

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

Інтенсифікація технологічних процесів у різних сферах виробництва призводить до зростання швидкості зношування деталей машин та інструменту. Це потребує їх частої заміни та викликає простої технологічного обладнання із відповідними значними матеріальними та економічними втратами та додатковим екологічним навантаженням. Тому проблема підвищення експлуатаційної надійності та довговічності деталей машин не тільки не втрачає своєї актуальності, але й стає все більш нагальною. Дисертація присвячена легованим білим чавунам та сталям ледебуритного класу, які широко використовують для виготовлення деталей машин, робочих органів технологічного обладнання, інструменту, що працюють в умовах інтенсивного зношування (абразивного, адгезійного, ерозійного, фреттінг, тощо). Втім, незважаючи на значне легування цих сплавів, граничний строк служби виробів не завжди відповідає їх високій вартості. Підвищення цього строку можливо за рахунок оптимізації хімічного складу відомих сплавів та розробки принципово нових металевих матеріалів, впровадженню нових режимів зміцнювальних технологій поверхневої та об'ємної обробки, включаючи різноманітні методи інженерії поверхні. Оскільки дисертація Чабак Ю.Г. присвячена розвитку теорії функціональних металевих матеріалів триботехнічного призначення та модифікації їх фазово-структурного стану застосуванням висококонцентрованих джерел енергії задля підвищення експлуатаційної довговічності металовиробів та деталей машин, її тема є безперечно актуальною з наукової та практичної точок зору.

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

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

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації забезпечено великою кількістю досліджень, виконаних з використанням традиційних та сучасних експериментальних методик та комп'ютерного моделювання. Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації підтверджується також їх успішним впровадженням у виробництво.

У *першому розділі* дисертації виконано аналітичні дослідження літературних джерел стосовно сучасних уявлень щодо впливу різних методів інженерії поверхні із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії на мікроструктуру, механічні та трибологічні властивості сталей і сплавів інструментального та машинобудівного призначення. Також описано схеми устаткування, яке використовується для плазмової обробки металевих поверхонь для підвищення експлуатаційної довговічності металовиробів.

За результатами аналізу стану питання сформульовані наукова-прикладна проблема дисертаційного дослідження, мета та завдання роботи.

У *другому розділі* дисертації наведено хімічний склад досліджених сплавів (сталей та чавунів), описано використані методи досліджень, які включали світлову та растрову електронну мікроскопію, енергодисперсійний мікроаналіз, термічний та фазовий рентгеноструктурний методи аналізу, методи дослідження механічних та трибологічних властивостей, методи комп'ютерного моделювання та планування експерименту, методи статистичної обробки експериментальних результатів. Описано схеми устаткування, яке було використано для плазмової та лазерної обробок поверхні.

У *третьому розділі* описано процеси модифікації структури та властивостей чавунів різних систем легування (Cr-Mn-Ni-Mo-V-Ti, V-Mn-Ni, V-Cr-Mn-Ni) та сталей ледебуритного класу (Cr-Mn-Si-Ni-V-B, Cr-Mn-Si-Mo-B, Cr-Mn-Si-Mo-V-B) в процесі обробки поверхні сталим плазмовим струменем. Представлено математичну модель нагріву металевої поверхні в контакт з плазмовим струменем, визначено оптимальні режими плазмового нагріву та тип вихідної структури матриці високохромистого (15 % Cr) чавуну, які забезпечують досягнення максимального модифікувального ефекту. Показана можливість суттєвого (на порядок) подрібнення структурних складових (дендритів аустеніту, евтектичні колоній, евтектичних карбідів) високохромистого чавуну плазмовою обробкою з оплавленням поверхні із наступною об'ємною термообробкою, що забезпечує максимальне підвищення трибологічних властивостей чавуну. Встановлено, що плазмове модифікування поверхні підвищує абразивну та абразивно-ерозійну зносостійкість високохромистих та Cr-V чавунів і сталей ледебуритного класу на 20-50 %.

