

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Присяжнюка Павла Миколайовича**  
на тему **“НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОУДАРОТРИВКИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ “ВИСОКОМАРГАНЦЕВА СТАЛЬ – ТУГОПЛАВКІ СПОЛУКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ”**, поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство

### Актуальність теми дисертації

Специфіка роботи різних сталевих деталей, що експлуатуються в умовах зношування в багатьох галузях виробництва, потребує забезпечення високої стійкості їх поверхневих шарів, у тому числі за ударних навантажень, шляхом наплавлення зносотривких покриттів які складаються з твердої фази (карбідів, боридів, карбоборидів), вкрапленої в армівну фазу. При цьому виникає низка матеріалознавчих проблем, зокрема значне зниження тріщиностійкості наплавленого металу внаслідок крихкого руйнування і армівних фаз, і структурних складових (евтектик, ітерметалідів, карбідної сітки тощо) за їх участю. Натомість використання ударотривких вольфрамових матеріалів знижує рентабельність наплавлувальних робіт через стійку загальносвітову тенденцію до зростання цін на вольфрамову сировину.

Аналіз результатів сучасних досліджень фізико-хімічної взаємодії у системах “сталь–тугоплавка сполука”, перспективних для створення зносотривких покриттів та теоретичних аспектів моделювання аустенітної структури показує, що під час вибору систем легування матеріалів для наплавлення проявляється тенденція до ширшого застосування багатокомпонентних, у тому числі, й високоентропійних сплавів та карбідів перехідних металів. Такі підходи є перспективними для розроблення нових систем легування високомарганцевих сталей оптимального складу, формування у структурі стабільних карбідних фаз з позиції забезпечення зносо- та ударотривкості. Іншим перспективним напрямком створення таких покриттів, є використання для наплавлення порошкових електродів, шихта яких містить реакційні суміші, що забезпечують *in situ* формування твердих фаз у структурі марганцевої сталі.

Таким чином, подальший розвиток наукових основ створення зносо- та ударотривких покриттів на високомарганцевих сталях, що базується на виборі оптимальної системи їх багатокомпонентного легування тугоплавкими карбідами та формуванні зносотривких фаз безпосередньо під час електродугового наплавлення покриття на їх поверхні є актуальною науково-прикладною проблемою сучасного матеріалознавства.

### Загальна характеристика роботи

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, які містять 185 рисунків, 17 таблиць, висновків, додатків і списку використаних джерел із 303 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 384 сторінки (обсяг основного тексту – 309 сторінок).

У **вступі** обґрунтовано стан та актуальність теми дисертаційної роботи, вказано її зв'язок із науковими програмами, визначено мету та завдання досліджень та основні напрямки її досягнення, наукову новизну і практичну цінність

отриманих результатів, наведено відомості про апробацію, впровадження та публікацію основних результатів дисертаційних досліджень.

У **першому розділі** на основі огляду літературних першоджерел проаналізовано основні сучасні напрямки інженерії поверхні. З критичних позицій розглянуто класичні підходи до розроблення електродних матеріалів для електродугового наплавлення, які здебільшого мають емпіричний характер.

Обґрунтовано доцільність формування поверхневих шарів на високомарганцевих сталях з найбільш сприятливою матрично-армованою структурою, утвореною завдяки легуванню тугоплавкими перехідними металами IV-VI групи періодичної системи елементів у різних комбінаціях із вуглецем та бором, що забезпечує утворення твердих армівних фаз.

Сформульовано основні вимоги до таких фаз: висока термодинамічна стабільність за умов електродугового наплавлення та тугоплавкість; характер структуроутворення, що забезпечує їх виділення у вигляді рівномірно розподілених включень у структурі сталі як основи композиційної будови поверхневого шару; висока змочуваність розплавом високомарганцевої сталі поряд із низькою взаємною розчинністю (особливо стосовено Mn в армівній фазі).

Показано переваги наплавлення матеріалами на основі високомарганцевих сталей, порошковими стрічками з додаванням до їх складу значної (до 20 ат. %) кількості карбідо- та/або боридотвірних елементів.

На основі узагальнення літературних даних обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень.

У **другому розділі** охарактеризовані матеріали та методики досліджень, зокрема їх методологія.

