

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертацію **Чабак Юлії Геннадіївни**
на тему «**Розвиток наукових основ підвищення експлуатаційних властивостей легованих чавунів вдосконаленням хімічного складу та обробкою поверхні висококонцентрованими джерелами енергії**», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство

1 Актуальність обраної теми та відповідність спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство

Дисертація Чабак Юлії Геннадіївни присвячена розв'язанню важливої і актуальної науково-технічної проблеми підвищення експлуатаційної стійкості металовиробів, виготовлених з білих легованих чавунів які використовують в умовах інтенсивного абразивного та ерозійного зношування. Вдосконалення технологічних процесів із впровадженням сучасних світових та вітчизняних досягнень науки для підвищення показників якості і конкурентоспроможності є одним з головних стратегічних напрямків розвитку машинобудування. Створення поверхневих шарів з модифікованою структурою, що дозволяють досягти максимальних показників стійкості в умовах абразивного, абразивно-корозійного та ерозійного зношуванню є одним з підходів у вирішення цієї проблеми.

Відповідно, представлена дисертація, спрямована на розвиток науково-технологічних основ підвищення властивостей зносостійких матеріалів та створення технологічних процесів формування поверхневих шарів з підвищеною зносостійкістю є актуальною та своєчасною для промисловості України.

За своїм спрямуванням дисертація Чабак Ю.Г. відповідає спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

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

Результати досліджень, отримані дисертантом, мають наукову значимість та практичну цінність. Наукові положення, висновки і рекомендації, що наведені в дисертації ґрунтовані на значному теоретичному матеріалі і великій кількості експериментальних досліджень, виконаних з використанням традиційних та сучасних методик, а також комп'ютерного моделювання. Достовірність, адекватність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій обумовлені коректністю постановки і вирішення задач, що підтверджується їх успішним впровадженням у виробництво.

Загальна характеристика змісту дисертації.

Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг становить 410 сторінок, у тому числі 326 сторінок основного тексту, 21 таблиці, 169 рисунків, списку використаних джерел (251 найменування) та 12 додатків на 27 сторінках.

У *вступі* визначена актуальність теми, сформульована мета й завдання роботи, проаналізовано стан проблеми та показані результати досліджень, визначено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, наведені данні про публікації та апробацію отриманих результатів роботи, показано зв'язок досліджень з науковими темами та впровадження у виробництво отриманих результатів.

У *першому розділі* наведено аналітичний огляд наукових праць які стосуються наукової проблеми, що вирішується у дисертаційній роботі. Наведено приклади використання різних технологій поверхневої обробки зносостійких сплавів та визначено найбільш перспективні. Визначені можливі напрямки підвищення експлуатаційних властивостей легованих чавунів та сталей ледебуритного класу вдосконаленням їх хімічного складу та обробкою поверхні концентрованими джерелами енергії.

У *другому розділі* наведено опис методів, методик та обладнання, що застосовувалися при проведенні експериментальних досліджень чавунів різного хімічного складу. Обробка результатів проводилася із застосуванням методів математичної статистики.

У *третьому розділі* представлено результати дослідження закономірностей впливу поверхневої обробки сталим плазмовим струменем, який генерується плазмотроном непрямої дії, на мікроструктуру та експлуатаційні властивості високолегованих чавунів, а також сталей ледебуритного класу, що мають структуру, подібну до чавунів. Розроблено математичну модель нагріву металевої поверхні плазмовим струменем постійної дії, на основі чого вибрано режими плазмового модифікування легованих чавунів та сталей ледебуритного класу без оплавлення та з оплавленням поверхні. Досліджено вплив параметрів нагріву поверхні плазмовим струменем постійної дії на мікроструктуру та трибологічні властивості високохромистого чавуну. Показано, що плазмова обробка з оплавленням поверхні і пост-плазмовим гартуванням від 950 °С збільшує абразивну зносостійкість високохромистого чавуну на 29-31 %. Обробка сталим плазмовим струменем високолегованих ливарних сталей ледебуритного класу підвищує їх трибологічні властивості на 19-53 %.

