

До Спеціалізованої Вченої ради  
Д 64.832.04 у Харківському національному технічному університеті  
сільського господарства імені Петра Василенка

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Клочко Оксани Юріївни

“Теоретичне та експериментальне моделювання і прогнозування  
структурування та властивостей хромовмісних сплавів та покриттів”,  
представленої до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство

### Актуальність теми дисертації.

Вимоги, що пред'являються до металопродукції як внутрішніми, так і зовнішніми користувачами, постійно зростають. Це пов'язано з високими темпами розвитку машинобудування, металургійної та інших галузей. У зв'язку з цим стає актуальним пошук нових шляхів забезпечення підвищення рівня показників, які відповідають сучасним вимогам. Це особливо важливо для виробів, які працюють в умовах високих питомих тисків, ударних навантажень, тертя і зношування, а також підпадають під вплив термоциклічного нагріву до підвищених температур. Такі умови експлуатації потребують активізації змін процесів структурування в умовах зростання напруженого стану фаз металу, що визначають ступінь деградації робочої поверхні. Для виготовлення таких виробів широко застосовують хромовмісні конструкційні матеріали. Забезпечення їх надійної роботи та підвищення експлуатаційної стійкості визначаються стабільністю властивостей, процесами структурування, що протікають при різних технологіях їх виробництва і умовах експлуатації.

Рішення даної проблеми можливо реалізувати за допомогою нових напрямів, спрямованих на виявлення факторів і закономірностей, що визначають підвищення рівня властивостей, шляхом створення необхідних умов і парамет-

рів виробництва. Такий напрям досліджень може бути реалізовано на основі побудови математичних моделей з оцінкою структурного стану для різних матеріалів. Тому при пошуку шляхів підвищення експлуатаційної стійкості виробів необхідним є дослідження впливу різних процесів структуроутворення при отриманні хромовмісних матеріалів, які дозволять з високою точністю прогнозувати рівень властивостей і експлуатаційну стійкість.

Клочко О.Ю. зосередила увагу на створенні основ підвищення експлуатаційної стійкості виробів з хромовмісних сплавів та покриттів, що працюють в складних умовах, шляхом теоретичного та експериментального моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей. Саме тому дане дисертаційне дослідження, спрямоване на вирішення зазначеної проблеми, безумовно є актуальним.

#### Оцінка змісту дисертації.

Дисертація має обсяг основної частини 317 сторінок, складається з вступу, семи розділів, висновків та переліків джерел посилання, містить 9 додатків. Основний зміст роботи ретельно і вірно відображений у авторефераті. Дисертація має струнку загальну структуру, логічно побудована і являє собою комплексну роботу, яка містить дослідження від аналізу впливу різних факторів виробництва на структуроутворення та властивості хромовмісних сплавів та покриттів, теоретичних і експериментальних досліджень процесів і закономірностей формування та зміни їх структури до розробки методів отримання та підвищення експлуатаційної стійкості виробів та результати їх промислових випробувань і впровадження.

У першому розділі дисертації виконаний ґрунтовний аналіз науково-технічної інформації, який показав перспективність використання для виробів, що працюють в складнонапружених умовах хромовмісних сплавів та покриттів. Виявлено залежність рівня властивостей хромистих чавунів від типу формованої карбідної фази, вираженої анізотропії структури, що обумовлена формованою неоднорідністю за напрямом тепловідведення при кристалізації. Проте не виявлено відомостей про стан зерен металу при локальній неоднорідності, що

сформована в межах однієї фази, а також не відомо її вплив на рівень локалізації деформацій.

Проаналізовано чинники, що викликають руйнування робочої поверхні виробів. Узагальнено інформацію про вплив різних експлуатаційних факторів на структурні зміни і сформульовані вимоги до матеріалу хромовмісних покриттів і сплавів для виробів, що працюють в складних умовах тертя. Показано, що основними механізмами деградації структури є дислокаційний і дифузійний процеси її формування, а також, що існуючі методики виявлення дислокаційних структур, не дозволяють достовірно оцінити ступінь локальної неоднорідності, сформованої як всередині одного зерна, так і в межах однакових фаз, в результаті впливу напружень і розвитку дифузійних процесів. Розглянуто недоліки та переваги різних шляхів вирішення проблеми підвищення рівня службових властивостей, контролю їх якості, в тому числі за рахунок прогнозування структуроутворення.

