

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

Дисертаційна робота спрямована на підвищення комплексу експлуатаційних властивостей білих легованих чавунів, які широко використовуються в різних сферах промисловості як матеріал триботехнічного призначення, що має високий опір абразивному, абразивно-корозійному та ерозійному зношуванню. Ці сплави вміщують значну кількість легуючих елементів і мають високу вартість, отже їх використання має бути економічно обґрунтованим. Для досягнення максимальної ефективності необхідно підвищувати експлуатаційну довговічність та надійність чавунів шляхом оптимізації хімічного складу, структури та застосування зміцнювальних технологій. Одним із найбільш перспективних підходів в цьому напрямку є модифікація структури шляхом фазово-структурних перетворень в твердому і рідкому станах, а також нанесення захисних покриттів й поверхневого легування із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії (сталій плазмовий струмінь, високоенергетичні плазмові імпульси, лазерний промінь). Дотепер перераховані методи інженерії поверхні дуже обмежено застосовувались для зміцнювальної обробки легованих чавунів, що зумовлює відсутність необхідних наукових напрацювань та реальних технологічних рішень в цьому напрямі. З урахуванням викладеного, дисертація має наукову й практичну цінність, а її результати є актуальними для підприємств різних галузей вітчизняної промисловості (гірничо-переробна, металургійна, цементна, тощо), деталі й обладнання яких працюють в умовах інтенсивного зношування і потребують частої заміни.

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 на машинобудівних підприємствах України та Польщі, а також впровадженню в навчальний процес підготовки бакалаврів/магістрів за напрямками 132 «Матеріалознавство» та 163 «Біомедичні інжене-

рія» в ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

У *першому розділі* дисертації виконано аналітичні дослідження літературних джерел стосовно використання різних технологій поверхневої обробки (гартування СВЧ, ЕПО, ЛО, тощо) для підвищення експлуатаційної довговічності та надійності виробів із зносостійких сплавів з карбідною евтектикою (високолегованих чавунів та сталей ледебуритного класу). Визначено, що плазмова та імпульсно-плазмова обробки входять до числа найбільш перспективних технологій інженерії поверхні легованих чавунів. 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* дисертації описані досліджені функціональні матеріали (високолеговані чавуни, сірий чавун СЧ-35, конструкційні та інструментальні сталі) та зазначені технології їх обробки (плазмова, імпульсно-плазмова, лазерна). При дослідженнях використовувались сучасні методи фізичного матеріалознавства.

Вивчення мікроструктури здійснювали за допомогою оптичних мікроскопів «Axiovert 40 MAT» (Carl Zeiss), «Eclipse M200» (Nikon, Tokyo, Japan), «Optika IM 3MET» (ОПТИКА, Italy), «GX71» (OLYMPUS) та електронних сканувальних мікроскопів «JSM-7000F» (JEOL), «JSM-6510» (JEOL), «EVO MA15» (Carl Zeiss), «Ultra-55» (Carl Zeiss), «Nova 400 Nano» (FEI). Фазовий хімічний склад визначали локально методом енергодисперсійного аналізу (ЕДА) із використанням детекторів INCAx-sight (Oxford Instruments) та «JED-2300» (JEOL). Об'ємну частку структурних складових визначали лінійним методом Розівалія нанесенням прозорої плівки з 1500 точками на фотографії мікроструктури. Послідовність фазово-структурних перетворень при кристалізації сплавів визначали методом диференційної сканувальної калориметрії (ДСК) на аналізаторі «STA 449-F1» (Jupiter). Фазовий склад сплавів досліджували рентгеноструктурним методом із застосуванням дифрактометрів «X'Pert PRO» (PANalytical), «Ultima IV-Pro» (Rigaku) та ДРОН-3 у $\text{Cu-K}\alpha$ та $\text{Fe-K}\alpha$ випромінюваннях. Визначення мікромеханічних властивостей (нанотвердості, модуля Юнга) виконували наноідентуванням алмазною пірамідкою Берковича на пристрої «Nano Indenter G200» (Agilent Technologies). Мікротвердість визначали за допомогою твердомірів «FM-300» (Future-Tech) та OLYMPUS «GX71» ідентуванням алмазною пірамідкою Вікерса.

