відомі стандартні методи, так і оригінальні дослідження з відносною похибкою не більше 5 %.

Загалом цей розділ дисертації характеризує здобувача, як дослідника, який володіє широким інструментарієм тонких експериментальних методів досліджень і здатний ґрунтовно інтерпретувати одержані результати.

Третій розділ присвячено дослідженню морфологічних особливостей формування структури низьковуглецевих низьколегованих сталей за дифузійним механізмом.

За рахунок використання результатів аналізу тонкої структури визначені морфологічні особливості будови та проаналізовано орієнтаційні співвідношення між нанорозмірними елементами феритної складової структури низьковуглецевої низьколегованої сталі. Досліджено морфологічні особливості перлітних колоній в сталях доевтектоїдного складу та відповідні орієнтаційні співвідношення. Проаналізовано поверхневу енергію міжфазних і внутрішньофазних границь квазіевтектоїду.

На підставі комплексного аналізу отриманих даних щодо тонкої структури продуктів дифузійного перетворення аустеніту запропоновано модель формування колонії квазіевтектоїду у просторі. Отримані результати дозволили автору здійснити класифікацію перлітних колоній, які формуються під час розпаду переохолодженого аустеніту низьковуглецевих, низько-, мікро- та нелегованих сталей.

Запропоновано для визначення взаємозв'язку між структурним станом та механічними властивостями наступний підхід: структура металопрокату - тонка структура металопрокату - нанорозмірні елементи в структурі металопрокату - розповсюдження пластичної деформації - зародження руйнування.

Одержані у межах цього дослідження експериментальні результати заслуговують на увагу та позитивну оцінку.

Четвертий розділ присвячено дослідженням впливу морфології структурних складових на формування комплексу властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей. Здійснено кількісний аналіз впливу морфології цементитного каркасу та мікротвердість перлітних колоній.

Для сталі 06X1, яку було використано у якості модельної, досліджено вплив структурних елементів на закономірності розповсюдження пластичної деформації та побудовано відповідні фізичні моделі. Отримані дані дозволили дослідити взаємозв'язок між елементами структури та кінетикою зародження та розповсюдження руйнування в сталі 06X1.

Для узагальнення даних, отриманих для модельної сталі, автором було досліджено закономірності розповсюдження пластичної деформації в сталях 09Г2С, 10Г2ФБ, 10ХСНД та Ст3. Спираючись на відповідні результати мікроструктурних досліджень Бекетовим О. В. було запропоновано фізичні

моделі руйнування феритної та перлітної складової низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей.

П'ятий розділ присвячено фізико-математичному аналізу параметрів технологічних схем виробництва доевтектоїдних сталей, зокрема взаємозв'язку між температурним режимом прокатки низьковуглецевих низьколегованих сталей та основним механічним характеристикам: границі плинності, границі міцності, відносному видовженню.

Автором проаналізовано структурні перетворення, які відбуваються під час виробництва низьковуглецевих низьколегованих сталей за технологічними схемами гарячої та контрольованої прокатки. На підставі масиву даних заводських випробувань виконано статистичну обробку та отримано відповідні математичні моделі взаємозв'язку між параметрами виробництва (гаряча та контрольована прокатка) та механічними характеристиками сталей Ст3 та 10Г2ФБ. З застосуванням лабораторного прокатного стану виконано комплекс досліджень, який спрямовано на визначення впливу деформації на формування структури низьковуглецевих сталей Ст3 і 10Г2ФБ. Також досліджено вплив швидкості охолодження на параметри квазіевтектоїду, який формується під час фазових перетворень в зазначених сталях.

Шостий розділ присвячено розробці удосконаленої технологічної схеми виробництва високоміцного прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. На підставі отриманих в попередніх розділах дисертаційної роботи результатах, автором запропонована схема виробництва, яка заснована на 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.

Автором показано, 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. Застосування комплексу металографічних досліджень дозволило стверджувати, що цей факт пояснюється формуванням в процесі безперервної прокатки більш дисперсних структурних складових (порівняно зі штатними технологіями виробництва). Також, позитивний вплив на характеристики міцності має формування у структурі металопрокату колоній квазіевтектоїду з стрічковим типом цементитного каркасу.

