

## ВІДГУК

офіційного опонента  
на дисертаційну роботу Філоненко Наталії Юріївни  
«Розвиток наукових і технологічних основ збільшення однорідності розплавів для  
підвищення механічних і експлуатаційних властивостей сталей та сплавів»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство

### **Актуальність теми дисертаційної роботи, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Сучасний етап розвитку інженерних і виробничих технологій характеризується зростаючими вимогами до матеріалів, які повинні поєднувати високі механічні, службові та експлуатаційні властивості. Одним із основних найбільш поширених шляхів підвищення експлуатаційних характеристик вуглецевих сталей є визначення раціонального хімічного складу, використання легування та режимів термічної обробки. Разом із тим, експериментальне визначення раціонального складу сталей є трудомістким і економічно витратним процесом, що обумовлює доцільність використання методів комп'ютерного моделювання або аналітичних підходів для прогнозування фазового складу та механічних властивостей матеріалу.

Для розв'язання важливої науково-практичної задачі – отримання вуглецевих сталей із наперед заданими механічними та службовими характеристиками – можна застосувати підхід, що ґрунтується на використанні термокінетичних факторів ще на етапі кристалізації. Відомо, що нагрівання сплаву до температур, вищих за лінію ліквідусу, супроводжується збільшенням дисперсності структурних складових та підвищенням властивостей. Але температури, до яких слід нагрівати сплави для отримання бажаного ефекту в літературних джерелах не визначені однозначно. Застосування теоретичного моделювання дозволяє визначити мінімальну температуру нагріву вище лінії ліквідусу, яка буде мати вплив на формування фазового складу сталей на стадії кристалізації.

Однією з актуальних прикладних задач сучасного матеріалознавства є підвищення зносостійкості контактних поверхонь деталей, що працюють у вузлах тертя. Ефективним способом її вирішення є формування поверхневих шарів шляхом насичення поверхні спеціальними сумішами.

Актуальність теми дисертаційної роботи підтверджується ще й тим, що вона виконана у межах пріоритетних наукових напрямків Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАНУ) «Розвиток наукових основ формування залізобуглецевих сплавів і управління їх структурою і властивостями» в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національної академії наук України, в яких

*Вх. № 37-05/60*  
*23.03.2026р.*

здобувач приймала участь в якості виконавця: «Дослідження особливостей формування хімічної неоднорідності в вуглецевих сталях (0,4–0,6 % ваг. С) і її спадкового впливу на мікроструктуру та механічні властивості металопродукції залізничного призначення» (№ держреєстрації 0120U101186 (2020–2022 рр.)); «Розробка науково обґрунтованого комплексу технологічних рішень виробництва залізничних рейок нового покоління з підвищеними експлуатаційними властивостями» (№ держреєстрації 0117U004145 (2017–2019 рр.)) та за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Перспективні конструкційні та функціональні матеріали з тривалим терміном експлуатації, фундаментальні основи їх одержання, з'єднання та обробки»: «Розробка науково обґрунтованих технологічних рішень виробництва і ефективного використання високоміцного фасонного прокату в інноваційних будівельних і транспортних конструкціях» (№ держреєстрації 0117U004153 (2017–2021 рр.)).

**Структура за зміст роботи.** Дисертаційна робота Філоненко Н.Ю. складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми виконаної роботи, визначено мету та основні задачі досліджень, сформульовано наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, вказано дані про апробацію основних положень дисертації.

У **першому розділі** наведено аналіз сучасного стану наукової проблеми, яку досліджує здобувачка у дисертації. Зокрема, вплив хімічного складу, температури нагріву сталей, режимів термічної обробки на фазовий склад, механічні та службові властивості. Приділено увагу відомим методам розрахунку термодинамічних функцій фаз. Досліджено вплив хімічного складу суміші для насичення поверхні на фазовий склад шарів, механічні властивості при використанні металевих виробів.

В цілому, матеріал, викладений в цьому розділі, достатньо повно відображає сучасний стан проблем, що розглядаються в роботі.

У **другому розділі** надано хімічний склад дослідних сталей та сплавів. Надано опис методів експериментальних досліджень, що відповідають сучасному рівню.

**Третій розділ** присвячений визначенню мінімальної температури нагріву вище лінії ліквідусу (лінії термодинамічної стійкості) бінарних систем, якої буде достатньо, щоб вплинути на фазовий склад при кристалізації. Для дослідження впливу температури нагріву вище лінії ліквідусу та швидкості охолодження на особливості структури було виконано нагрів бінарних сплавів Fe–B, Al–Cu, Pb–Sb на 50 °C, 100 °C, 150 °C та 200 °C вище лінії ліквідусу та охолодження при кристалізації зі швидкостями 10–10<sup>4</sup> °C/с. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень на модельних бінарних

сплавах Fe–B, Al–Cu були отримані загальні закономірності, що дають можливість керувати первинними фазами, зносостійкістю та корозійними властивостями.