У *четвертому розділі* виконано моделювання нагріву металевої поверхні плазмовим імпульсом, генерованим в електротермічному аксіальному плазмовому генераторі. Встановлено вплив імпульсно-плазмового модифікування поверхні на трибологічні характеристики сплавів. Так, в умовах сухого тертя ковзанням підвищення зносостійкості становило 18-100 % за зниженням коефіцієнта тертя внаслідок зміни структури в при поверхневих шарах.

У *п'ятому розділі* було представлено результати досліджень з формування захисних імпульсно-плазмових покриттів трибологічного призначення зі структурою композитного типу, подібною до структури білих легованих чавунів. Розроблено математичну модель тепло-фізичних процесів формування імпульсного-плазмового покриття з використанням електротермічного аксіального плазмового прискорювача. Виявлено двохстадійний характер витоку продуктів плазмоутворення із ЕАПП. Вперше встановлено, що в процесі плазмового перенесення продукти ерозії електродів насичуються вуглецем, який

вивільняється при сублімації речовини стінок камери ЕАПП під час електричного розряду, що у випадку застосування чавунного або сталевго катоду, приводить до майже двократного підвищення об'ємної частки карбідів та залишкового аустеніту у покритті відносно матеріалу катоду. Армоване карбідами M_7C_3 і M_3C (в кількості 48 %) покриття з твердістю 990–1180 HV₂₀, отримане на поверхні сірого чавуну СЧ-35, має більш високу (порівняно із основою) зносостійкість: у 3,0-3,2 рази при абразивному зношуванні; у 1,8–3,9 рази – при сухому терті по сталі ШХ15; у 1,2-1,7 рази – при терті SiC; у 51,8-1208,8 рази – при терті алмазним конусом. Поєднання різних концентрованих джерел енергії (лазерного променю та плазмового імпульсу) опробованого при хімічному та структурному модифікуванні сірого чавуну СЧ-35 дозволило отримати в чавуні структуру легованого вольфрамом та міддю ледебуриту, що забезпечило 5-кратне збільшення мікротвердості (до 900-1000 HV) і 15-кратне збільшення зносостійкості порівняно з вихідною структурою чавуну.

У шостому розділі наведені дослідження впливу мікролегування бором на структуру та твердість хром-молібденового чавуну. Встановлено, що додавання невеликої (0,25-0,5 %) кількості бору в чавун з 15 % Cr та 2 % Mo дозволяє досягти високої твердості чавуну (67-71 HRC) після проведення дестабілізуючої термічної обробки. Вперше запропонована концепція розробки нового класу зносостійких сплавів – «гібридних» мультикомпонентних чавунів, які поєднують переваги комплексного легування сильними карбідоутворюючими елементами та часткової заміни вуглецю на бор. Визначено характер впливу бору і вуглецю на фазовий хімічний склад карбоборидних фаз. Показано, що в межах дослідженого діапазону концентрації (0,3-1,1 %) вуглець підвищує абразивну зносостійкість гібридних мультикомпонентних чавунів за будь-якого вмісту бору завдяки збільшенню кількості карбобориду титану та утворенню різних евтектик на основі збагачених хромом та залізом карбоборидів $M_7(C,B)_3$ та $M_3(C,B)$. Проведені дослідження показують високий потенціал «гібридних» сплавів як триботехнічних матеріалів нового покоління.

У сьомому розділі розглянута доцільність застосування плазмової обробки для підвищення зносостійкості чавунів і сталей. Розроблено загальні схеми та запропоновані технологічні параметри технологій поверхневого модифікування чавунів та сталей та нанесення композитних чавуноподібних покриттів із застосуванням плазмового нагріву. Запропоновані схеми і параметри технологічних процесів зміцнювальної обробки легованих чавунів та сталей ледебуритного класу з використанням сталого плазмового струменю. Розроблені технічні рішення успішно апробовані та впроваджені у виробництво на машинобудівних та металургійних підприємствах України та Польщі.