Визначення трибологічних властивостей проводили за допомогою наступних методик:

а) абразивне зношування за схемою «Three-Body-Abrasion» (ASTM G-65) проводили на лабораторній установці, виготовленій в ДВНЗ «ПДТУ».

б) адгезійне зношування при сухому терті. Випробування на адгезійне зношування проводили за схемою «Ball-on-Disk» на трибометрі «CSM Instruments» та з використанням трибометра «Micron-tribo» (Micron-System Ukraine).

в) абразивно-ерозійне зношування.

Крім того, в дисертаційній роботі використано планування повного фак-

торного експерименту.

У *третьому розділі* дисертації представлено результати дослідження 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.

В на першому етапі роботи запропановано математичну модель та проведено моделювання нагріву металевої поверхні плазмовим струменем постійної дії, що дало можливість обрати 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 із різним вихідним мікроструктурним станом.

Встановлено, що при застосуванні плазмового гартування без постплазмової термообробки найбільший зміцнювальний ефект (твердість 1000-1080 HV) досягається при вихідній мікроструктурі «Мартенсит + Вторинні карбіди» та плазмовому нагріві до 1000-1200°C без оплавлення поверхні. Застосування ПО для високохромистого чавуну з аустенітною структурою матриці є недоцільним, оскільки не викликає ефекту зміцнення, приводячи до виникнення тріщин на поверхні.

Визначено, що плазмова обробка з оплавленням (1500-1550°C) забезпечує суттєве подрібнення мікроструктурних складових (дендритів, евтектичних колоній, евтектичних карбідів) у високохромистих (15 % Cr) та ванадистих V-Cr-Mn-Ni чавунах із сфероїдальними карбідами ванадію, але супроводжується зниженням твердості і зносостійкості поверхні сплавів у зв'язку із частковим розчиненням карбідів та формуванням аустенітної матриці. Показано, що наступний постплазмовий нагрів при 800-950°C забезпечує суттєве зростання мікротвердості та зносостійкості сплавів за рахунок виділення з аустеніту нанодисперсних вторинних карбідів і перетворення збідненого аустеніту на мартенсит.

Показано, що плазмова обробка без оплавлення поверхні підвищує абразивну зносостійкість високохромистого чавуну максимально на 17-22 %, а V-Cr-Mn-Ni чавунів із сфероїдальними карбідами ванадію – на 19 %.

Показано, що плазмова обробка з оплавленням поверхні і постплазмовим гартуванням від 950°C збільшує абразивну зносостійкість високохромистого чавуну на 29-31 %, а V-Cr-Mn-Ni чавуну – на 29 %. При цьому найбільший ефект від плазмової обробки забезпечується в SCI-чавунах, що містять 4-5 % Cr.

Встановлено, що плазмова обробка з оплавленням сталей ледебуритного класу (Cr-Mn-Si-Ni-V-Mo-B) формує модифікований шар на глибину до 300 мкм з підвищеною однорідністю структури та подрібненням структурних складових. В результаті обробки розміри евтектичних карбідів зменшилися на порядок, а мікротвердість евтектики зросла на 150-200 HV в порівнянні з литим станом. Пост-плазмове гартування від 950 оС забезпечило виділення вто-

ринних карбідів із евтектичного аустеніту, що додатково підвищило мікротвердість евтектики до 1000-1150 HV.

Показано, що обробка сталим плазмовим струменем підвищує на 19-53 % трибологічні властивості високолегованих ливарних сталей ледебуритного класу. Проте, плазмова обробка до сталей з підвищеним (>6-7 %) вмістом аустеніто-стабілізуючих елементів не є ефективним, оскільки не супроводжується зсувним фазовим перетворенням в нагрітому плазмовим струменем поверхневому шарі.

