

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Філоненко Наталії Юріївни

**«Розвиток науково-технічних положень про вплив термодинамічних факторів на структуру та механічні властивості сплавів на основі алюмінію та заліза»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство

**Актуальність теми дисертаційної роботи** не викликає сумнівів і зумовлена сучасними потребами розвитку машинобудування, транспортної галузі, будівельної індустрії та інших високотехнологічних секторів промисловості у конструкційних матеріалах з підвищеним комплексом механічних та експлуатаційних властивостей.

На сьогодні одним із ключових завдань матеріалознавства є не лише визначення раціонального хімічного складу сталей і сплавів, а й розробка науково обґрунтованих підходів до керування процесами структуроутворення на ранніх етапах формування матеріалу. Повною мірою це відноситься і до вуглецевих сталей, де дисперсність структурних складових, характер фазових перетворень та ступінь хімічної неоднорідності істотно впливають на рівень міцності, в'язкості руйнування, зносостійкості та довговічності виробів.

В умовах обмежених можливостей застосування надвисоких швидкостей охолодження в промисловому виробництві актуальним є пошук альтернативних термодинамічних методів впливу на рідкий метал при кристалізації. З цієї точки зору особливої уваги заслуговує дослідження впливу нагріву рідкого металу вище лінії ліквідусу для впливу на структуру після кристалізації.

Крім того, існуючі термодинамічні моделі прогнозування фазового складу металевих систем, як правило, ґрунтуються на рівноважних уявленнях і не враховують флуктуаційні процеси, характерні для високотемпературного стану розплавів. Це обмежує точність визначення температурних інтервалів існування фаз та ускладнює науково обґрунтований вибір режимів термодинамічного впливу.

З огляду на це, дисертаційна робота сфокусована на вирішенні науково-практичних проблем, що постають на перетині фундаментальних положень термодинаміки нерівноважних систем, уявлень про флуктуаційні процеси та сучасних підходів до моделювання фазових перетворень, а також ґрунтовних експериментальних досліджень структурних, механічних і триботехнічних

*Вх N 37-05/05*  
*24.03. 2026 р.*

властивостей сплавів і сталей, особливостей дифузії при насиченні поверхні сталей. Це сприяло розробці практичних рішень, які дозволяють підвищити експлуатаційні характеристики промислових сталей без істотного ускладнення технологічних процесів. Такий підхід дозволив авторці отримати нові наукові результати, які мають як теоретичне, так і прикладне значення та відповідають сучасному рівню розвитку науки і техніки.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими, що підтверджується логічною структурою викладення, використанням сучасних експериментальних методів дослідження, добре відомих та розповсюджених методів вивчення термодинаміки, за допомогою яких розробляють сучасні комп'ютерні і імітаційні моделі процесів фазо- та структуроутворення та промисловою апробацією запропонованої технології.

Достовірність результатів роботи забезпечена коректністю постановки задач і застосуванням сучасних методів комп'ютерного та термодинамічного моделювання, лабораторного експерименту з використанням сучасного експериментального обладнання та стандартних методів випробувань. Вона підтверджується також зіставленням отриманих результатів з відомими аналітичними й експериментальними даними, а також відповідністю результатам експериментальних досліджень, проведених із застосуванням статистико-математичної обробки даних.

До найбільш цікавих **нових наукових результатів** дисертації на мій погляд слід віднести наступні:

1. Розроблено новий підхід для визначення термодинамічних функцій для вільної енергії Гіббса, при якому враховуються флуктуаційні внески у вільну енергію Гіббса, що дозволяє більш точно прогнозувати процеси структуроутворення при кристалізації різноманітних сплавів.

2. За результатами термодинамічних розрахунків та експериментальних досліджень встановлено зв'язок між температурою нагріву вище лінії ліквідусу та процесами утворення первинних фаз при кристалізації і показано вплив температури перегріву на механічні, триботехнічні та фізико-хімічні властивості сплавів після кристалізації. Показано, що нагрів розплаву на 150–170 °C вище лінії ліквідусу сприяє зменшенню концентрації зародків фаз при кристалізації, збільшенню однорідності та дисперсності структурних складових сплавів та сталей, впливає на

морфологію дендритів, ступінь ліквідації та фазовий склад сплавів. Такий вплив відповідно призводить до підвищення міцності, ударної в'язкості, зносостійкості та корозійної стійкості у порівнянні з властивостями аналогічних сплавів, отриманих без застосування такого перегріву розплаву.

