

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 дисертації

Пріоритетним напрямом науково-технічної діяльності слід вважати використання матеріалів, створених на нових засадах, а також енергозберігаючих та ресурсозберігаючих методів виробництва. Це може бути досягнуто на основі результатів комплексних фундаментальних і прикладних досліджень механізмів і процесів формування структури і властивостей матеріалів. Надзвичайно важливим для розвитку матеріалознавства є дослідження термодинамічних процесів, результати яких поглиблюють розуміння фундаментальних явищ дифузії, фазових перетворень, рекристалізації. Термодинамічні фактори (температура, швидкість охолодження у рідкому і твердому станах, час витримки) безпосередньо визначають мікроструктуру сплаву. А саме структура здебільшого визначає і механічні властивості матеріалів. Розуміння термодинаміки дозволяє підвищити ефективність процесів обробки сталей і сплавів, оптимізувати режими лиття і термічної обробки, отже зменшити витрати матеріалів і енергії, скоротити час виробництва, підвищити вихід годного. Нарешті, контроль термодинамічних процесів дозволяє отримувати нові матеріали з унікальними властивостями, у тому числі для застосування у екстремальних умовах експлуатації.

Для прогнозування фазового складу сплавів та сталей використовують термодинамічні функції. Але відомі методи розрахунку термодинамічних функцій фаз можуть бути використані тільки за рівноважних умов і не враховують флуктуаційні процеси, які мають місце за високих температур. Урахування флуктуацій у енергії Гіббса фаз дозволить збільшити точність теоретично визначеного температурного інтервалу існування фаз, що особливо важливо у високотемпературній ділянці. Саме тому дисертаційне дослідження Філоненко Н.Ю., спрямоване на розвиток наукових і прикладних основ прогнозування та керування фазовим складом і структурним станом сталей і сплавів шляхом розробки і використання вдосконалених термодинамічних підходів, визначення впливу температури розплавів вище лінії ліквідусу на дисперсність структури, вдосконаленої теорії визначення розчинності елементів в фазах для корегування хімічного складу та впливу мікролегування на фазовий склад, є безумовно актуальним.

Вх *н* 37-05/70

27.03 2026р

Оцінка змісту дисертації.

Дисертація має обсяг основної частини 292 сторінки, складається з анотацій, вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 258 публікацій, містить 2 додатки.

Дисертаційна робота має чітку загальну структуру, логічно побудована і являє собою завершену комплексну роботу, яка містить результати теоретичних і експериментальних досліджень від аналізу факторів, що впливають на фазовий склад і властивості сплавів, до визначення термодинамічної стійкості їх розплавів, закономірностей і механізмів фазових перетворень, формування структури і властивостей сплавів різного хімічного складу до розробки і обґрунтування технологічних схем та режимів термічної обробки, при яких досягається високий рівень механічних та експлуатаційних характеристик, а також рекомендацій щодо використання у реальному виробництві.

Основний зміст роботи ретельно і вірно відображений у авторефераті.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету та задачі роботи, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено відомості про публікації і апробацію результатів дослідження, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі представлено результати ґрунтовного аналізу сучасного стану наукової проблеми, на вирішення якої спрямовані зусилля автора. Наведено порівняльні характеристики експериментальних та теоретичних досліджень вітчизняних та закордонних вчених. Зокрема, розглянуто вплив хімічного складу, легування та мікролегування сталей, режимів термічного оброблення на структурний стан та механічні властивості сталей, вплив температури нагріву на властивості розплавів та фазовий склад бінарних сплавів та сталей. Результати проведеного аналізу дозволили виявити основні досягнення, протиріччя та проблеми, обґрунтовано визначити напрямки та завдання дисертаційного дослідження.

Загалом, матеріал, що наведений в цьому розділі, достатньо повний та відбиває сучасний стан проблем, що розглядаються в роботі.

У другому розділі наведено склад та вихідні властивості матеріалів, обґрунтовується методологія досліджень для вирішення поставлених завдань та досягнення основної мети. Важливим є те, що автор використовує комплекс сучасних методів і методик експериментальних та теоретичних досліджень структури, фазового складу, фізичних, хімічних і механічних властивостей матеріалів, забезпечило високу достовірність отриманих результатів.