Для теоретичних досліджень із аналізу кристалічної структури, механічних та термодинамічних властивостей ключових фаз в наплавлених шарах було вибрано розрахунки в рамках теорії функціоналу електронної густини із використанням суперкомп'ютера HPC Aprocrita та застосуванням ліцензованих програмних кодів VASP, CASTEP та Quantum Espresso, а також програмних засобів (ATAT) та методик, призначених для моделювання неупорядкованих твердих розчинів методами структурної інверсії та спеціальних квазінеупорядкованих структур.

Теоретичне визначення рівноважного фазового складу сплавів для наплавлення (з метою пошуку їх оптимального компонентного складу) проведено в рамках методу CALPHAD із використанням програмного пакету Thermo-Calc 2022 та створеної бази даних термодинамічних функцій для систем Fe-Mn-Ti-Nb-Mo-V-C-Si та Fe-Mn-Mo-V-C.

Матеріали для наплавлення виготовляли у вигляді однозамкових порошкових стрічок заповнених сумішами порошків NbC, TiC, VC, Mo<sub>2</sub>C, V<sub>4</sub>C, Mo, CaF<sub>2</sub>, Mn, рутилу та феросилікомарганцю. Наплавлення різних композицій на сталь 45 здійснено на постійному струмі зворотної полярності.

Для експериментального дослідження структури та фазового складу наплавлених шарів було використано електронну та оптичну мікроскопію, рентгенівський фазовий, флуоресцентний та мікрорентгеноспектральний аналізи, мессбауерівську спектроскопію.

З метою оцінки механічних властивостей наплавлених шарів було вибрано методи вимірювання макро- та мікротвердості методами індентування, динамічної твердометрії, а також склерометричних досліджень (скретч-тестів). Експлуатаційні характеристики оцінювали за результатами триботехнічних випробувань за тертя в умовах незакріпленого абразиву, ударно-абразивного, та газоабразивного зношування, а також за тертя з металевим контртілом.

**Розділ 3** присвячено теоретичному аналізу кристалічної структури та властивостей фаз у системі “високомарганцева сталь–тугоплавкі структури” на основі першопринципних розрахунків. Розділ складається з чотирьох підрозділів, присвячених різним фазам: аустеніту, карбідам системи Ti-Nb-V-Mo-C та боридам  $Mo_2MB_2$  (де  $M$  відповідає Fe, Mn).

В підрозділах 3.1 та 3.2, з метою побудови достовірної моделі кристалічної структури марганцевого аустеніту, який є основною фазою у покриттях, проведено експериментальні дослідження на зразках (склад, мас. % : ~19 Mn, ~1,5 C, решта Fe). Для високомарганцевих сталей у литому та деформованому стані методом мессбауерівської спектроскопії отримано результати (рис. 3.1), які показали, що експериментальний спектр марганцевого аустеніту в обох випадках формується комбінацією дублетних та синглетних компонент. Можна стверджувати, що фази на основі  $\alpha$ -Fe відсутні і всі атоми Fe є антиферомагнітними і у литому (рис. 3.1, а), і в наклепаному стані (рис. 3.1, б). Відповідно, основним механізмом наклепу визнано деформаційне двійникування (*TWIP*), яке не супроводжується фазовими перетвореннями. До того ж результати рентгенівського фазового складу (рис. 3.4) показали, що основою фазою наплавленого шару є  $\gamma$ -Fe із гранецентрованою ґраткою та параметром  $a = 3.576 \text{ \AA}$ , близьким до параметру ґратки аустеніту литої сталі Гадфільда та металу шва у зварних з'єднаннях  $3.60 - 3.62 \text{ \AA}$ . Розраховані значення пружних констант для антиферомагнітного  $\gamma$ -Fe та аустеніту різного формульного складу (таблиця 3.2) добре узгоджуються з експериментальними даними. У підрозділі 3.2 проведено порівняльний аналіз електронної будови аустеніту різного формульного складу. Розрахована повна густина електронних станів аустенітних структур різного складу (рис. 3.11) вказує на схожість їх електронної будови, а відсутність енергетичних щілин поблизу рівня Фермі (нульова точка енергії) є ознакою закономірного домінування металевого типу зв'язку. Узагальнення результатів даних експериментальних досліджень та результатів моделювання дали змогу показати, що розчинення Mn призводить до підвищення стабільності аустенітної фази. Це є передумовою для запобігання небажаного виділення цементитної фази, яка, у тому числі, спричиняє зниження здатності до наклепу.