Аналіз результатів сучасних наукових та прикладних досліджень оцінки структурного стану хромовмісних сплавів і покриттів, для надійного прогнозування зміни стану системи, яка формується в період усього життєвого циклу використання виробів, дозволив виявити основні досягнення, протиріччя та проблеми, обґрунтовано визначити напрямки та задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі обґрунтовується методологія досліджень для вирішення поставлених завдань та досягнення основної мети. Основні етапи досліджень наведено через причинно-наслідкову діаграму, змінену з урахуванням особливостей роботи, що дозволяє краще зрозуміти необхідність застосування конкретних методів та методик, а також їх у комплексі. Використані як традиційні методи і методики досліджень - оптичну і електронну мікроскопію, рентгеноструктурний аналіз, оцінку твердості, мікротвердості та рівня напружень, згідно рівня коерцитивної сили, - так і нові розроблені методики досліджень з використанням оптико-математичного опису фазового складу, а також процесів впливу дифузії, щільності фрагментів, що формуються, дисипації енергії.

Являє інтерес розроблена методика аналітичного дослідження, заснована на гідродинамічних аналогіях, що відбуваються при формуванні фаз (дисипація енергії, дифузійне перенесення, зміна щільності). Математичною основою її є розроблений метод оптико-структурного аналізу з оцінкою цифрованих зображень, що розрізняються за статистичними характеристиками (розподілом пікселів). Доцільність і обґрунтованість використання даної методики, інформативність результатів доведена у наступних розділах дисертації. Добре, що спосіб оцінки неоднорідності, що визначає інтенсивність зміни щільності дислокаційної структури і ступінь дисперсності складових сплаву, за допомогою енергетичних параметрів - функцій потужності дисипації енергії і напружень, запропонований автором, захищений патентом. Позитивною рисою дисертації є те, що автор обрала комплекс методів теоретичного та експериментального моделювання таким чином, щоб отримані результати дозволили з високим ступенем вірогідності прогнозувати процеси структуроутворення, формування властивостей матеріалу, а також показники якості виробів.

Третій розділ дисертації присвячений розробці нового підходу в дослідженнях мікроструктур по металографічним зображенням шляхом оцінки поєднань умовних кольорів і абсолютних значень лапласіана фрагмента зображення, що відображає дисипацію енергії системи при зміні структурного стану. Це дозволило локально з високою точністю виявляти структурні складові хромовмісних сплавів, з неоднорідним хімічним складом всередині однієї фази, шляхом оцінки показника гетерогенності, на основі кореляційних співвідношень між усіма виявленими фазами, структурними складовими, у взаємозв'язку з їх енергетичним станом. Порівняльне дослідження зображень металографічних структур, одержаних різними методами, довело ефективність такого підходу.

Для оцінки ступеню неоднорідності структури, запропоновано використовувати параметр мінливості поєднання фаз (умовних кольорів), що описують мікроліквіацію хімічних елементів при формуванні дефектів кристалічної будови (дислокацій) з виділенням компонентів, що їх декорують. Даний параметр