Третій розділ, найбільший за обсягом, присвячено теоретичному визначенню термодинамічної стійкості розплавів бінарних сплавів та експериментальному дослідженню впливу температури нагріву вище лінії ліквідусу та охолодження з різними швидкостями при кристалізації на

фазовий склад, механічні, фізико-хімічні та експлуатаційні властивості модельних бінарних сплавів Fe–B, Al–Cu, Pb–Sb. Отримано температурну залежність термодинамічної стійкості і визначено лінію термодинамічної стійкості розплавів Fe–B, Al–Cu, Pb–Sb, вирази для вільної енергії Гіббса розплаву бінарного сплаву Fe–B, Fe₂B, аустеніту. Доведено, що для пригнічення первинних фаз в до- та заевтектичних сплавах модельних бінарних сплавах Fe–B, Al–Cu необхідно виконати перегрів на 150...170 °C. Така термокінетична дія сприяє підвищенню триботехнічних та фізико-хімічних властивостей модельних бінарних сплавів - нагрів сплавів вище лінії ліквідусу на 150 °C та подальше охолодження сприяють зменшенню швидкості корозії на 20...35 %, збільшенню у 1,2...1,45 рази значення відносної зносостійкості та зменшенню крихкості сплавів у 1,2–1,3 рази.

У наступному розділі на основі проведених розрахунків побудовано поверхню термодинамічної стійкості для сплавів системи Fe–B–C. Теоретично встановлено, що для пригнічення первинних фаз в сплавах системи Fe–B–C в концентраційному трикутнику γ -Fe–Fe₂B–Fe₃C необхідно виконати нагрів на 150...170 °C. Також експериментально досліджено сплави системи Fe–B–C, що належать концентраційному трикутнику γ -Fe–Fe₂B–Fe₃C. На основі експериментальних результатів зроблено уточнення щодо поверхні ліквідусу та температури, що є точкою перетину моноваріантних евтектик і перитектики та має місце на поверхні ліквідусу (при вмісті бору 2,9 % та вуглецю 1,3 % й температурі 1102 °C). Із врахуванням в енергії Гіббса розплаву сплаву Fe–B–C внеску наближення першого ступеня високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу отримано залежності температури термодинамічної стійкості розплаву від вмісту бору та вуглецю в сплаві.

П'ятий розділ містить результати експериментального дослідження впливу вмісту вуглецю, марганцю та кремнію на формування структурних складових. З літературних джерел відомо, що марганець та кремній протилежно впливають на точку перитектики в сталях. В роботі теоретично та експериментально показано, що при вмісті марганцю не менше ніж 0,75 % та кремнію не менше ніж 0,4 % в сталі відбувається пригнічення первинної фази δ -фериту та відбувається утворення дендритів аустеніту при кристалізації БЛЗ. З застосуванням квазіхімічного методу досліджено розчинність марганцю, кремнію та вуглецю в структурних складових сталей, результатом чого є визначення раціонального вмісту цих хімічних елементів в сталі. З використанням методу термодинамічного аналізу визначено лінію термодинамічної стійкості сталі в залежності від вмісту вуглецю, марганцю та кремнію. Показано, що для значного зменшення стабільних мікрокомплексів в рідкій сталі необхідно виконати нагрів вище лінії ліквідусу на 150...170 °C. Експериментально доведено, що нагрів сталей з вмістом вуглецю від 0,5 до 0,6% вище лінії ліквідусу та кристалізація при швидкості охолодження $10^2...10^3$ K/c призводить до зростання дисперсності

структурних складових та однорідності структури, зменшення сегрегаційних ділянок марганцю та кремнію в сталі.

У шостому розділі розглянуто вплив комплексів мікролегування алюміній–титан–азот, алюміній–азот на фазовий склад, механічні та службові властивості сталі марки К із зменшеним вмістом ванадію. Показано, що при мікролегуванні комплексом алюміній–титан–азот відбувається утворення багаточастичастих включень, в центрі яких локалізується оксид $(Al, Ti)_2(O, N)_3$, оточений нітридом титану $(Ti_{0,3}Fe_{0,2})(N_{0,3}C_{0,2})$. У випадку мікролегування лише алюмінієм та азотом подібні включення не утворюються. В сталі, мікролегованій тільки алюмінієм та азотом, показники міцності та твердості вищі до 15 % у порівнянні з показниками сталі, що додатково мікролегована титаном. Зносостійкість сталі з системою мікролегування алюміній–азот більша за цей показник для сталей марок К та Т. Виконано порівняння механічних властивостей дослідних сталей без додаткового нагріву (1458°C) та після нагріву вище лінії ліквідусу на 150°C (1665°C). Визначено, що в результаті нагріву на 150°C вище лінії ліквідусу та подальшого охолодження на повітрі міцність та в'язкість сталей К1 та К2 збільшилась на 42...45 %; плинність до 30 %, у порівнянні з показниками сталі без додаткового нагріву.