У підрозділі 3.3. для врахування усіх можливих комбінацій металевих компонентів у підґратці карбідів типу  $MC$  в межах системи Ti-Nb-Mo-V-C було створено моделі із еквімолярним атомним вмістом металів та проведено оптимізацію геометрії для 15 структур, із яких чотири монокарбіди, шість подвійні, чотири потрійні та один чотирикомпонентний. Розраховані параметри ґраток вказаних структур відображають дані експериментів із точністю 99,7 – 98,9%. Це дало змогу розраховувати механічні властивості: модулі пружності, твердості та тріщиностійкості. Їх аналіз вказує на те, що у загальному випадку перехід від монокарбідних до складних карбідних фаз супроводжується

підвищенням механічних властивостей. Зокрема, найвищу твердість мали структури, які містили Ti у комбінації із V та Mo. Однак, карбідні фази (Ti,V)C та (Ti,V,Mo)C, що містили V, характеризувалися низькою тріщиностійкістю ( $K_{Ic}$ ). Водночас високі значення  $K_{Ic}$  властиві складним карбідним фазам, які містили одночасно Ti та Mo (максимальні значення отримано для фаз (Ti,Mo)C та (Nb,Ti,Mo)C. Таким чином, на основі порівняльного аналізу, було з'ясовано, що найсприятливіша комбінація характеристик властива для фази (Nb,Ti,Mo)C.

За результатами першопринципних розрахунків кристалічної та електронної структури потрібних боридів  $Mo_2FeB_2$  та  $Mo_2MnB_2$  було встановлено їх суттєву подібність. Моделюванням невпорядкованих розчинів  $Mo_2(Fe_xMn_{1-x})B_2$  було встановлено, що розчинення Mn у сполуці  $Mo_2FeB_2$  дає змогу підвищити значення пружних модулів та розрахованої твердості на ~10%.

В **четвертому розділі** представлено термодинамічний аналіз наплавлюваних сплавів системи “високомарганцева сталь–тугоплавкі сполуки”. Описано алгоритми розрахунку, обрано термодинамічні моделі формування фаз та їх параметри.

Для систем легування перспективних для розроблення зносоударотривких сплавів вибрано та систематизовано термодинамічні моделі “конкуруючих” фаз та параметри, що описують взаємодію компонентів у фазах. Шляхом використання нових поправочних коефіцієнтів удосконалено методику першопринципного розрахунку енергій формування для боридних фаз молібдену та визначено енергії формування для сполук  $Mo_2FeB_2$  (-53830 Дж/моль) та  $Mo_2MnB_2$  (-44698 Дж/моль). Також, на основі розрахунку та подальшого аналізу фононних спектрів було отримано набір нових термодинамічних параметрів, що описують енергетичний стан твердих розчинів  $Mo_2(Fe_xMn_{1-x})B_2$ . Аналогічні параметри було розраховано і для твердих розчинів на основі карбідів  $(M_xMn_{1-x})C$ , де  $M=Ti, Nb, V$ . Поєднання відомих даних та результатів розрахунків у вигляді термодинамічної бази, скомпільованої у форматі TDB, дало змогу прогнозувати фазовий склад сплавів у системах легування Fe-Mn-Ti-Nb-Mo-V-C-Si та Fe-Mn-Mo-B-C із використанням програмних засобів Thermo-Calc та OpenCalphad. Ґрунтуючись на цьому розраховано кінетику виділення цементитної фази із марганцевого аустеніту та встановлено, що ефективно гальмування цього процесу забезпечується легуванням 4 % Si.