дозволяє оцінити ступінь локальної неоднорідності, з точки зору розкиду концентрації компонентів всередині виявлених однотипних фаз. Мінливість структур в кожному заданому фрагменті зображення вираховували за допомогою диференціальних операторів Лапласа і дивергенції, а також їх похідних в скінчено-різницевої формі, де в якості координати брали піксель зображення, і оцінювали число збігів умовних кольорів груп фаз відносно середньої - в порівнянні з їх оточенням. Для оцінки ступеня неоднорідності структури в локальних зонах, що визначають розкид концентрацій компонентів в фазах, проводили статистичний аналіз розподілу умовних кольорів і мінливості фаз. Це дозволило оцінити локальну неоднорідність фаз, яка формується в результаті процесів дифузії і деформації, завдяки зміні енергетичного стану системи, що відображає ступінь дисперсності хромовмісного сплаву. При цьому, ступінь дисперсності запропоновано оцінювати по довжині рядів пікселів однакових умовних кольорів, послідовно розташованих в різних напрямках на площині цифрового зображення. Умовні кольори в кожній точці вираховували через зміну енергетичних параметрів системи (потужності дисипації енергії) і функції напружень (деформацій), з урахуванням їх знаків: позитивному значенню відповідав стан збільшення щільності дислокацій (стиснення), негативному - розрідження (зони скидання напружень), нейтральне (нульові значення) - відображає рівноважний стан. Показано, що функція потужності дисипації енергії і зміна її знаку на кожному етапі процесу виготовлення виробу, дозволяє прогнозувати виникнення нових фаз і формування локальної неоднорідності всередині них. Так, після проведення низькотемпературного циклічного відпалу в інтервалі магнітного перетворення карбідних фаз високохромистого чавуну, встановлено інтенсифікацію процесів структуроутворення у період дисипації внутрішньої енергії. Аналіз поєднань умовних кольорів фаз між такими фрагментами виявив значну зміну їх кількості і якісного складу, наприклад, формування локальної неоднорідності у первинних карбідах типу  $Me_7C_3$  - до 4.9%. Це є результатом розпаду залишкового аустеніту і формування нових фаз.

Встановлено тісний кореляційний зв'язок між параметрами мінливості з абсолютним значенням лапласіану умовних кольорів локальної зони (фрагменту), що описує структурну неоднорідність. Показано, що високі значення мінливості кольору тісно пов'язані ( $R_{\text{min}} = 0.93-0.97$ ) з групою фаз фериту, з підвищеним вмістом вуглецю (бейніту). Одночасно виявлено неоднорідність груп фаз аустеніту, яка пов'язана з ліквідацією хімічних елементів, що потім позначається і на складових при його розпаді. У таких зонах виявлені значні відхилення ступеня неоднорідності фаз, що досягають 71%. На підставі розрахованих гістограм розподілів мінливості встановлено, що на цей фактор спосіб термообробки має незначний вплив.

Вперше досліджено чинники і характер деградації карбіду в високохромистих і чавунах з вмістом до 4.5%Ni, які використовували для виробництва масивних виливків прокатних валків, що знижують їх експлуатаційну стійкість. Моделюванням оцінені процеси, які впливають на структуроутворення фаз металу при впливі робочих температур і локальних деформацій на інструмент в процесі його експлуатації. Автором запропоновано практичні рекомендації щодо ефективного використання інформація про чинники і характер деградаційних процесів карбідної фази при розробці нових комплексних технологій виробництва, зі збереженням необхідного рівня твердості і стабілізації карбідної фази різних типів хромистих чавунів.

Результати досліджень, наведені у четвертому розділі, логічно пов'язані з результатами досліджень у попередньому розділі роботи. Базуючись на розроблених підходах до опису процесів структуроутворення на основі формування фаз, за рахунок дисипації енергії в результаті дифузійних процесів і зміни щільності фрагментів, за допомогою диференціальних операторів Лапласа і дивергенції, проведено моделювання і прогнозування структуроутворення в хромовмісних сплавах. Для цього було здійснено пошук оптимальних параметрів для забезпечення побудову найбільш якісних моделей на основі математичного та експериментального аналізів, що можуть досить надійно враховувати процеси, які відбуваються в умовах розвитку дифузії і напружень при кристалізації і

термообробці. Отримані моделі загальної металографічної структури можуть бути модифіковані з урахуванням різних експериментальних умов, що вносяться змінами технологічних параметрів виробництва з завданням конкретних граничних умов. Такі моделі з достатньою точністю відтворюють досліджувані мікроструктури. Поряд з розподілом умовних кольорів та їх поєднань, вони оцінюють і локальну неоднорідність всередині всіх наявних фази, дають найбільш повну оцінку розподілу фаз, а також забезпечують інформацією про ефективні напрямки змін структури для отримання необхідного комплексу властивостей. Кореляційний аналіз структуроутворення, який описує твердість високохромистого чавуну і отримані показники в моделях, виявив повну відповідність з даними впливу температурних параметрів термічної обробки.