Сьомий розділ дисертації присвячено встановленню закономірностей між глибиною поверхневого шару та вмістом бору та вуглецю в насичуючому середовищі. На основі експериментальних досліджень розроблено спосіб бороцементатації поверхні та доведено, що твердість, відносна зносостійкість бороцементованого шару значно вища, а мікрокрихкість та опір поверхневого руйнуванню (K_{1c}) менші, у порівнянні з цементованими зразками.

Загальні висновки містять одержані здобувачем результати, відповідають завданням дослідження та розкривають у повному обсязі наукову та практичну значимість дисертації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна ґрунтуються на теоретичних та експериментальних методах вивчення впливу термодинамічних факторів на формування фазового складу, механічні та службові властивості сталей та сплавів. Для аналізу ефективності теплової дії, режимів термічної обробки, хімічного складу сталей та суміші для насичення поверхні використовувалися термодинамічний підхід, квазіхімічний метод та метод масопереносу.

Оцінка адекватності та достовірності запропонованих теоретичних методик виконувалася шляхом порівняння з експериментальними результатами.

Достовірність висновків і рекомендацій практичного характеру підтверджується використанням сучасних наукових положень, апробованих

методик та обґрунтованим обсягом аналітичних та експериментальних досліджень.

В процесі детального аналізу дисертаційної роботи та реферату не виявлено висновків та тверджень, що викликають сумніви.

Наукова новизна результатів. У дисертації ї представлено сукупність нових науково обґрунтованих результатів, що мають фундаментальне і прикладне значення та спрямовані на вирішення актуальної проблеми керування процесами структуроутворення і властивостями сплавів і сталей.

Основні результати, що становлять наукову новизну:

- теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджено загальні закономірності впливу температури нагріву розплавів на 150...170°C вище лінії ліквідусу на особливості структуроутворення, фізико-хімічні, триботехнічні, механічні властивості сплавів та сталей;

- побудовано поверхню термодинамічної стійкості рідкого стану системи Fe–B–C, виконано уточнення щодо поверхні ліквідусу, що дозволило суттєво розширити уявлення щодо процесів бороцементації;

- удосконалено квазіхімічний метод розрахунку фазового складу сталей, який відрізняється від класичного використанням асимптотичного розв'язку системи рівнянь, що забезпечує підвищену точність моделювання;

- теоретично та експериментально доведено метастабільність фази (Al, Ti) \square (O, N) \square та визначено умови її розпаду, що дозволяє підвищити обґрунтованість вибору режимів термічної та деформаційної обробки;

- отримано нові дані щодо впливу титану у системі мікролегування Ti–Al–N на особливості фазоутворення вуглецевих сталей. Результати дослідження мікролегованих вуглецевих сталей системами Al–N та Ti–Al–N відкривають можливості для раціонального корегування технологій виготовлення високоміцних сталей;

- дістало подальшого розвитку уявлення про роль перегріву розплаву вище ліквідусу як інструменту формування однорідної, дрібнодисперсної структури мікролегованих вуглецевих сталей за рахунок пригнічення первинних фаз, зменшення мікросегрегації та модифікації дендритної кристалізації, що сприяє підвищенню механічних та службових властивостей сталей;

- визначено вплив вмісту бору та вуглецю у насичувальному середовищі при бороцементації на властивості поверхневого шару, що дозволило розробити методику отримання бороцементованих шарів з покращеними характеристиками.

Новизна результатів вірно відображена у висновках дисертації.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що на основі проведених експериментальних та теоретичних досліджень продемонстровано можливість використання термодинамічних факторів, визначення раціонального вмісту елементів в сталі для отримання сталей з

- у роботі зазначено, що швидкість охолодження при кристалізації складало $10 \dots 10^4$ К/с. Яким чином визначалась і контролювалась швидкість охолодження?

- показано, що мікролегування титаном в комплексі з алюмінієм та азотом сприяє збільшенню типів включень, утворенню багат шарових включень, але чіткого обговорення механізму такого впливу у дисертації немає;

- потребує додаткового пояснення, у чому полягає відмінність запропонованого квазіхімічного методу від класичного, і які саме переваги дає асимптотичний розв'язок;

- потребує уточнення, за рахунок яких факторів відбувається збільшення глибини бороцементованого шару у порівнянні з цементованими;

- прикладні результати досліджень рекомендуються до впровадження у виробництво, але відсутня інформація щодо можливих обмежень для застосування.