Проведений комплекс досліджень щодо загальних закономірностей розповсюдження пластичної деформації в структурі металопрокату, виробленого по технології безперервної контрольованої прокатки, дозволив автору виділити зони локалізації пластичної деформації в залежності від прикладеного зовнішнього навантаження.

Зазначені факти показують важливість одержаних коректних результатів і висновків не тільки у науковому, але і у прикладному плані.

У додатках наведено документацію впровадження результатів дисертаційного дослідження навчального процесу при викладанні спеціалізованих дисциплін.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження.

Практична цінність полягає в розробці рекомендацій щодо:

1. Впровадження в практику вітчизняних підприємств температурно-деформаційного режиму гарячої прокатки низько-, мікро- та майже нелегованих сталей в міжкритичному інтервалі температур, який засновано на збереженні дислокаційної субструктури аустеніту та фериту аж до нижньої границі міжкритичного інтервалу температур. Дана технологічна схема забезпечить підвищення властивостей міцності в трьох напрямках, підвищення ударної в'язкості та зниження ризику розшарування.

2. Промислове використання технологічної схеми 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. Промислове використання технологічної схеми 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 прискорене 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. Промислове використання при виробництві металопрокату з низьковуглецевих низько-, мікро- та нелегованих сталей технологічної схеми, яка засновано на збереженні стабільної полігональної структури аустеніту, що 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.

6. Впроваджено в навчальний процес кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури результатів та методів досліджень, а також методики визначення взаємозв'язку між нанорозмірними елементами тонкої структури та ударною в'язкістю металопрокату для будівельних металевих конструкцій.

Вельми важливими, з нашої точки зору, є результати промислової апробації і рекомендації щодо практичного застосування здобутків дисертаційної роботи. Усі виконані дослідження відрізняються

застосуванням найновітніших методик і обладнання, проведених досліджень, глибиною аналізу.

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.

1. Доцільно було б реалізувати запропоновані моделі формування перлітної складової для сталей промислового виробництва, які насичено легуючими елементами та неметалевими включеннями.

2. Розділ 3, п. 3.5. З тексту не зрозуміло, чим саме обумовлена поява сходинок в цементитному каркасі.

3. Автор не розкриває як впливає орієнтація цементитних пластин на максимальну мікротвердість, що має місце в колоніях квазіевтектоїду стрічкової морфології.

4. Зниження температури деформації в чорновій кліті не дозволить здійснювати деформацію з необхідними ступенями завдяки більш високому рівню опору деформації металу. Цей факт призведе до значно більшого навантаження на прокатне обладнання і, як наслідок, до збільшення собівартості металопрокату, який буде виготовлятися за запропонованою технологією, порівняно зі штатними технологічними схемами.

5. На жаль, в роботі відсутні порівняльні корозійні випробування матеріалів листа, отриманого діючою та запропонованою технологією безперервної контрольованої прокатки.

Однак, зроблені вище зауваження ніякою мірою не знижують загальної позитивної оцінки дисертації в цілому і її значення для науки та виробництва. Матеріал у роботі викладено послідовно, грамотно, логічно, розділи взаємопов'язані і повністю розкривають поставлену в роботі мету.

Висновки щодо відповідності вимогам Міністерства освіти і науки України.

За актуальністю, обсягом приведених експериментальних досліджень, їх науковою та практичною новизною дисертація Бекетова Олександра Вадимовича «Теоретичні основи формування субструктури переохолодженого аустеніту та механічних властивостей мікролегованих будівельних сталей» є завершена науковим дослідженням, відповідає вимогам п. п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а її автор – Бекетов Олександр Вадимович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук, за спеціальністю 05.05.01 – «Матеріалознавство».

Офіційний опонент
Завідувач кафедри технології металів
та матеріалознавства Харківського
національного автомобільно-дорожнього
університету,
доктор технічних наук , професор

Д. Б. Глушкова



15-
Глушкова Д.Б.