Запропоновано оцінюючі аргументи при теоретичному опису мікротвердості, що тісно пов'язані з фізико-хімічними процесами при формуванні структур. Це доводять високі значення коефіцієнтів кореляцій. Максимальні коефіцієнти кореляції структур в литому стані при багатофакторному аналізі досягають 0.75. Після обробки по режиму циклічного нагріву і ізотермічної витримки при температурах магнітного перетворення легованого цементиту і спеціальних карбідів (190-500°C), спостерігається зниження таких коефіцієнтів до 0.65, через підвищення неупорядкованості структури і зміни частки фаз, а також їх зв'язків. Теоретична оцінка середньої мікротвердості по фотографії мікроструктури дозволяє оперативно визначати цей показник.

Комп'ютерним моделюванням локальної неоднорідності структурних складових, за допомогою упорядкованого набору параметрів, що виражають зміни енергетичного стану системи при аналізі металографічного зображення, встановлено, що навіть відцентрове лиття і швидка кристалізація робочого шару завтовшки до 60 мм, повністю не усувають ліквідаційних явищ і неоднорідності формування структури, що пов'язано з напрямом тепловідведення. На підставі виявленої анізотропії властивостей металу робочого шару рекомендовано оцінювати зв'язок структури з властивостями на поздовжніх шліфах (уздовж вісей нечітко виражених дендритів).

У наступному, п'ятому, розділі дисертації обговорюються результати оцінки ступеня локальної неоднорідності, що виникає в різних фазах при формуванні напружень II роду. Проведені дослідження за допомогою нового комплексного підходу з використанням оптико-математичного опису енергетичних параметрів структурних змін виконані вперше, тому їх результати є дуже важливими. Такий підхід базується на виявленні змін дислокаційної структури, оцінках ступеня дисперсності фаз, а також функцій потужності дисипації енергії і напружень, які відображають енергетичний стан системи, в результаті процесів, що відбуваються при кристалізації, пластичній деформації і зміцненні (розглянутий метод радіаційно-термічної обробки). Оцінювали зони і характер локалізації деформацій, роль структурного фактору (неоднорідності, дисперсності). Розглянуто вплив різних технологічних процесів на перебудову дислокаційної структури фаз і їх вплив на зародження і розвиток деградаційних процесів.

Апробація розробленого нового комплексного підходу щодо визначення локальної структурної неоднорідності при виготовленні виробів і в результаті експлуатації, показала його повну адекватність і повторюваність при використанні для різних хромовмісних матеріалів, а також способів їх виробництва і зміцнення. Дослідженнями показано, що за допомогою параметрів, які відображають зміни енергетичного стану системи, можливо з досить високою точністю виявляти дефекти кристалічної будови - дислокації, аналізувати їх поведінку і вплив на подрібнення фаз, пошкоджуваність зерен, виявляти зміни структури і оцінювати фазовий наклеп та дифузійні процеси.

Шостий розділ роботи присвячено розробці та обґрунтуванню ефективних параметрів термічної обробки валків листових станів гарячої прокатки з робочим шаром з хромистих чавунів. Запропоновано комплексний підхід оцінки їх структуроутворення на основі використання спеціальних експериментальних і теоретичних досліджень мінливості фазового складу і його впливу на властивості (твердість і коерцитивну силу) при пошуку оптимальних параметрів. Це дозволило прогнозувати фазовий склад і локальну неоднорідність, а також



структурний стан складних гетерогенних сплавів. Здійснити таку оцінку вдалося на основі моделювання зміни енергетичного стану системи, що враховує дифузійні процеси, які відбуваються, не вдаючись до застосування руйнівних методів досліджень. Використання таких моделей дозволяє розробляти нові високотехнологічні процеси підвищення рівня експлуатаційних властивостей, одночасно зі скороченням термінів і зниженню матеріальних і трудових витрат при постановці на виробництво продукції з нових матеріалів і технологій.