В **четвертому розділі** за результатами теоретичних розрахунків побудовано поверхню термодинамічної стійкості сплаву Fe–B–C в концентраційному трикутнику  $\gamma$ -Fe–Fe<sub>2</sub>B–Fe<sub>3</sub>C. Теоретично встановлено, що нагрів не менш ніж на 150–180 °C вище лінії ліквідусу, в залежності від вмісту бору та вуглецю в сплаві буде сприяти пригніченню первинних фаз. Зроблено уточнення щодо поверхні ліквідусу цих сплавів та температури точки перетину моноваріантних евтектик та перитектики, що має місце на поверхні ліквідусу.

У **п'ятому розділі виконано** дослідження впливу вмісту марганцю та кремнію на фазоутворення в сталях. Теоретично розраховано лінію ліквідусу в залежності від вмісту марганцю й кремнію та показано, що при збільшенні вмісту марганцю  $\geq 0,75$  % мас. та кремнію  $\geq 0,45$  % мас. в сталі ділянка перитектичного перетворення зменшується. Теоретичні та експериментальні результати добре узгоджуються.

Для визначення раціонального вмісту вуглецю, марганцю та кремнію в сталі теоретично визначили межу розчинності вуглецю, марганцю та кремнію в структурних складових сталей:  $\delta$ -залізі, аустеніті, цементиті.

Проведені в даній роботі теоретичні розрахунки щодо термодинамічної стійкості дослідної сталі показали, що достатньо виконати нагрів вище лінії ліквідусу на 150–170 °C в залежності від вмісту вуглецю, марганцю та кремнію в сталі для впливу ще при кристалізації сталі.

Для дослідження впливу температури нагріву дослідні сталі були нагріті на 50 °C та 150 °C вище лінії ліквідусу та охолодженні зі швидкостями  $\sim 10$ – $10^3$  °C/c.

Слід зазначити, що нагрів вище лінії ліквідусу на 150 °C призводить до рівномірного розподілу неметалевих включень. Забрудненість неметалевими включеннями не перевищувала 0,5 бали, а окремі – 1 бал за ДСТУ 4927:2017. Спостерігалось утворення більш хімічно-однорідної та дисперсної структури, що підвищує механічні властивості сталі.

**Шостий розділ** присвячено дослідженню впливу мікролегування алюмінієм, титаном та азотом (умовне позначення сталі K1); алюмінієм та азотом (умовне позначення сталі K2) дослідно-промислової марки К зі зменшеним вмістом ванадію на структурні складові. Показано, що при мікролегуванні алюмінієм, титаном та азотом (сталь K1) відбувається утворення багаточастичастих включень, в центрі яких утворюється оксид  $(Al, Ti)_2(O, N)_3$ , оточений нітридом титану  $(Ti_{0,3} Fe_{0,2})(N_{0,3} C_{0,2})$ . В сталі K2 показники міцності та твердості будуть вищі до 15 % у порівнянні з показниками для сталі K1 та

близькими до показників міцності і твердості високоміцної сталі марки Т. Зносостійкість сталі К2 буде більшою, ніж сталі марки К та сталі марки Т. За результатами проведених в роботі досліджень сталь К2 може бути рекомендована для промислового використання.

Дослідні сталі К1 та К2 нагрівали на 50 °С та 150 °С вище лінії ліквідусу та охолоджували зі швидкостями  $\sim 10\text{--}10^3$  °С/с. Нагрів на 150 °С вище лінії ліквідусу та подальше охолодження призводять до зменшення розмірів зерен, різнозернистості, кількості включень, дисперсності включень. В сталі К1 не спостерігалось утворення багатошарових включень.

В роботі виконано порівняння механічних властивостей сталей марок К, К1 та К2 без додаткового нагріву (1458 °С) та після нагріву вище лінії ліквідусу на 150 °С (1665 °С), а також показано, що в результаті додаткового нагріву на 150 °С вище лінії ліквідусу та подальшого охолодження на повітрі зі швидкістю 1,5 °С/с міцність та в'язкість сталей К1 та К2 збільшилась на 42–45 %; плинність до 30 % у порівнянні з показниками сталі без такого нагріву вище лінії ліквідусу.

Таким чином, в даній роботі виконано розробку параметрів кристалізації для отримання структури сталей з підвищеною стійкістю до зношування та механічними властивостями.