У *четвертому розділі* дисертації розроблено та апробовано розрахункову модель температурного поля в сталях та чавунах при взаємодії з плазмовим імпульсом, що генерується високострумним імпульсним розрядом в камері ЕАПП.

Показано, що в залежності від щільності теплового потоку при ІПО температура сталевий поверхні може підвищуватися до 1400-1680°C, що створює умови для фазових перетворень, або навіть оплавлення приповерхневих шарів на глибину 15-27 мкм. Швидкість нагріву поверхні плазмовим імпульсом може сягати $4,5 \cdot 10^6$ K/c, а швидкість її охолодження – $3,7 \cdot 10^6$ K/c, створюючи умови для модифікування через подрібнення структури та мартенситне перетворення.

Показано, що імпульсно-плазмова обробка за режимами, що забезпечують щільність теплового потоку в межах $(1,4-1,75) \cdot 10^9$ Вт/м², забезпечує модифікування сталі 75Г на глибину 13-26 мкм з формуванням дрібнозернистого мартенситу та зростанням твердості до 670-985 HV, що сприяє підвищенню зносостійкості в умовах сухого тертя ковзанням та зниженню коефіцієнта тертя. Аналогічні зміни структури відбуваються в приповерхневих шарах сірого чавуну СЧ-35 на глибину до 12 мкм.

При збільшенні q_0 до $1,4 \cdot 10^9$ Вт/м² відбувається модифікація чавуну на глибину до 28 мкм з плавленням до глибини 10-12 мкм, що приводить до формування наддрібних колоній ледебуритно-подібної евтектики та утворення високовуглецевого мартенситу із імплантуванням твердого розчину продуктами випаровування електродів та речовини стінок камери ЕАПП (атомами С, W, Cu). Останнє підвищує мікротвердість модифікованого шару до 697-817 HV та забезпечує дворазове зниження абразивного зносу чавуну.

Показано, що в результаті імпульсно-плазмового модифікування за режимом із $q_0=1,4 \cdot 10^9$ Вт/м² поверхня високохромистого чавуну набуває твердості 1000-1050 HV на глибину до 15 мкм. Застосування сталевго катода внаслідок суміщення модифікації із нанесенням твердого сталевго покриття підвищує абразивну зносостійкість високохромистого чавуну на 20 % (700-900 HV).

У *п'ятому розділі* дисертації розроблено математичну модель теплофізичних процесів формування імпульсного-плазмового покриття з використанням електротермічного аксіального плазмового прискорювача. Виявлено дво-хстадійний характер витоку продуктів плазмоутворення із ЕАПП. Встановлено, що питома ерозія катода ЕАПП зростає зі зниженням температури плавлення матеріалу.

Вперше встановлено, що в процесі плазмового перенесення продукти ерозії електродів насичуються вуглецем, який вивільняється при сублімації речовини стінок камери ЕАПП під час електричного розряду.

Визначено, що надшвидка кристалізація продуктів ерозії на поверхні приводить до формування імпульсно-плазмового покриття з термодинамічно нерівноважною мікроструктурою, що складається з пересиченого твердого розчину без крупних карбідних включень. Встановлено, що високий вміст вуглецю та легуючих елементів (Cr, W) в матеріалі катоду сприяє отриманню покриття з переважно аустенітною структурою, що призводить до його розтріскування при кристалізації. При використанні катоду із низьковуглецевої сталі в покритті формується мартенситна структура, яка запобігає утворенню тріщин.

Показано, що пост-плазмова термічна обробка супроводжується розпадом пересиченого аустеніт в покриттях, отриманих із використанням катоду з високохромистого чавуну з 28 % Cr або сталі P18. В процесі розпаду відбувається твердофазне формування великої кількості карбідів з подальшим перетворенням збідненого аустеніту на мартенсит, що забезпечує 2,5-кратне збільшення мікротвердості покриття (до 1200-1550 HV). Формування карбідів відбувається шляхом карбідного перетворення $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$, що відповідає досягненню рівноважного стану металу покриття.