3. Встановлено ефект утворення багат шарових включень при додатковому мікролегуванні вуглецевих сталей комплексом алюміній–титан–азот після лиття, що негативно впливає на їх основні механічні властивості. Натомість, мікролегування алюмінієм та азотом сталі збільшує показники границі міцності та плинності, пластичності на 10–15 % за рахунок зменшення різнозернистості, дисперсності включень після деформаційного та термічного оброблення, у порівнянні із аналогічною сталлю за відсутності її мікролегування та сталлю, мікролегованою комплексом алюміній–титан–азот.

4. На основі результатів термодинамічних розрахунків та експериментальних досліджень розроблено ефективний спосіб бороцементації, який дозволяє отримати дифузійні шари підвищеної глибини, зміцнені дрібнодисперсними борокарбідами, що забезпечує підвищення рівня твердості та зносостійкості та зменшення часу насичення у порівнянні з цементованими зразками, отриманими за тих же технологічних умов.

Загалом в роботі використаний комплексний підхід, що поєднує термодинамічне моделювання та експериментальні дослідження, результати яких добре узгоджуються.

Наукові дослідження були виконані здобувачкою в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України та на кафедрі матеріалознавства та обробки матеріалів навчально-наукового інституту «Придніпровська академія будівництва і архітектури» Українського державного університету науки і технологій.

### **Оцінка змісту дисертації в цілому, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувачки Філоненко Н.Ю. повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Дисертація є завершеною науковою працею, виконаною на високому науковому й методичному рівні, та містить комплекс науково обґрунтованих положень і результатів, що виносяться на захист і мають характер наукового досягнення.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Філоненко Н. Ю. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладених результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою. В тексті дисертації використано загальноприйняту наукову термінологію. Зміст дисертації є виваженим та цілісним в достатній мірі, робота відповідає темі дослідження.

Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку літературних джерел і 2 додатків. Повний обсяг роботи становить 356 сторінок, в тому числі: 292 сторінок основного тексту, 155 рисунків, 29 таблиць (одна з них повністю займає площу сторінки), список використаної літератури з 258 найменувань, що є цілком обґрунтованим для докторської дисертації з урахуванням масштабності виконаних теоретичних та експериментальних досліджень. Дисертаційна робота відзначається продуманою структурою та послідовним викладом матеріалу, що відповідає визначеним завданням та загальній меті дослідження.

**Вступ** містить обґрунтування актуальності теми, формулювання мети й завдань, визначення об'єкта та предмета дослідження, характеристику наукової новизни й практичної цінності результатів, а також інформацію про особистий внесок здобувачки та апробацію здобутих результатів.

**Перший розділ** присвячено ґрунтовному аналізу сучасного стану досліджень у галузі впливу хімічного складу вуглецевих сталей, термодинамічних факторів, методів поверхневого зміцнення на структуру, механічних властивості сталей і сплавів. Огляд літературних джерел виконано критично, з чітким виділенням нерозв'язаних питань, що логічно підводить до формулювання завдань власних досліджень.

**Другий розділ** містить детальний опис матеріалів і методів дослідження, що забезпечує відтворюваність експериментів і свідчить про високий рівень методичної культури автора.

У **третьому розділі** дисертації викладено теоретичні положення та експериментальні результати щодо дослідження термодинамічної стійкості та впливу термодинамічних факторів на фазоутворення. Авторкою запропоновано теоретичний підхід до визначення ліній термодинамічної стійкості (спінодалей) із урахуванням флуктуаційних процесів у рідкому стані, що дозволило уточнити температури впливу

на особливості фазоутворення в системах на основі заліза та алюмінію та експериментально дослідити вплив термодинамічних факторів на фазоутворення, механічні та фізико-хімічні властивості модельних бінарних сплавів.