Останній сьомий розділ дисертації має більш прикладний характер і присвячений розробці нових методів і практичних рекомендацій до створення нових технологічних процесів виробництва прокатних валків і покриттів із хромовмісних матеріалів. Дослідження і розробки базуються на теоретично та експериментально визначених у попередніх розділах роботи закономірностях формування структури та властивостей хромовмісних сплавів та покриттів.

Підтверджено, що підвищення споживчих властивостей, в запропонованому технологічному процесі виробництва двошарових листопрокатних валків чистових клітей з хромовмісних чавунів, що відливаються в металеві форми відцентровим методом, досягається попереднім підігрівом металевої форми при кристалізації робочого шару до температур магнітного перетворення карбідних фаз ( $190-210^{\circ}\text{C}$  – для хромонікелевого і  $350-500^{\circ}\text{C}$  – високохромистого чавуну), і витримкою протягом  $\sim 6$  год. Така технологія дозволяє більш ніж в 2 рази знизити частку залишкового аустеніту, стабілізувати твердість, мінімізувати рівень напружень.

Отримані результати досліджень закономірностей і особливостей структуроутворення відносно робочого шару прокатних валків з хромовмісних сплавів були перенесені на деталі машинобудування, що працюють в умовах тертя і зношування. Проведені дослідження кінетики і механізму зношування деталей паливної апаратури машин, початково зміцнених плівковими покриттями на основі карбідів вольфраму і хрому, дозволило запропонувати нову технологію їх відновлення в умовах ремонтного виробництва методом електролітичного хромування з додатковим модифікуванням такого покриття ультра дисперсни-

ми алмазами відповідно розробленого способу. Методом математичного опису виконаний порівняльний аналіз металографічних зображень поверхні тертя структур, що формуються в результаті експлуатації, хромовмісних електролітичних покриттів, відповідно розробленої технології модифікування УДА. Встановлено, що на зміцненій поверхні число зон ковзання і їх мікрорельєф при експлуатації зменшуються в 2-3 рази. Виявлено однозначне зменшення структурної неоднорідності покриття, нанесеного за розробленою технологією. Спостерігаються зміни умов кристалізації, при яких відсутнє газовиділення, підвищується твердість в 1.5-2,0 рази (коефіцієнт тертя зніжується до 20%).

#### Наукова новизна результатів.

Серед результатів, які отримані при виконанні досліджень і, безумовно, мають наукову новизну, слід зазначити наступне:

- запропоновано загальний комплексний підхід оцінки впливу різних факторів виробництва на структуроутворення та властивості хромовмісних сплавів та покриттів, який полягає в поєднанні сучасних методів дослідження з новими розробленими методиками оптико-математичного оцінювання фазового складу, що описують процеси дифузії, щільності фрагментів, та вони базуються на основних положеннях зміни енергетичного стану системи;
- розроблено нові підходи до теоретичної оцінки структуроутворення хромовмісних сплавів і покриттів, що включають визначення поєднань фаз (умовних кольорів) і абсолютних значень лапласіана матриці (фрагмента зображення), через які досліджені неоднорідність сформованих фаз і їх дисперсність, структурна анізотропія, що утворилась при виготовленні та експлуатації виробів;
- запропоновано принципово новий підхід для опису ступеня неоднорідності сформованої структури з використанням мінливості фаз (умовних кольорів) та їх поєднань, що оцінює мікроліквачію хімічних компонентів, в тому числі, і в області дефектів кристалічної будови – дислокацій;
- оптико-математичним методом через зміну енергетичного стану системи описано процеси дифузії при розпаді аустеніту і розвитку процесів ло-