3 Наукова новизна отриманих результатів

До основних наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Показано, що модифікувальний ефект від обробки високохромистого чавуну сталим плазмовим струменем визначається максимальною температурою нагріву поверхні, а також типом вихідної (перед обробкою) структури мат-

риці. Встановлено, що максимальна твердість поверхні (1000-1080 HV) досягається при плазмовій обробці без оплавлення (з нагрівом ≤ 1200 °C) при вихідній структурі «мартенсит + вторинні карбіди». Найменш сприятливою є структура чавуну в литому стані із первородним аустенітом, який не перетворюється на мартенсит в умовах плазмового гартування, призводячи до утворення тріщин на поверхні.

2. Встановлено можливість суттєвого (на порядок) зменшення розмірів структурних складових легованих чавунів та ледебуритних сталей оплавленням поверхні плазмовим струменем, що приводить до нерівноважної кристалізації металу з формуванням дрібних дендритів аустеніту та евтектичних колоній із нанорозмірними волокнами карбідів. Додаткове подрібнення структури досягається при пост-плазмовій термообробці виділенням дисперсних (0,05-0,5 мкм) вторинних карбідів; це дестабілізує аустеніт до мартенситного перетворення та забезпечує різке (у 2-2,5 рази) підвищення твердості оплавленого шару.

3. Вперше показано можливість формування тонких (кілька десятків мікро-метрів) чавуноподібних Fe-C(B)-(Cr, W, V, Si, Mn) захисних покриттів при імпульсно-плазмовому нанесенні із застосуванням катодів, виготовлених із легованих сплавів з карбідною евтектикою. Покриття утворюється на металевій поверхні шляхом надшвидкої ($(2-4) \cdot 10^6$ K/c) кристалізації перенесених плазмою мікрокрапельних продуктів ерозії катоду. Внаслідок ефекту «Solute-trapping» покриття набуває метастабільної безкарбідної структури, що складається із пересичених вуглецем та легуючими елементами γ (Fe)- та α (Fe)-твердих розчинів.

4. Вперше досліджено механізм та визначено кінетику структуроутворення у чавуні з 28% Cr, синтезованому на металевій підложці у вигляді імпульсно-плазмового покриття. Показано, що в цьому випадку формування основної частини карбідної фази в чавуні відбувається при пост-плазмовій термічній обробці шляхом твердофазних реакцій розпаду пересичених γ Fe- та α Fe-розчинів із реалізацією карбідних перетворень $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$. Встановлено, що при 950°C розпад має згасаючу кінетику і практично завершується впродовж двох годин витримки, забезпечуючи збіднення аустеніту та його перетворення на мартенсит при охолодженні.

5. Вперше встановлено, що в процесі плазмового перенесення відбувається насичення мікрокрапельних продуктів ерозії катоду ЕАПП вуглецем, який вивільняється при сублимації речовини із стінок камери плазмового прискорювача при короткотривалому (0,5-1,0 мс) електричному розряді. Відповідно, вміст вуглецю та об'ємна частка карбідів в покритті збільшуються у 2-2,3 рази відносно матеріалу катоду.

6. Показано, що запропонований «гібридний» підхід у розробці абразивностійких чавунів дозволяє формувати багатофазну структуру із комплекснолегованими карбоборидами нестехіометричного складу $M_2(B,C)_5$, $M(C,B)$, $M_7(C,B)_3$, $M_3(C,B)$ у вигляді первинних включень та евтектик різної морфології. Дослідженням впливу бору (1,5-3,5 %) та вуглецю (0,3-1,1 %) на структуру й трибологічні властивості ливарного сплаву (%) Fe-5W-5Mo-5V-10Cr-2,5Ti показано, що збільшення їх вмісту сприяє переходу від евтектичного до заевтектичного типу структури та до трансформації типу евтектики відповідно до змі-

ни її базового карбобориду у послідовності $M_2(B,C)_5 \rightarrow M_7(C,B)_3 \rightarrow M_3(C,B)$.

7. Вперше показано можливість кристалізації в мультикомпонентних бор-вміщуючих чавунах гексагонального борокарбиду $M_2(B,C)_5$ із вмістом W, Mo та V у сумарній кількості 45-61 %. Борокарбід має твердість 2400-2800 HV і кристалізується у вигляді первинних включень призматичної форми або евтектичних волокон інвертованої евтектики з морфологією «Chinese-script».