**У сьомому розділі** дисертації отримано зв'язок між хімічним складом суміші для насичення поверхні та глибиною бороцементованого шару. Розроблено спосіб бороцементзації поверхні шарів, що мають підвищені механічні властивості, у порівнянні з цементованими зразками, отриманими за тих же технологічних умов.

**Загальні висновки** по дисертаційній роботі відображають одержані здобувачем результати, розкривають у повному обсязі її наукову та практичну значимість.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна.**

У дисертаційній роботі отримано сукупність наукових результатів, що характеризуються науковою новизною, обґрунтованістю та практичною значущістю.

Важливим фундаментальним результатом є встановлення теоретично та експериментально підтвердженої закономірності нагріву металевих розплавів на 150–170 °С вище лінії ліквідусу для істотного зменшення кількості стійких мікрокомплексів, що визначає особливості структуроутворення при кристалізації та формування комплексу механічних та фізико-хімічних властивостей сплавів Fe–В, Al–Cu та Pb–Sb. Даний результат має узагальнюючий характер і є науковим підґрунтям для подальших прикладних досліджень, представлених у роботі. Встановлено, що перегрів мікролегованих вуглецевих сталей вище ліквідусу з подальшим контрольованим

охладженням забезпечує істотне підвищення міцності і пластичності, що відкриває можливості для раціонального корегування технологій виготовлення високоміцних сталей різного призначення.

Вагомими є результати, пов'язані з теоретичним обґрунтуванням термодинамічної стійкості розплавів системи Fe–B–C. Зокрема, вперше теоретично отримано поверхню термодинамічної стійкості розплаву в концентраційному трикутнику  $\gamma$ -Fe–Fe<sub>2</sub>B–Fe<sub>3</sub>C, що дозволило уточнити закономірності фазоутворення залежно від вмісту бору та вуглецю та розробити новий спосіб бороцементації, захищений патентом України.

Суттєву практичну цінність мають результати стосовно оптимізації технологій оброблення сплавів та сталей. Вперше встановлено залежність між вмістом бору і вуглецю в насичуючому середовищі при бороцементації та структурою, глибиною і механічними властивостями поверхневого шару, на основі чого розроблено методику отримання бороцементованих шарів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками.

Подальший розвиток квазіхімічного методу дозволяє виконати моделювання фазового складу сталей. Встановлено роль титану в процесах структуроутворення в вуглецевих сталях, що органічно доповнює основні положення дисертації. Таким чином, наукові положення, сформульовані в дисертації, поглиблюють та надають розуміння процесів, що відбуваються в сталях, та підвищують наукову цінність роботи.

#### **Повнота відображення в опублікованих роботах наукових положень, висновків та результатів.**

Матеріали дисертації опубліковані в 51 науковій праці, а основні наукові результати: 1 монографія, 25 наукова публікація за темою докторської дисертації у наукових періодичних фахових виданнях України, з яких 8 включені до міжнародної наукометричної бази Web of Science та 4 статті у зарубіжних наукових періодичних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 1 патент на винахід України. Результати апробовані на міжнародних та всеукраїнських конференціях (в 12 тезах та матеріалах доповідей, 2 з яких внесені до наукометричних баз Scopus та Web of Science); додатково відображають наукові результати дисертації 12 праць, серед яких 6 публікацій включені до наукометричної бази Web of Science та Scopus та 4 до Web of Science. З переліку статей, що внесені до наукометричних баз Scopus та Web of Science – 5 одноосібних.

#### **Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.**

Достовірність результатів забезпечується використанням сучасних методів досліджень та сучасного математичного моделювання, узгодженням результатів

теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень, застосуванням єдиного комплексного підходу.

**Наукова та практична цінність отриманих результатів** полягає в тому, що:

– результати порівняльних випробувань зразків з лабораторних плавок промислових сталей марки К з системою додаткового легування алюміній, титан, азот та алюміній, азот після нагріву вище лінії ліквідусу до 150–170 °С та дослідно-промислових сталей без додаткового нагріву показали, що сталь після нагріву має більшу стійкість до відшарування на 65%, а стійкість до зношування – на 10 %. Рекомендована промислова сталь марки К, мікролегована комплексом алюміній, титан та азот, може бути використана при виробництві виробів залізничного призначення в умовах «ІНТЕРПАЙП НТЗ»;

– розроблено та захищено патентом України на винахід спосіб насичення сталевих виробів бором та вуглецем, що надає змогу отримати поверхневі шари товщиною до 2,1–2,2 мм, які містять мікрокристалічні сполуки бору та вуглецю, що забезпечують більшу твердість та зносостійкість покриття в широкому діапазоні температур. Спосіб включає попереднє пластичне деформування зі ступенем деформації 25–28 %, а середовище для бороцементації складається з почергового розміщення шарів. Розроблений спосіб бороцементації може бути використаний на підприємстві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» для підвищення експлуатаційної надійності деталей.