У *четвертому розділі* дисертації вперше описано використання електротермічного аксіального плазмового прискорювача (ЕАПП) для імпульсно-плазмової обробки (ІПО) сталей та чавунів з метою модифікації їх поверхневих шарів та нанесення захисних чавуноподібних покриттів. На основі розробленої математичної моделі нагріву металевого тіла в контакт з високоенергетичним плазмовим імпульсом визначено розподіл температури, швидкість нагріву та глибину модифікування в залежності від режиму ІПО. Моделюванням встановлено, що миттєва швидкість нагріву і охолодження поверхні при ІПО може сягати $(2-4) \cdot 10^6$ K/c. Модель апробована при виконанні експериментів по імпульсно-плазмовому модифікуванню сталі 75Г, сірого чавуну СЧ-35 та високохромистого чавуну (15 % Cr), що підвищило їх твердість та збільшило адгезійну та абразивну зносостійкість на 18-100 % в залежності від режиму ІПО.

П'ятий розділ дисертації присвячений дослідженню закономірності формування чавунних покриттів із композитною структурою «Карбіди + Матриця» при імпульсно-плазмовому нанесенні з використанням ЕАПП. Представлено механізм утворення таких покриттів. Вперше встановлено факт насичення продуктів ерозії катоду вуглецем, який випаровується з поверхні стінок камери ЕАПП та забезпечує майже двократне підвищення об'ємної частки карбідів у покритті відносно матеріалу катоду. Вперше запропоновано використовувати катод ЕАПП у вигляді легованого чавуну або сталі ледебуритного класу для нанесення захисних покриттів. Описано структуру покриттів та її еволюцію при пост-плазмовій термічній обробці; показано, що формування карбідної фази в чавунних покриттях може відбуватися через низку твердофазних перетворень при розпаді пересичених твердих розчинів. Це супроводжується зростанням твердості до 1200-1550 HV та різким покращенням трибологічних властивостей покриття. Запропоновано підходи для формування композитних імпульсно-плазмових покриттів без необхідності проведення пост-плазмової термічної обробки, описано відповідні конструкції та хімічний склад катодів ЕАПП, за допомогою яких отримано зносостійкі покриття для використання в умовах сухого тертя та інтенсивного абразивного зношування.

У **шостому розділі** запропоновано нову – «гібридну» – концепцію розробки зносостійких ливарних сплавів з підвищеними трибологічними властивостями. На її основі автором запропоновано нові мультикомпонентні сплави із багатофазною структурою, що складається (у різних комбінаціях) з високотвердих складнолегованих карбоборидів $M_2(B,C)_5$, $M(C,B)$, $M_7(C,B)_3$ та $M_3(C,B)$. Із застосуванням термодинамічного моделювання детально досліджено вплив вуглецю та бору на фазово-структурний стан на властивості Fe-W-Mo-V-Cr-Ti сплавів. Показано, що розроблені сплави мають високий потенціал для використання в умовах абразивного зношування.

В **сьомому розділі** описано практичне використання результатів дисертації шляхом розробки та впровадження у виробництво технологічних схем та параметрів модифікування й нанесення композитних чавуноподібних покриттів із застосуванням сталого плазмового струменю або плазмових імпульсів.

3 Наукова новизна отриманих результатів

До основних наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Показано, що для отримання максимального модифікувального ефекту від плазмової обробки високохромистого чавуну температура нагріву поверхні не повинна перевищувати 1200 °С, а вихідна структура має (перед плазмовим нагрівом) структура повинна бути підготовлена дестабілізуючою термічною обробкою. Встановлено, що плазмова обробка чавуну із аустенітним типом металевої матриці є неефективною в зв'язку з високою стабільністю аустеніту, що унеможливорює мартенситне перетворення і відповідний приріст твердості та трибологічних властивостей.