8. Встановлено, що комплексне введення W, Ti, Mo, V та Cr у кількості 2,5-10 % (кожного елементу) у Fe-C-B сплави призводить до формування карбоборидів $M_2(B,C)_5$ та $M(C,B)$ дуплексної («оболонка/ядро») будови, обумовленої суттєвою неоднорідністю в розподілі вольфраму в межах включень.

4 Практичне значення результатів роботи

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано і використано електротермічний аксіальний плазмовий прискорювач для поверхневого модифікування чавунів та нанесення трибологічних чавунних покриттів на металеву поверхню (патент України на винахід № 114678).

2. Розроблено математичні моделі нагріву металевої поверхні при плазмовому модифікуванні та нанесенні імпульсно-плазмових покриттів, що дозволило оптимізувати режими напilenня.

3. Запропоновано принцип чередування матеріалу катоду при імпульсно-плазмовому нанесенні, що забезпечує формування шаруватих зносостійких покриттів.

4. Розроблено конструкцію композитного катоду ЕАПП, що дозволяє отримувати зносостійкі імпульсно-плазмові покриття без необхідності проведення пост-плазмової термообробки (патент України на винахід № 119011).

5. Розроблено комбіновані (поверхнево-об'ємні) технології зміцнювальних обробок чавунів із застосуванням сталого плазмового струменя (або плазмових імпульсів) та пост-плазмової термічної обробки (патенти України на винахід № 114978, № 119082, № 121045).

6. На основі розробленої математичної моделі оптимізовано хімічний склад «гібридних» мультикомпонентних сплавів, призначених для використання в умовах абразивного зношування.

7. Результати дисертаційної роботи апробовано та впроваджено у виробництво на машинобудівних підприємствах України та Польщі, а також впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів/магістрів за напрямками 132 «Матеріалознавство» та 163 «Біомедичні інженерія» в ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

5 Повнота викладення та апробації основних результатів дисертації у наукових публікаціях та доповідях

Основні наукові положення і результати дисертації були апробовані на 27 міжнародних та вітчизняних наукових конференціях та опубліковані в 49 нау-

кових працях, включаючи 5 патентів України на винахід, 9 статей у періодичних виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань, затверджених МОН України, 25 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, які індексовані міжнародними наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science, 8 матеріалів і тез доповідей конференцій та 2 монографії.

Публікації в достатній мірі відображують основні положення дисертації. Зазначені кількість та якість публікацій дають підставу вважати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які отримані у дисертації, повністю висвітлені у відповідності до вимог МОНУ, що висуваються до докторських дисертацій. Наявність 12 публікацій у журналах міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science із кварталом Q1 та Q2 дозволяють автору захищати дисертацію у вигляді наукової доповіді.

Зміст реферату ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації й відображає основні наукові та практичні результати роботи.

6 Рекомендації по використанню результатів дисертації

Наукові та практичні результати дисертації Чабак Ю.Г. можуть бути використані на підприємствах України, що виробляють зносостійкі матеріали (деталі і механізми), що експлуатуються в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Теоретичні положення дисертації рекомендуються до використання у вищій школі у навчальному процесі підготовки бакалаврів, магістрів та аспірантів.

7 Зауваження до дисертації

1. В розділі 3.2, Ви розглядаєте утворення тільки карбідів $M_{23}C_6$ та M_7C_3 , в той час, як за швидкого охолодження утворення карбідів M_3C (цементиту), потребує меншої концентрації вуглецю ніж карбід M_7C_3 і меншої кількості атомів ніж карбід $M_{23}C_6$ і це енергетично вигідніше. За швидкого охолодження утворюється навіть карбід Cr_3C існування якого не передбачено на загально використовуваній діаграмі Cr-C. До того ж, в цементиті може розчинятися до 20% хрому і в сплавах із меншою концентрацією хрому (ВХЧ1 і ВХЧ2), хром не буде впливати на утворення цементиту за первинної кристалізації. Принципово утворення цементиту, в досліджуваних Вами сплавах, підтверджується на рис. 3.16 де цементит утворюється одночасно із карбідом ванадію V_2C . Тобто за присутності потужного карбідоутворюючого елемента ванадію, все одно утворюється цементит. Потім на с. 187 Ви приводите перетворення « $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ ». Це тільки в сплавах із високим вмістом хрому (ВХЧ-3)?