кальної деформації. Показано, що інтенсифікація дифузійних процесів супроводжується зміною ступеня дисперсності структури, підвищенням щільності дислокацій, виділенням окремих фаз фериту, насичених вуглецем, а також бейніту, карбідів нестехіометричного складу, а також їх взаємозв'язком;

– встановлені чинники і оцінено характер деградації карбідної фази в валковому хромовмісному чавуні. Показано, що таку деградацію визначають процеси, пов'язані з формуванням дислокаційної структури і дифузії, при яких відбувається поява нових типів карбідних фаз нестехіометричного складу, квазікристалічного графіту, а також фериту та бейніту. Виявлено типи їх поєднань;

– для прогнозування структуроутворення розроблено новий підхід до моделювання за допомогою вперше визначених параметрів, що мають найбільший вплив на його зміну. Цей підхід ґрунтується на оцінках мінливості фаз (згідно умовних кольорів), отриманні гістограм їх розподілу та дисипації енергії в результаті розвитку процесів дифузії і зміни щільності аналізованих фрагментів;

– розроблено методику визначення оптимальних параметрів і режимів термічної обробки масивних прокатних валків із хромовмісного сплаву математичним моделюванням за допомогою критеріїв, які найбільш повно відображають його структурний і енергетичний стан та визначають зв'язок з твердістю і коерцитивною силою;

– проведена теоретична оцінка структурної неоднорідності хромовмісного зміцнювального покриття, модифікованого наноалмазами за розробленою технологією, з дослідженням зміни абсолютного значення дивергенції, яке характеризує рельєф поверхні (створення зон стиснення і скидання), що формуються на поверхні тертя деталей при експлуатації.

Новизна результатів вірно відображена у висновках дисертації.

Практична цінність результатів дисертації.

Результати дисертаційного дослідження є важливими і у прикладному плані.

На основі теоретичних та експериментальних результатів моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей, розроблені та узагальнені ефективні параметри кристалізації та термообробки. Отримані дані дозволяють з високою точністю оцінювати і прогнозувати вплив різних чинників на рівень властивостей робочого шару і експлуатаційну стійкість виробу в цілому, корегувати структуроутворенням і технологічним процесом виготовлення виробів.

На основі розробок створені сучасні прогресивні технології, що дозволили забезпечити підвищення експлуатаційних властивостей масивних виробів з хромовмісних сплавів, які працюють в складних умовах зношування та тертя.

Узагальнення результатів, отриманих при застосуванні електролітичного хромування покриттів з модифікуванням ультрадисперсними алмазами для зміцнення робочої поверхні на деталях малого розміру (паливної апаратури машин), дозволило розробити спеціальну технологію його нанесення, де, за рахунок зміни умов кристалізації, стає відсутнім газовиділення, істотно зменшується неоднорідність і підвищується твердість (знижується коефіцієнт тертя).

Результати роботи, і це є безумовною позитивною рисою дисертаційного дослідження, реальне впровадженні. Розроблена і використовується на ремонтному підприємстві ТОВ «Дизельсервіс», м. Харків технологічна інструкція виготовлення та контролю якості виробів. Економічний ефект від впровадження нових розробок, захищених патентами, складає 73,8 тис. грн при обсязі виробництва 57 одиниць, що підтверджено відповідним актом і розрахунками підприємства. Очікуваний економічний ефект від впровадження нових технологій, захищених патентами, на вальцеливарних підприємствах буде складати 910 тис. грн. при обсязі виробництва 1300 т, що підтверджено результатами експертної оцінки, а також економічними розрахунками. Результати дисертаційної роботи використовуються і в навчальному процесі ХНТУСГ імені Петра Василенка. Новизна технологічних рішень, розроблених у дисертації, підтверджується 8 патентами України.

### Достовірність та обґрунтованість результатів.

Використання комплексу сучасних та взаємодоповнюючих методів вивчення структури й властивостей матеріалів, хороша кореляція даних забезпечують високу достовірність отриманих результатів.