У **п'ятому розділі** описано формування структури та фазового складу сплавів системи “високомарганцева сталь–тугоплавкі сполуки”. Для систем “високомарганцева сталь–карбід” виявлено суттєвий вплив виду карбідної фази на характер структуроутворення у наплавленому шарі. Так, за використання карбідів Nb та Ti у наплавленому шарі формувалися армівні фази кубоїдної форми, що рівномірно розподілялися у ньому. Тоді як легування VC та  $Mo_2C$  призводило до виділення карбідів переважно вздовж меж аустенітних зерен. Аналіз фазового складу та структури наплавлених шарів системи легування Fe-Nb-Ti-Mo-C показав, що найоптимальнішим є легування еквімолярними кількостями карбідів NbC, VC,  $Mo_2C$ , оскільки внаслідок цього формувалася твердий розчин складу  $(Ti_{0.3},Nb_{0.3}Mo_{0.3})C$ , що характеризувався ограненою морфологією та розмірами до 30 мкм. Слід зазначити, що формування цієї фази добре узгоджується із результатами теоретичних розрахунків наведених у

розділах 3 та 4. Співставлення результатів розрахунків та експериментальних результатів стало підґрунтям для розроблення електродних матеріалів, що забезпечували формування аустенітно-карбідної структури та складу поверхневого шару відповідно до марки 360Г15М6Б6Т3С3Ф. У системі Fe-Mn-Mo-W-C, як найбільш оптимальний, було запропоновано наплавлений шар типу 70М24Г13Р3, який забезпечив заевтектичну аустеніто-боридну структуру із вмістом армівної фази у вигляді твердого розчину  $\text{Mo}_2(\text{Fe}_{0.75}\text{Mn}_{0.25})\text{B}_2$  із мікротвердістю  $\sim 23$  ГПа в межах 30 – 32 об. %.

У шостому розділі представлено результати склерометричних, мікродюрометричних та трибологічних досліджень розроблених для наплавлення сплавів 360Г15М6Б6Т3С3Ф та 70М24Г13Р3.

Встановлено, що за умов ударно-абразивного зношування зносотривкість сплаву 360Г15М6Б6Т3С3Ф у  $\sim 3$  рази вища порівняно із серійним сплавом (на основі високомарганцевої сталі) марки ОК13МН (ESAB, Швеція), а під час газоабразивного зношування (за кута атаки  $90^\circ$ ) у  $\sim 1.5$  рази перевищив зносотривкість, шарів наплавлених серійними електродами Т560. Такі характеристики, пояснено із позиції поєднання деформаційного та дисперсійного зміцнення у поверхневому шарі. Показано, що сплав 70М24Г13Р3 демонструє високу зносотривкість за умов ударно-абразивного зношування, коли домінував вплив абразивної складової зношування. Зокрема, за тертя в умовах незакріпленого абразиву сплав 70М24Г13Р3 забезпечив зносотривкість, сумірну із серійним сплавом системи WC-Ni (бренд Castolin Eutectic) та значно (на 30 %) перевищив зносотривкість серійного високохромистого сплаву EnDOtec DO\*332. При цьому простежується досить суттєвий взаємозв'язок між твердістю, виміряною методом склерометрії та абразивною зносотривкістю за тертя в умовах незакріпленого абразиву.

У розділі 7 розглянуто області промислового застосування розроблених сплавів для наплавлення систем “високомарганцева сталь–тугоплавкі сполуки” До них належать реставрація робочих поверхонь (секцій) роторів розмелювальних агрегатів – багатосекційних роторів машин для подрібнення широкого спектру будівельних матеріалів, відновлення замків бурових труб, зміцнення конічних різців та скребків дорожніх фрез, корпусів різців гірничих машин, наплавлення поверхні зубів екскаватора тощо.

Слід особливо відзначити, що розроблений сплав 70М24Г13Р3 використаний для наплавлення фронтальних поверхонь бронепластин для захисту особового складу, виготовлених із сталі Armoх® 440Т, і дав змогу підвищити рівень їх балістичної стійкості до 4-того класу захисту.

**Висновки** повною мірою відображають основні результати дисертаційної роботи.

**Додатки** містять інформацію про впровадження та апробацію результатів роботи та перелік опублікованих праць за темою дисертації.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність**

**Обґрунтованість** основних наукових засад, результатів, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи Присяжнюка П. М. підтверджено ґрунтовним аналізом сучасних літературних джерел, чітким формулюванням

мети, основних завдань досліджень та шляхів їх реалізації, зокрема використання новітніх комп'ютерних програм, ліцензованих програмних кодів, а також інших програмних засобів.

**Достовірність** наукових положень дисертації підтверджується значним обсягом експериментальних досліджень, отриманих з використанням сучасного науково-дослідного обладнання. Інтерпретація результатів досліджень узгоджується з фундаментальними положеннями матеріалознавства, трибології та фізики твердого тіла.