2. Показано, що поєднання плазмового оплавлення із пост-плазмовою термічною обробкою дозволяє суттєво (на порядок) зменшити розмір

структурних складових (дендритів, евтектичних колоній, евтектичних та вторинних карбідів) у поверхневих шарах легованих чавунів та ледебуритних сталей, що забезпечує максимальний приріст абразивної зносостійкості у порівнянні із плазмовою обробкою без оплавлення.

3. В роботі вперше за допомогою імпульсно-плазмової обробки отримано мікронорозмірні покриття із високолегованих чавунів та досліджено їх фазово-структурний стан та властивості. Показано, що утворення таких покриттів відбувається шляхом надшвидкої $((3-5) \cdot 10^6 \text{ K/s})$ кристалізації продуктів ерозії катоду, перенесених плазмовими імпульсами, що забезпечує отримання в покритті безкарбідної метастабільної структури, що складається із пересичених вуглецем та легуючими елементами твердих розчинів на основі γ - та α -заліза.

4. Описано механізм формування карбідної фази в чавунних імпульсно-плазмових покриттях, який полягає в твердофазних реакціях виділення карбідів при розпаді пересиченого твердого розчину, що формується при кристалізації покриття. Отримано данні щодо кінетики розпаду та послідовності карбідних перетворень в імпульсно-плазмовому чавунному покритті, отриманому за допомогою чавунного катоду із 15 % Cr.

5. Вперше встановлено факт збагачення металевих продуктів ерозії катоду атомами вуглецю, що випаровуються з поверхні діелектричних стінок камери плазмового прискорювача при високострумівому розряді. Це викликає двократне збільшення об'ємної частки карбідів в покритті по відношенню до вихідної структури катоду, що позитивно впливає на твердість та зносостійкість покриття.

6. Вперше описано вплив вмісту вуглецю та бору при одночасному введенні цих елементів на фазово-структурний стан та властивості мультикомпонентних Fe-W-Mo-V-Cr-Ti сплавів, що забезпечило формування а сплавах гетерофазної структури із карбоборидами $M_2(B,C)_5$, $M(C,B)$, $M_7(C,B)_3$ та $M_3(C,B)$, які кристалізуються як у вигляді первинних включень, так і евтектик різного морфологічного типу.

7. Вперше зафіксовано кристалізацію в мультикомпонентних високобористих чавунах гексагонального борокарбіду $M_2(B,C)_5$ із сумарним вмістом W, Mo та V в кількості 45-61 %, який утворює інвертовану евтектику з морфологією «Chinese-script». Показано, що комплексне легування мультикомпонентних сплавів призводить до формування дуплексних карбоборидів із значною нерівномірністю в розподілі карбідоутворюючих елементів (W, Ti, Mo, V та Cr) по перетину включень.

4 Практичне значення результатів роботи

1. Вперше розроблено технологічні засади поверхневої модифікації чавунів та нанесення захисних чавунних покриттів триботехнічного призначення на основі використання електротермічного аксіального плазмового прискорювача (патент України на винахід № 114678).

2. Розроблено математичні моделі температурних полів в металевій поверхні при модифікуванні та нанесенні покриттів імпульсно-плазмовим методом.

3. Розроблено спосіб отримання шаруватих зносостійких покриттів чередуванням матеріалу катоду при імпульсно-плазмовій обробці.

4. Розроблено принцип та конструкцію композитного катоду електротермічного аксіального плазмового прискорювача для отримання зносостійких покриттів різного призначення (патент України на винахід № 119011).

5. Розроблено комбіновані (поверхнево-об'ємні) технології зміцнювальних обробок легованих чавунів та сталей ледебуритного класу із використанням плазмового струменя або плазмових імпульсів (патенти України на винахід № 114978, № 119082, № 121045).

6. Запропоновано «гібридний» принцип легування та розроблено хімічний склад високобористого мультикомпонентного сплаву для застосування в умовах інтенсивного абразивного зношування.