#### **Зауваження до змісту та тексту дисертації та автореферату**

Незважаючи на численні сильні сторони дисертаційної роботи, які були відзначені вище, є ряд зауважень та побажань.

1. В дисертації виконано дослідження впливу термодинамічних факторів (нагріву вище лінії ліквідусу та охолодження з різними швидкостями) сплавів системи Pb–Sb. Надайте пояснення вибору даної системи, якщо вона не має відношення до подальших об'єктів дослідження.

2. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень впливу термодинамічних факторів вказано, що нагрів вище лінії ліквідусу повинен становити 150–170 °С для значного зменшення термодинамічно стійких мікрокомплексів. Так, у розділі 2 показана методика отримання розплаву для нагріву на 150–170 °С та визначення оптимального часу витримки за даної температури. Але в роботі було виконано дослідження впливу температури нагріву вище лінії ліквідусу на  $50 \pm 10$  °С та охолодження зі швидкістю при кристалізації  $10\text{--}10^4$  °С/с на структуроутворення в сталях: К (дослідно-промислова сталь), сталь марки К, додатково мікролегована алюмінієм, титаном та азотом (умовне позначення К1), та сталь марки К, мікролегована алюмінієм та азотом (умовне позначення К2). Чому в методиці не описано нагрів на  $50 \pm 10$  °С. З методики не зовсім

зрозуміло, чи була зупинка при зазначеній температурі з подальшим охолодженням, чи нагрів металу 150–170 °С виконувався неперервно.

3. Для використання запропонованої витримки на виробництві необхідно вказувати термін витримки при вказаних в роботі температурах з підігрівом вище температури ліквідуса на  $50 \pm 10$  °С та 150–170 °С.

4. Із глави 5 не зрозуміло, чи порівняння експериментального сплава з підігрівом вище температури ліквідуса на  $50 \pm 10$  °С та 150–170 °С та без підігріву відбувалось після термообробки чи до неї. Можливо, нагрів під аустенітацію достатньо вирівняв би мікроструктуру сталей, що досліджували.

5. В роботі вказано, що теоретично було отримано лінію термодинамічної стійкості для бінарних систем та сталей. Чи врахований вплив флуктуацій на термодинамічні функції фаз, яким чином це впливає на результат розрахунків та який має практичний зміст?

6. В процесі бороцементації була використана витримка за температури 780–800 °С протягом години з подальшим нагрівом до температури 950–970 °С. Чому була використана саме така температура витримки – 780–800 °С? Чим отриманий Вами спосіб бороцементації відрізняється від методик інших дослідників?

Однак, наведені зауваження не знижують високий науковий рівень дисертаційної роботи, актуальність, новизну та практичне значення отриманих результатів та не впливають на загальне позитивне враження від роботи.

У підсумку можу зазначити, що кваліфікаційна наукова праця Філоненко Наталії Юріївни є завершеною науковою роботою, в якій вирішено актуальну науково-технічну проблему: розвиток наукових положень про вплив термодинамічних факторів – температури нагріву розплаву вище лінії ліквідуса, швидкості охолодження розплаву, однорідності розплаву на утворення первинних фаз, структурний стан та на комплекс механічних та експлуатаційних властивостей сталей та сплавів. Дисертаційна робота Філоненко Н.Ю. «Розвиток науково-технічних положень про вплив термодинамічних факторів на структуру та механічні властивості сплавів на основі алюмінію та заліза» дає повне представлення щодо обсягу та суті поставлених завдань, наукової новизни і значимості виконаних досліджень.

Робота відповідає пп. 1, 2, 3, 7 паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство» та вимогам МОН України щодо докторських дисертацій, не містить академічного плагіату. За актуальністю теми дослідження, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, науковою новизною та практичним значенням

результатів, повнотою викладу матеріалу дисертації в наукових публікаціях дисертаційна робота «Розвиток науково-технічних положень про вплив термодинамічних факторів на структуру та механічні властивості сплавів на основі алюмінію та заліза» задовольняє вимоги пп. 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17.11.2021 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ №502 від 19.05.2023, №507 від 03.05.2024), а її авторка, Філоненко Наталія Юріївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
відділу металургії і технології  
зварювання високолегованих  
сталей і сплавів № 019,  
Інститут електрозварювання  
ім. Є. О. Патона Національної  
академії наук України



Ганна ЗВЯГІНЦЕВА

Підпис засвідчую:

Вчений секретар Інституту електрозварювання

Ім. Є.О. Патона НАН України, к.т.н.



Ілля КЛОЧКОВ