Отримані результати апробовані на міжнародних, вітчизняних та закордонних конференціях, зокрема і таких що індексуються у науметричній базі дані Scopus.

### **Наукова новизна отриманих у роботі результатів**

До основних наукових здобутків дисертаційної роботи слід віднести розроблення концептуальних засад формування зносо- ударотривких сплавів для електродугового наплавлення, в яких поєднано термодинамічний аналіз, моделювання неупорядкованих твердих розчинів в рамках теорії функціоналу електронної густини, прецизійні дослідження фазового складу, структури та властивостей сплавів систем легування Fe-Ti-Nb-Mo-V-Mn-Si-C та Fe-Mn-Mo-V-C.

Отримано важливі дані стосовно природи фазових переходів та формування кристалографічної структури. Застосування новітніх комплексних програмних засобів для обчислень дало змогу підвищити точність обчислень, що важливо для прогнозування функціональних властивостей матеріалів.

На основі аналізу експериментальних мессбауерівських спектрів легового марганцевого аустеніту, сформованого під час електродугового наплавлення, запропонована модель кристалічної структури марганцевого аустеніту і розраховано фізико-механічні властивості, що впливають на характер деформаційного зміцнення.

Розвинуто теорію моделювання неупорядкованих твердих розчинів, що дозволило встановити оптимальний склад карбідної  $((\text{Nb}_{0.3}\text{Ti}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C})$  та боридної  $(\text{Mo}_2(\text{Fe}_{0.75}\text{Mn}_{0.25})\text{B}_2)$  фаз, необхідний для зміцнення наплавлених шарів на основі високомарганцевих сталей.

Вперше розраховано термодинамічні параметри, які визначають розчинність Mn у фазах  $(M,\text{Mn})\text{C}$ , де  $M$  відповідає Nb, Ti, Mo та V, та  $\text{Mo}_2(\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x})\text{B}_2$ , що дало змогу створити базу даних термодинамічних функцій для розрахунку фазової рівноваги та концентраційних діапазонів, що відповідають типовим елементним складам покриттів, наплавлених порошковими електродними матеріалами. Запропоновано новий емпіричний параметр ( $\delta_{\mu} = +22905$  Дж/моль), який забезпечив підвищення точності розрахунку енергії формування боридних фаз молібдену та вперше обчислено, енергію формування тетрагонального бориду  $\text{Mo}_2\text{MnB}_2$  ( $-44698$  Дж/моль).

Вперше встановлено, що додаткове легування шихти порошкових електродів карбідами Nb та Ti (до 20 об. %) забезпечило формування у структурі марганцевого аустеніту наплавленого покриття аустеніто-карбідної структури, де карбідні фази середнім розмірами 4 і 2 мкм, відповідно, характеризувалися кубоїдною формою та рівномірним розподілом, в той час як легування

карбідами Мо та V в аналогічних кількостях призвело до переважного виділення карбідних фаз у вигляді сітки вздовж меж аустенітних зерен.

На основі досліджених закономірностей формування структури та фазового складу запропоновано сплав 360Г15М6Б6Т3С3Ф із ударотривкістю, вищою на порядок порівняно з серійними високохромистими сплавами типу Т-620. Розроблений наплавлений метал типу 70М24Г13Р3 забезпечив абразивну зносотривкість на рівні наплавлених шарів із використанням серійних вольфрамових сплавів WC-Ni та WC-Fe.

### **Практична цінність одержаних результатів**

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень, а також стендових та промислових випробувань у виробництво впроваджено два типи нових порошкових електродних матеріалів складу 360Г15М6Б6Т3С3Ф та 70М24Г13Р3 для наплавлення а також технологію нанесення зносоударотривких покриттів для відновлення (робочі елементи, розмелювального та дробильного обладнання, деталі що працюють за високих питомих динамічних навантажень в присутності абразиву) та зміцнення (робочі поверхні гірничого, землерийного та переробного обладнання). Розроблено базу даних термодинамічних функцій (у форматі TDB) для багатокомпонентних систем Fe-Ti-Nb-Mo-V-Mn-Si-C та Fe-Mn-Mo-V-C, яку легко можна інтегрувати в сучасні комерційні та некомерційні програмні засоби для розрахунку діаграм фазової рівноваги. Розроблені та захищені патентами України пристрої та методи для визначення абразивної зносотривкості за умов газоабразивного зношування та абразивного зношування (при закріпленому і незакріпленому абразиві). Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес ІФНТУНГ для підготовки бакалаврів зі спеціальності 131 Прикладна механіка (дисципліна “Матеріалознавство”) та докторів філософії зі спеціальності 132 Матеріалознавство (дисципліни “Матеріалознавство” та “Порошкова металургія”).