Встановлено, що імпульсно-плазмові покриття, нанесені за допомогою катоду з високохромистого чавуну або ледебуритної сталі, мають високі трибологічні властивості.

Зміна катоду в процесі ППО дозволяє отримувати шаруваті композитні покриття з градієнтною структурою «карбіди + матриця» з утворенням комплекснолегованих карбідних фаз в перехідних (дифузійних) зонах між шарами. Завдяки композитному характеру структури шаруваті імпульсно-плазмові покриття мають більш високу (на 10-20 %) абразивну зносостійкість по відношенню до моношарових покриттів.

Запропоновано та реалізовано принцип використання катодів ЕАПП композитного типу (тугоплавкі включення + легкоплавка зв'язка) для прямого отримання зносостійких імпульсно-плазмових покриттів без пост-плазмової термічної обробки для виділення карбідів. Визначено, що застосування композитів із високим вмістом карбідів не є раціональним для ЕАПП, оскільки мала частка зв'язки призводить до випаровування карбідів, а не їх виявлення, до того ж відбувається зміщення катодної «плями» з катоду до більш електропровідного бронзового кріплення катоду.

Показано, що використання композитного катоду «50 % карбід WC+50 % Al-бронза» дозволило отримати композитне імпульсно-плазмове покриття, синтезоване на поверхні сірого чавуну прямим перенесенням карбідів у нерозплавленому вигляді внаслідок легкого оплавлення бронзової зв'язки. Покриття продемонструвало підвищені трибологічні властивості у порівнянні із міддю при сухому терті в контакт з сталеву поверхню, що робить його перспективним для виготовлення електричних трибоконтатів.

Розроблено конструкцію аксіального катоду ЕАПП у вигляді трубки із

низьковуглецевої нелегованої сталі, заповненої карбідами TiC та WC на епоксидній зв'язці.

Вперше запропоновано та реалізовано використання імпульсно-плазмового нанесення покриття, що містить легуючі компоненти, перед лазерним легуванням поверхні сталей та чавунів в режимі оплавлення. Технологічне поєднання різних концентрованих джерел енергії (лазерного променя та плазмового імпульсу) опробовано при хімічному та структурному модифікуванні сірого чавуну СЧ-35.

У *шостому розділі* проведена розробка хімічного складу та дослідження структури й властивості мультикомпонентних гібридних сплавів трибологічного призначення.

Встановлено, що бор справляє сильну модифікувальну дію на структуру й властивості легуваних чавунів. Додавання невеликої (0,25-0,5 %) кількості бору в чавун з 15 % Cr та 2 % Mo не приводить до утворення боридних фаз, але зменшує евтектичний вміст вуглецю та підвищує об'ємну частку за рахунок M_3C , який входить до складу евтектики «Аустеніт+ M_3C ». Це супроводжується зниженням вмісту залишкового аустеніту, що в комплексі 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. Конкуренція елементів при кристалізації сплавів приводить до формування багатофазної структури, що вміщує різні комплекснолеговані карбоборидні фази високої твердості (до 2700 HV) та зносостійкості.

Проведені систематичні дослідження фазово-структурного стану, межфазового розподілу хімічних елементів та властивостей «гібридних» мультикомпонентних сплавів на Fe-5W-5Mo-5V-10Cr-2,5Ti основі із додаванням 0,3-1,1 % C та 1,5-3,5 % B.

Показано, що бор головним чином контролює формування включень $M_2(B,C)_5$, тоді як вуглець контролює утворення карбобориду $M(C,B)$. Бор та вуглець практично не впливають на об'ємні частки та хімічний склад карбобориду титану та борокарбіду $M_2(B,C)_5$, відповідно.