**Четвертий розділ** присвячено моделюванню термодинамічної стійкості сплавів Fe–B–C у концентраційному трикутнику  $\gamma$ -Fe–Fe<sub>2</sub>B–Fe<sub>3</sub>C та уточненню температури поверхні ліквідусу. Проведене дослідження має істотне значення для прогнозування первинних фаз, фазових перетворень і вибору режимів термічної обробки сплавів та сталей, що містять бор.

**П'ятий розділ** присвячено аналізу впливу температури нагріву вище лінії ліквідусу та швидкості охолодження, вмісту марганцю, кремнію на фазоутворення та механічні властивості вуглецевих сталей.

Встановлено, що комплексний вплив хімічного складу, температури нагріву вище лінії ліквідусу та швидкості кристалізації є важливим чинником формування структури й властивостей вуглецевих сталей. Показано, що нагрів розплавів на 150–170 °C вище ліквідусу призводить до зменшення мікронеоднорідності, формування більш дисперсної структури та зниження схильності до сегрегації марганцю та кремнію.

**Шостий розділ** присвячено дослідженню впливу мікролегування комплексами Al–Ti–N та Al–N, а також температури нагріву вище ліквідусу (50±10 °C і 150±10 °C) та швидкості охолодження ( $\approx 10$ – $10^3$  °C/c) на структуроутворення і механічні властивості вуглецевих сталей (C=0,50–0,65 % мас.) з підвищеним вмістом марганцю та кремнію. Показано, що мікролегування Al–N забезпечує більшу дисперсність перліту, сприяє утворенню дисперсних дендритів  $\gamma$ -заліза, меншу міждендритну відстань і зниження мікросегрегації Mn та Si порівняно зі сталями K, T та сталлю, мікролегованою комплексом Al–Ti–N. Натомість введення титану в сталь у поєднанні з алюмінієм та азотом підвищує дефектність кристалічної ґратки, інтенсивність мікросегрегації та сприяє утворенню багатофазних включень окисно-карбонітридної природи, що підтверджено мікроструктурними, рентгеноструктурними та рентгеноспектральними дослідженнями.

Встановлено, що нагрів дослідних сталей на  $\sim 150$  °C вище ліквідусу з наступним охолодженням забезпечує подрібнення зерна та включень, більш рівномірний їх розподіл, зменшення локальної хімічної неоднорідності марганцю та кремнію, покращення комплексу механічних властивостей сталей. Узагальнення

результатів дозволяє рекомендувати для промислового застосування сталь, мікролеговану алюмінієм та азотом.

**Сьомий розділ** присвячено розробці способу бороцементації низьковуглецевої сталі 20 з підвищеними механічними та експлуатаційними властивостями на основі теоретичного й експериментального визначення раціонального складу насичуючого середовища для бороцементації. Запропонований спосіб бороцементації забезпечує інтенсивнішу взаємну дифузію бору й вуглецю, подвоєння глибини дифузійного шару порівняно з цементацією та формування в об'ємі зерен дрібнодисперсних фаз  $Fe_2B$ ,  $Fe_3(CB)$  і  $Fe_{23}(CB)_6$ . Після подальшої термічної обробки одержано бороцементований шар з рівномірною структурою, механічними та триботехнічними властивостями порівняно з цементованими зразками; запропонований спосіб є технологічно простим і придатним для промислового впровадження.

У **висновках** сформульовано основні наукові результати, отримані в процесі досліджень, які відповідають поставленій меті та завданням роботи.

Загалом структура дисертації є логічною, внутрішньо узгодженою та забезпечує цілісне сприйняття отриманих результатів.

**Реферат** повністю узгоджується зі змістом дисертації та підготовлений відповідно до чинних нормативних вимог. Ознак плагіату не виявлено. Докторська дисертація не містить матеріалів, які раніше виносилися на захист кандидатської роботи.