### **Повнота викладення та апробації основних результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях**

Основні результати та висновки дисертаційної роботи в повному обсязі висвітлено в 28 наукових статтях, з них: 15 у наукових фахових виданнях України та інших держав, які індексовані міжнародними наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science; одержано 6 патентів України на винахід та 1 – на корисну модель; опубліковано 14 матеріалів і тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях, в тому числі 4 індексовані в Scopus; 2 розділи у колективних монографіях.

Реферат дисертації повністю відповідає основним положенням дисертації. Матеріал в роботі викладено логічно та послідовно, розділи взаємопов’язані та повністю розкривають поставлену в роботі мету.

### **Використання у докторській дисертації результатів, які виносилися на захист в кандидатській дисертації**

Наукові положення і результати, що виносилися на захист у кандидатській дисертації, не використовувалися в докторській дисертації здобувача.

## **Оцінка мови та стилю дисертації. Відповідність дисертації спеціальності 05.02.01 - матеріалознавство**

Дисертаційна робота викладена професійно, кваліфіковано та грамотно. Матеріали викладено у логічній послідовності, систематизовані та графічно оформленні.

За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. На рис. 5.59 та рис. 6.1 наведено структуру та результати склерометричних досліджень сплавів із різним вмістом Mo+W та Mn, відповідно. Проте у розділі 2 (підрозділ 2.3.1) не вказано, яким чином технологічно регулювався склад шихти для забезпечення такої зміни складу сплавів за умови, коли коефіцієнт заповнення порошкової стрічки залишався незмінним (рівняння 2.36).

2. Методику трибологічних випробовувань слід було б доповнити випробуваннями в умовах закріпленого абразиву, наприклад із використанням установки типу Х4-Б або ж її аналогів.

3. Знос зразків за результатами трибологічних випробовувань в одних випадках наведено за втратою маси (рис. 6.4, рис. 6.8, рис. 7.9), а в інших – (рис. 6.6, рис. 6.11) за втратою об'єму. Це ускладнює порівняння результатів і не зовсім зрозуміло, чим це зумовлено. До того ж не розкрито, як саме було проведено визначення зносу за об'ємом.

4. Розділ 6 (підрозділ 6.1) містить результати вимірювання твердості методом склерометрії. Тут варто було б вказати як виміряна величина корелює із твердістю, виміряною методом індентування і пояснити відмінності.

5. Хоча в завданнях досліджень не передбачене визначення змочуваності твердих частинок матрицею, доцільно було б вказати змочуваність досліджених тугоплавких сполук розплавом марганцевого аустеніту, яка значною мірою впливатиме на властивості наплавленого металу.

6. Важливо зазначити, що розроблений сплав 70M24Г13P3 за абразивною зносотривкістю є сумірним із серійними вольфрамовими сплавами, проте як видно із рис. 6.11. його зносотривкість виявилася на 12 % нижчою, а на рис. 7.9 – практично удвічі вищою. Доречно було б провести порівняльний аналіз для виявлення причин таких розбіжностей.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому**

За актуальністю, науковою новизною, обсягом проведених теоретичних і експериментальних досліджень, їх науковою та практичною цінністю, дисертаційна робота є завершеною науковою роботою, не містить академічного плагіату та задовольняє вимоги, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук (п. 7 та п. 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197).



Підсумовуючи вищесказане, вважаю, що **Присяжнюк Павло Миколайович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент:  
провідний науковий співробітник відділу  
матеріалознавчих основ інженерії поверхні  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
доктор технічних наук, професор



Михайло СТУДЕНТ

Підпис д.т.н., проф. М. М. Студента засвідчую

Учений секретар ФМІ ім. Г. В. Карпенка  
НАН України



Валентина КОРНІЙ