Визначено характер впливу бору і вуглецю на фазовий хімічний склад карбоборидних фаз.

Показано, що збіднення металевої матриці на хром внаслідок його зв'язування вуглецем і бором в карбоборидні фази приводить до зміни її структурного стану з фериту на перліт та мартенсит.

Встановлено, що 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. Крім того, вуглець підвищує твердість матриці формуванням перлітної або мартенситної структури.

Зазначено, що найбільш сприятливим для абразивної зносостійкості ти-

пом структури для «гібридних» мультикомпонентних сплавів є евтектична структура, що складається з евтектик на основі карбоборидів $M_2(B,C)_5$ та $M_7(C,B)_3$ (спостерігається в сплавах 0,7 % C-1,5 % B та 1,1 % C-1,5 % B).

Визначено, що «гібридний» мільтикомпонентний сплав 1,1C-1,5B продемонстрував 2,7-кратну перевагу в абразивній зносостійкості перед відомим сплавом – високохромистим чавуном 300X13, загартованим на твердість 66 HRC.

Сьомий розділ присвячений розробленню загальні схеми та технологічних параметрів технологій поверхневого модифікування чавунів та сталей та нанесення композитних чавуноподібних покриттів із застосуванням плазмового нагріву.

3 Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розвитку теорії управління структурою високолегованих чавунів та сталей ледебуритного класу трибологічного призначення шляхом оптимізації хімічного складу та застосування комбінованих термічних впливів від висококонцентрованих джерел енергії.

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 матриці.

Встановлено, що максимальна твердість поверхні (1000-1080 HV) досягається при плазмовій обробці без оплавлення 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 мікрометрів) 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 $\gamma(Fe)$ - та $\alpha(Fe)$ -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 $\gamma(\text{Fe})$ - та $\alpha(\text{Fe})$ розчинів із реалізацією карбідних перетворень $\text{M}_3\text{C} \rightarrow \text{M}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6$. 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 сублімації 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 абразивно-стійких чавунів дозволяє формувати багатофазну структуру із комплекснолегованими карбоборидами нестехіометричного складу $\text{M}_2(\text{B,C})_5$, $\text{M}(\text{C,B})$, $\text{M}_7(\text{C,B})_3$, $\text{M}_3(\text{C,B})$ 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 зміни її базового карбобориду у послідовності $\text{M}_2(\text{B,C})_5 \rightarrow \text{M}_7(\text{C,B})_3 \rightarrow \text{M}_3(\text{C,B})$.

7. Вперше показано можливість кристалізації в мультикомпонентних бор-вміщуючих чавунах гексагонального борокарбиду $\text{M}_2(\text{B,C})_5$ 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 $\text{M}_2(\text{B,C})_5$ та $\text{M}(\text{C,B})$ дуплексної («оболонка/ядро») будови, обумовленої суттєвою неоднорідністю в розподілі вольфраму в межах включень.

4 Практичне значення результатів роботи

1. Запропоновано використання електротермічного аксіального плазмового прискорювача (ЕАПП) для поверхневого модифікування чавунів та нанесення трибологічних чавунних покриттів на металеву поверхню.

2. Розроблено та верифіцировано математичні моделі температурного поля в металевій поверхні при плазмовому модифікуванні та нанесенні імпульсно-плазмових покриттів із використанням ЕАПП.

3. Запропоновано та апробовано спосіб отримання шаруватих зносостійких покриттів чередуванням матеріалу катоду (високохромистий чавун, інструментальна швидкорізальна сталь) при імпульсно-плазмовому нанесенні за допомогою ЕАПП.

4. Запропонована конструкція композитного катоду імпульсно-плазмового прискорювача для отримання вільних від тріщин покриттів із композитною структурою «Мартенсит + WC, TiC», без необхідності проведення пост-плазмової термообробки.

5. Розроблено комбіновані (поверхнево-об'ємні) технології зміцнювальних обробок чавунів із застосуванням сталого плазмового струменя або плазмових імпульсів та пост-плазмової термічної обробки.