### **Повнота відображення наукових положень, висновків і результатів у опублікованих роботах**

Основні наукові положення, висновки та результати дисертаційної роботи достатньо повно відображені в опублікованих працях здобувачки. За темою дисертації опубліковано 51 наукову працю, серед яких монографія, 26 статей (22 – у фахових виданнях України, з них 8 включені до міжнародної наукометричної бази Web of Science, та 4 – у зарубіжних періодичних виданнях, що входять до баз Scopus і Web of Science), а також один патент на винахід України. Апробація результатів дисертації відображена в 12 тезах доповідей, з яких 1 включена до наукометричної бази Scopus та 1 – одночасно до Scopus та Web of Science; 12 праць, які додатково відображають наукові результати дисертації, серед яких 4 публікації внесені до Web of Science і 6 – до Scopus та Web of Science.

Наявність значної кількості публікацій у виданнях, що мають міжнародне визнання, свідчить про належний рівень апробації результатів і їх відповідність сучасним вимогам до наукових досліджень докторського рівня. Важливим є те, що 6 статей опубліковано одноосібно.

Матеріали дисертації неодноразово доповідалися та обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, що забезпечило широку наукову дискусію та додаткову перевірку отриманих результатів.

Таким чином, вимоги МОН України щодо повноти відображення результатів дисертаційного дослідження в наукових публікаціях дотримані в повному обсязі.

### **Практична значимість отриманих результатів**

Основне практичне значення роботи полягає в запропонованій здобувачкою можливістю застосування механізмів термодинамічного впливу для отримання перспективних промислових сталей з підвищеними механічними та експлуатаційними характеристиками.

На основі отриманих в роботі результатів розроблено, зокрема, новий хімічний склад сталі К1 та температурні параметри її термічної обробки, що в сукупності забезпечило отримання високого комплексу механічних та експлуатаційних властивостей. Розроблена сталь знайшла перспективи використання, зокрема, при виробництві залізничних коліс в умовах «ІНТЕРПАЙП НТЗ».

### **Зауваження та дискусійні положення**

Позитивно загалом оцінюючи загальний науковий рівень дисертаційної роботи, її завершеність та значущість отриманих результатів, доцільно звернути увагу на окремі зауваження і дискусійні положення.

1. В тексті роботи неодноразово наголошується, що перегрів розплавів на 150–170 °С вище лінії ліквідусу призводить до значного зменшення вмісту стабільних мікрокластерів в розплаві для різних металевих систем. Однак, з тексту не зрозуміло, які конкретні експериментальні дані здобувачки та використані нею методики щодо ідентифікації таких кластерів в розплаві підтверджують даний висновок.

2. При дослідженні впливу температури нагріву вище лінії ліквідусу на фазоутворення модельних сплавів, сталей в тексті дисертації зазначено, що така термодинамічна дія призводить до підвищення дисперсності структури отриманого

сплаву. Однак, в тексті роботи на мій погляд не наводиться достатньо ґрунтовне фізико-хімічне обґрунтування відміченого явища.

3. Нарівні із підвищенням основних механічних властивостей сплавів, отриманих із розплавів, підданих перегріву розплаву на 150–170 °С вище лінії ліквідусу (за рахунок, головним чином, підвищення дисперсності структури), така обробка, на думку здобувачки, також значно підвищує корозійну стійкість сплавів. Однак, пояснення механізмім реалізації цього ефекту в роботі практично не наводиться.

4. В тексті дисертації здобувачка неодноразово використовує термін “термодинамічна стійкість розплавів”, не надаючи, в той же час, чіткого визначення або свого бачення трактування цього терміну. Лише на стр. 177 дисертації вона зауважує, що під термодинамічною стійкістю мається на увазі однорідність розплавів. Однак, що є чітким критерієм ступеня однорідності розплаву, з тексту дисертації не зрозуміло.

5. В п. 3 наукової новизни дисертаційної роботи відзначається, що “На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методику отримання бороцементованих шарів з поліпшеними механічними властивостями.” Враховуючи той факт, що технології борування (бороцементатії) сталей є достатньо відомими та досить розповсюдженими в практиці хіміко-термічної обробки, доцільно було б навести порівняльні дані щодо ефективності запропонованих в роботі підходів з урахуванням відомих технологічних підходів.