Наукові положення, висновки та рекомендації, розвинуті у дисертації, добре обґрунтовані, базуються на глибокому аналізі явищ та процесів, що досліджуються, проведеному на сучасному рівні комплексі експериментальних досліджень та практичною реалізацією результатів роботи.

Висновки, що сформульовані в роботі, не суперечать класичним уявленням щодо формування структури та властивостей хромовмісних сплавів та покриттів.

### Зауваження до дисертації.

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

- з приведенного аналізу не зовсім зрозуміло, чому після випробувань хромованої поверхні прокатних валків було прийняте рішення проводити дослідження хромовмісних сплавів, насамперед високохромистого чавуну.
- при дослідженні дислокаційної структури в карбідній фазі слід було б більш чітко описати які структурні зміни протікають в процесі дифузії;
- недостатньо уваги приділено експлуатаційним випробуванням валків, які повинні враховувати однорідність робочого шару по довжині бочки і структуроутворенню при переточуваннях;
- в роботі не вказано величину глибини шару зміцнювального покриття, що наноситься в процесі хромування робочої поверхні валків прокатних станів;
- у представленій роботі не зовсім зрозуміло зв'язок між дослідженими виробами-великогабаритними прокатними валками і невеликими деталями паливної апаратури;
- деякі зауваження до термінології, що використовується. Наприклад, замість «Аналізом встановлено...», найбільше відповідно було б, «аналіз резуль-

татів дозволив встановити...»; «формуємих структур (нових фаз)», краще «...структур (нових фаз), що утворюються» і т.ін.

– загальні висновки роботи доцільно наводити більш стисло і конкретно.

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

#### Повнота викладу результатів у публікаціях.

За темою дисертації видано довідник і монографію, опубліковано 57 статей (з них 7 включені до міжнародних науково-метричних баз SCOPUS і Web of Science), з яких, в спеціалізованих наукових виданнях України - 12 статей і закордонних - 13 статей; 24 - в інших наукових виданнях закордонних та України, новизна технічних рішень підтверджена 8 патентами України. На підставі аналізу опублікованих автором робіт, а також виступів на міжнародних наукових і науково-практичних конференціях можна з упевненістю сказати, що матеріали дисертації достатньо повно висвітлені у статтях та доповідях, пройшли широку апробацію.

#### Загальний висновок.

Проведений аналіз змісту і основних положень дисертації О. Ю. Ключко показує, що робота являє собою завершене дослідження, зміст дисертації відповідає мети та задачам дослідження. В роботі отримані нові і достовірні результати, які ефективно вирішують наукову і прикладну проблему теоретичного і експериментального моделювання і прогнозування основних факторів, що впливають на структуроутворення і властивості хромовмісних сплавів та покриттів для коригування складу, технології виробництва, експлуатації виробів, що працюють в складних умовах тертя і зношування. Наукові і прикладні результати вказують на можливі шляхи підвищення експлуатаційної стійкості виробів із досліджуваних матеріалів, тому необхідне їх подальше використання і розвиток у рамках державних і галузевих наукових та прикладних програм.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 - матеріалознавство, тому що вона присвячена розробленню методів дослідження й оцінювання властивостей матеріалів; у ній досліджуються показники якості та споживчих властивостей матеріалів залежно від їх призначення; розглядаються питання закономірностей зв'язку між показниками різних властивостей матеріалів; досліджуються фізико-хімічні явища в об'ємі, робочому шарі і на поверхні виробів у процесі експлуатації.

Враховуючи викладене, вважаю, що дана дисертація є завершеною науковою працею, за своїм обсягом, кількістю та якістю публікацій, науковою та практичною значимістю повністю відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 (зі змінами) та Положення про спецраду № 1059 від 14.09.2011 (зі змінами) до докторських дисертацій, має бути оцінена позитивно, а її автор, Ключко Оксана Юріївна, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 - матеріалознавство.

Офіційний опонент,  
професор кафедри матеріалознавства  
та обробки матеріалів ДВНЗ ПДАБА  
доктор технічних наук, доцент

Волчук В.М.