7. Наукові та практичні результати дисертації впроваджені в навчальний процес у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

5 Повнота викладення та апробації основних результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях та доповідях

Дисертація Чабак Ю.Г. та реферат повністю розкривають суть вирішення науково-технічної проблеми. За структурою, об'ємом, стилем викладання та оформленням дисертація Чабак Ю.Г. повністю відповідає вимогам, які висуваються до докторських дисертацій. Основні наукові положення і результати дисертації опубліковані в 49 наукових 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.

Наявність 12 публікацій у журналах із кварталом Q1 та Q2 за класифікацією scimagojr.com 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 машинобудівної, металургійної та переробної промисловостей для виготовлення та зміцнення деталей, що піддаються абразивному, ерозійному та адгезійному зношуванню при експлуатації.

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

7 Зауваження до дисертаційної роботи

1. Дослідження імпульсно-плазмових чавунних покриттів обмежені застосуванням катоду, виготовленого із хромо-марганцевого чавуну, що вміщував 28 % хрому. Із роботи не ясно, яким чином зміниться тип структури та властивості покриттів при використанні катодів, виготовлених із чавунів інших систем легування.

2. В розділі 4 автор говорить про збагачення покриття вуглецем, що випаровується зі стінок плазмового прискорювача. Втім, цей висновок носить непрямий характер, оскільки в роботі не наводяться данні безпосереднього вимірювання вмісту вуглецю в покритті. Очевидно, що процес насичення атомами вуглецю покриттів буде залежати від режимів імпульсно-плазмової обробки та стану стінок камери плазмового прискорювача. Добре було б вказати термін експлуатації діелектричної камери та частоту імпульсів імпульсно-плазмової обробки.

3. В розділі 6, термодинамічним моделювання показано можливість кристалізації в гібридних мультикомпонентних чавунах боридів різних металів (вольфраму, молібдену, хрому, заліза). В той же час, замість цих фаз в сплавах виявлено комплекснолегований карбоборид, який вміщує усі перераховані елементи. Цей факт потребує додаткового пояснення.

4. У науковій новизні дисертації пункт 1 у реченні «Встановлено, що максимальна твердість поверхні (1000-1080 HV) досягається при плазмовій обробці без оплавлення (з нагрівом ≤ 1200 °C) при вихідній структурі «мартенсит +вторинні карбіди» не вказано нижньої межі температури нагріву за якої реалізується максимальна твердість поверхні.

5. У дисертації зустрічаються невдалі терміни: «охолодженням в маслі» - має бути охолодження в оливі, «сухе тертя» має бути тертя без змащення, «миттєвим розігрівом» - миттєвого розігріву немає.

6. Розроблені технічні рішення успішно апробовані та впроваджені автором у виробництво на машинобудівних підприємствах України (ПАТ «НКМЗ», ПАТ «Енергомашспецсталь», ТОВ «ТВІНС-СЕРВІС ЛТД») та Польщі («RB SOLUTIONS SP. Z O.O.») проте не вказано на яких деталях та у яких умовах ці деталі експлуатуються.

7. У дисертації немає порівняльних характеристик по зносостійкості, по вартості та технологічності із іншими методами підвищення трибологічних характеристик деталей: детонаційними покриттями, покриттями напиленими надзвуковим методом HVOF, лазерною обробкою поверхні.

Наведені зауваження не мають принципового значення для загальної позитивної оцінки представленої дисертації.

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 довговічності металовиробів, вироблених із високолегованих ливарних сплавів триботехнічного призначення.

Дисертація Чабак Юлії Геннадіївни відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, та задовольняє вимоги п. 9-13 Постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій. 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,
провідний науковий співробітник
відділу матеріалознавчих основ інженерії
поверхні Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України

Михайло 5 **Михайло СТУДЕНТ**

Підпис Михайла СТУДЕНТА засвідчую
т.в.о вченого секретаря



Михайло ЗАЛІСКО