6. На жаль, в літературному огляді (розд. 1 дисертації) здобувачка не звернула увагу на ґрунтовний комплекс робіт, виконаних в ІПМ НАН України під керівництвом чл.-кор. НАН України Л.О. Позняка, присвячених термочасовій обробці розплавів, зокрема, таких як:

Poznyak, L.A., Sorokin, Y.V., Ershov, G.S. Thermal-time treatment of melts in producing a dispersed powder of high-speed steels. *Powder Metall Met Ceram* **32**, 949–953 (1994).

Poznyak, L.A., Golub, S.Y., Sorokin, Y.V. *et al.* Effect of thermal treatment of the melt of the R6M5F3 high-speed tool steel on the phase composition of the powder. *Powder Metall Met Ceram* **31**, 369–371 (1992).

Poznyak, L.A., Sorokin, Y.V., Korzhova, N.P. *et al.* Sinterability of powder metallurgy tool steels produced with the application of heat-time treatment of the melt. *Powder Metall Met Ceram* **36**, 466–469 (1997).

Poznyak, L.A., Zelinskaya, G.M., Sorokin, Y.V. *et al.* Structural changes in molten high-speed steels before atomizing. *Powder Metall Met Ceram* **33**, 341–344 (1995).

7. З тексту роботи однозначно незрозуміло, яким чином проводилось холодне деформування зразків перед хіміко-термічною обробкою останніх, а саме - це було об'ємне чи поверхнєве деформування? Не наводиться також схема та режими такого деформування. Не зрозуміло, як визначалася ступінь деформації поверхневих шарів в разі, якщо проводилось поверхнєве (вочевидь - найбільш доцільне для даного випадку) деформування (табл. 7.5).

8. На переважній кількості фото мікроструктур в тексті дисертації наведена величина збільшення зі відсутності мірної лінійки. Однак, така візуалізація не є достатньо інформативною та не використовується в наукових публікаціях провідних журналів матеріалознавчого профілю вже більш ніж 10 років.

9. В тексті роботи та в авторефераті відзначаються деякі помилки в підписунокних підписах, таких, зокрема, як на рис. 2.2 - "...графітовий тигель для розливки дослідної сталі (б)" (хоча на фото чітко видно приварену (до графіту?) ручку тигля), та підпис до на рис. 5 автореферату "Залежність мікрокрихкості та відносної зносостійкості сплавів Al-Cu при різних швидкостях охолодження", хоча графік відображає абсолютно інші залежності.

Наведені зауваження, втім, не впливають на загальну позитивну оцінку наукових та практичних результатів дисертаційної роботи, проте можуть бути враховані авторкою в подальших дослідженнях.

### **Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам**

Дисертаційна робота Філоненко Наталії Юріївни є завершеною, самостійною науково-дослідною працею, у якій отримано нові науково обгрунтовані результати, що мають істотне значення для розвитку фізичного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів.

Робота характеризується високим теоретичним рівнем, методичною коректністю, ґрунтовною експериментальною базою та значною практичною спрямованістю. Сукупність отриманих результатів розв'язує важливу науково-практичну проблему керування структуроутворенням і властивостями сплавів на основі заліза та алюмінію шляхом термодинамічного впливу, що відповідає вимогам до докторських дисертацій.

Зміст дисертації повною мірою відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 –  
Матеріалознавство.

За актуальністю теми, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень,  
рівнем новизни й практичної значущості отриманих результатів, а також повнотою їх  
відображення у наукових публікаціях, дисертаційна робота «Розвиток науково-  
технічних положень про вплив термодинамічних факторів на структуру та механічні  
властивості сплавів на основі алюмінію та заліза» відповідає вимогам пунктів 7, 8 та 9  
«Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук»,  
затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №1197 від 17.11.2021 (зі  
змiнами, внесеними постановами КМ №502 від 19.05.2023 та №507 від 03.05.2024).  
Авторка роботи, Філоненко Наталія Юрiївна, заслуговує на присудження наукового  
ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент,  
директор Інституту проблем матеріалознавства  
ім. І. М. Францевича НАН України,  
член-кор. НАН України, д.т.н., проф.



Геннадій БАГЛЮК