6. Плануванням та реалізацією повного факторного експерименту визначено оптимальний вміст вуглецю та бору у «гібридних» мультикомпонентних сплавах задля отримання максимальної абразивної зносостійкості.

7. Результати дисертаційної роботи успішно апробовано та впроваджено на машинобудівних підприємствах України (ПАТ «НКМЗ», ПАТ «Енергомаш-спецсталь», ТОВ «ТВІНС-СЕРВІС ЛТД») та Польщі («RB SOLUTIONS SP. Z O.O.»).

8. Отримані результати досліджень впроваджено в навчальний процес на кафедрі матеріалознавства та перспективних технологій та на кафедрі біомедичної інженерії ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямками 132 «Матеріалознавство», 163 «Біомедичні інженерія».

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

Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи були опубліковані в 49 наукових роботах, в тому числі в 25 статтях в зарубіжних журналах, включених до НБД Scopus (із них 12 статей у журналах з Q1 та Q2), 9 статтях в спеціалізованих фахових виданнях категорії Б, 5 патентах на винахід, 8 тезах доповідей на конференціях та 2 монографіях.

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.

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 дисертаційної роботи вже успішно апробовано та впроваджено на машинобудівних підприємствах України (ПАТ «НКМЗ», ПАТ «Енергомаш-спецсталь», ТОВ «ТВІНС-СЕРВІС ЛТД») та Польщі («RB SOLUTIONS SP. Z O.O.»).

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

7 Зауваження до дисертації

1. Дисертант провів дослідження зносостійкості плазмово-напилених покриттів методом сухого тертя ковзанням. При цьому випробування проводились в контакт з контртілом (кулькою), виготовленою з різних матеріалів. Втім, в дисертації не дається чітке пояснення принципу вибору матеріала контртіла та застосованих параметрів випробування, таких, як нормальне навантаження, швидкість ковзання та шлях тертя.

2. В розділі 6 з використанням повного факторного експерименту запропоновано хімічний склад нового високобористого мультикомпонентного сплаву для використання в умовах інтенсивного абразивного зношування. Чи цей склад є оптимальним? Чи доцільно застосувати до нього термічну обробку? В дисертації не розглядаються можливі шляхи подальшого підвищення властивостей сплавів цієї групи.

3. В розділі 4 перевірка розробленої математичної моделі нагріву плазмовим імпульсом проводилась на зразках із сталі 75Г. Треба пояснити застосування цієї сталі в якості модельного сплаву, адже вона не вміщує таку кількість легуючих елементів, яка характерна для легованих чавунів та сталей ледебуритного класу.

4. З тексту дисертації не зрозуміло, чому в якості пост-плазмової обробки імпульсно-плазмових покриттів у всіх випадках використовували лише один режим, тобто дестабілізацію при 950 °С, незважаючи на різній хімічний склад покриття?

5. Звертає на себе увагу те, що в усіх наведених в дисертації варіантах хімічного складу імпульсно-плазмових покриттів є відсутнім азот. Це потребує пояснення, оскільки розряд в камері прискорювача відбувався за наявності повітря, тобто атоми і іони азоту мали б приймати участь у формування плазмового імпульсу цьому процесі і імплантуватися в «тіло» покриття.

6. В дисертації не наводяться експериментальні кількісні дані щодо зміни напруженого стану поверхні металевих зразків внаслідок нанесення чавуноподібних імпульсно-плазмових покриттів.

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 управління структурою високолегованих чавунів та сталей ледебуритного класу трибологічного призначення шляхом оптимізації хімічного складу та застосування комбінованих термічних впливів від висококонцентрованих джерел енергії.

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, доцент,
професор кафедри фізичного
матеріалознавства
та термічної обробки
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»


Тетяна ЛОСКУТОВА

Підпис Тетяни Лоскутової засвідчую
Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського




Валерія ХОЛЯВКО