2. На С. 151 Ви стверджуєте - «Оскільки аустенітний прошарок залягає на границі оплавленого шару, можна припустити, що при взаємодії плазмового імпульсу із поверхнею відбулося неоднакове розподілення перенесеного вуглецю по глибині розплавленого шару». Розподіл вуглецю по глибині може бути подібним як при цементації поверхні, або як при зневуглецюванні поверхні при ТО.

У Вас друге. Підтвердження нерівномірного розподілу немає.

3. На С. 160 Ви робите припущення – «*Можна припустити, що внутрішні шари покриття сформувалися при перших імпульсах в умовах високого ступеня перегріву*». Для підтвердження цього потрібно дослідити зміни у покритті при 1 імпульсі, при 2-х і так далі. Ваш вибір кількості імпульсів не обґрунтовано. Можливо кількість імпульсів впливає на ширину «білої зони» і її розташування (зменшення).

4. На С. 188 Ви стверджуєте, що – «*Цю невідповідність можна пояснити підвищеною (до 63,7 %) об'ємною часткою карбіду в покритті, що майже вдвічі перевищує частку карбіду ...*». Цю невідповідність можна пояснити різницею реальних умов формування структури чавунів та умовами кристалізації визначеними розробниками «Thermo-Calc». Можлива різна ступінь метастабільності систем.

5. На С. 226 Ви показуєте, що – «*...у матриці було виявлено 2,6 % Си, що перевищує межу розчинності міді в залізі*». Скільки вимірів було з таким вмістом міді? Хімічний склад визначається в об'ємі. Мідь накопичується в межах зерен, можливо Ви натрапили на такий випадок, або частинку катоду.

6. С. 228 «*Термічна усадка матриці ...*» (весь абзац). На мою думку «м'яка» металева основа буде деформуватися раніше карбіду. Руйнування карбіду викликано внутрішніми напруженнями, як при закалюванні куль.

7. С. 343 У висновку 5 за розділом 6. «*Показано, що бор зменшує вміст вольфраму у карбоборидах $M_2(B,C)_5$ і вміст хрому у карбоборидах $M_7(C,B)_3$, не впливаючи на хімічний склад карбобориду $M(C,B)$. Вуглець зменшує вміст хрому у $M_7(C,B)_3$, а також вміст титану в $M(C,B)$, не впливаючи на хімічний склад $M_2(B,C)_5$* ». Яким чином С та В зменшують вміст хрому або вольфраму у карбоборидах? Вміст елементів у яких відсотках - мас. або ат.? Якщо змінюється вміст одного елементу, то це впливає на вміст всіх елементів. Чому змінюється вміст тільки хрому або вольфраму? Якщо вміст хрому або вольфраму збільшується то звідкіля вони беруться, якщо зменшується то куди вони діваються?

Вказані зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, а її результати є важливим здобутком в розвиток матеріалознавства зносостійких сплавів.

8 Загальні висновки

Дисертація Чабак Юлії Геннадіївни «Розвиток наукових основ підвищення експлуатаційних властивостей легованих чавунів вдосконаленням хімічного складу та обробкою поверхні висококонцентрованими джерелами енергії» є завершеною науковою роботою, яка розв'язує важливу наукову-технічну проблему підвищення експлуатаційної стійкості металовиробів, виготовлених з білих легованих чавунів які використання в умовах інтенсивного абразивного та ерозійного зношування.

Дисертація Чабак Юлії Геннадіївни відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, не містить академічного плагіату та задовольняє вимоги, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7 та 9

Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197. Таким чином вважаю, що **Чабак Юлія Геннадіївна** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інтегрованих
технологій зварювання та
моделювання конструкцій
Національного університету
«Запорізька політехніка»

В. Нетребко
Підпис

Валерій НЕТРЕБКО
ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

В. Курман