Але зазначені зауваження не стосуються основних положень, висновків і рекомендацій дисертації, не знижують наукової та практичної цінності виконаної роботи.

Повнота викладу результатів у публікаціях.

Основні положення дисертації опубліковані у 51 статті в українських та зарубіжних журналах, з них – 1 монографія, 21 стаття – у наукових періодичних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 14 публікацій у журналах, що входять до переліку фахових видань України; новизна технічних рішень підтверджена Патентом України на винахід. З переліку статей, що внесені до наукометричних баз Scopus та Web of Science – 5 одноосібних та 5 статей у закордонних виданнях.

Матеріали дисертації пройшли апробацію на багатьох наукових конференціях та семінарах. Публікації відображають основний зміст дисертації з необхідною повнотою, рівень апробації є достатнім. Реферат відповідає змісту дисертації, його написано у відповідності до існуючих нормативних вимог. Плагіат відсутній. Докторська дисертація не містить матеріалів, що виносилися на захист кандидатської дисертації.

Загальний висновок.

Проведений аналіз змісту і основних положень дисертації Н. Ю. Філоненко свідчить, що робота являє собою завершене наукове дослідження, в ній отримано нові й достовірні результати, які ефективно вирішують наукову і прикладну проблему підвищення ефективності виготовлення виробів на основі розробки та впровадження інноваційних матеріалів і технологій з високою конкурентоспроможністю. Наукові і прикладні результати вказують на шляхи й перспективи розвитку сталей і

покращеним комплексом службових та механічних властивостей. Для зміцнення поверхні сталевих виробів, що використовуються в умовах тертя (контактна пара) розроблено спосіб бороцементатації, новизна якого підтверджена патентом України на винахід.

Розроблені автором практичні рекомендації пройшли апробацію в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» при виготовлення сталі марки «К» для залізничних коліс, про що отримано «Акт про використання...». У результаті дослідно промислового випробування доведено підвищення стійкості коліс до утворення дефектів на поверхні кочення, зроблено висновок про перспективність використання сталі для виробництва залізничних коліс.

Спосіб поверхневого зміцнення сталей шляхом бороцементатації може бути використаний на підприємстві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» для підвищення експлуатаційної надійності як окремих деталей, так і машин та механізмів в цілому, для зниження їх собівартості у порівнянні із деталями із легованих сталей.

Достовірність та обґрунтованість результатів.

Використання комплексу сучасних та взаємодоповнюючих методів дослідження структури й властивостей сплавів та вуглецевих сталей, технологічних методів і режимів забезпечують високу достовірність отриманих результатів.

Наукові положення, висновки та рекомендації, розвинуті у дисертації, добре обґрунтовані, базуються на глибокому аналізі явищ та процесів, що досліджуються, проведені з використанням сучасних методів досліджень та теоретичного моделювання, узгодженням результатів розрахунків моделювання та експериментальних досліджень з основними положеннями матеріалознавства та підтвержені практичною реалізацією результатів роботи. Висновки, що сформульовані в роботі, не суперечать класичним уявленням щодо формування структури та властивостей мікролегованих вуглецевих сталей.

Зауваження до дисертації.

Відзначаючи хороший рівень роботи, наукове та прикладне значення результатів доцільно зробити деякі зауваження:

- недостатньо, на мій погляд, у роботі обґрунтовано використання для досліджень сплавів і сталей різних за складом, властивостями, застосуванням;

- потребує більш глибокого пояснення, як рівняння Гіббса з урахуванням флуктуацій використано для пояснення зменшення кількості стійких мікрокомплексів у розплаві;

- недостатньо обґрунтовано, чому для нагріву вище ліквідусу обрано саме інтервал 150...170°C, а не інший. Які фізичні процеси відбуваються в розплаві в цьому температурному діапазоні?

сплавів з підвищеним комплексом властивостей, тому необхідне їх подальше використання і розвиток у рамках державних і галузевих наукових та прикладних програм.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, оскільки вона присвячена встановленню закономірностей зв'язку між показниками різних властивостей матеріалів, пошуку принципів і шляхів створення нових прогресивних матеріалів.

Враховуючи викладене, вважаю, що дана дисертація є завершеною науковою працею, за своїм обсягом, кількістю та якістю публікацій, науковою та практичною значимістю повністю відповідає чинним вимогам «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), має бути оцінена позитивно, а здобувачка, Філоненко Наталія Юріївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
декан фізико-технічного факультету
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара

Анатолій САНІН
27.03.2026

Анатолій САНІН

Підпис проф. Саніна А.Ф. засвідчую:
Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара



Олег МАРЕНКОВ