

## ***ВІДГУК***

*офіційного опонента на дисертаційну роботу Д. Б. Середи*

### **«Формування структури і властивостей хромоалітованих покриттів конструкційних матеріалів в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу»,**

поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство

#### ***Актуальність теми дисертаційної роботи.***

Розвиток основних галузей сучасного машинобудування супроводжується зростанням вимог до застосовуваних матеріалів, які мають забезпечувати більш високі характеристики міцності, зносо- та корозійної стійкості, можливості працювати в умовах значних циклічних навантажень, контактної втоми, тощо, що і визначає експлуатаційні властивості матеріалу. Ефективним та економічним шляхом підвищення довговічності деталей з конструкційних та триботехнічних матеріалів є створення на їх поверхні міцних, довговічних і зносостійких шарів. Зміцнення тонкого поверхневого шару масивних деталей зі звичайних конструкційних матеріалів дозволяє підвищувати ресурс механізмів, успішно вирішувати проблему відбудовного ремонту.

Серед методів поверхневого зміцнення широке застосування знаходять хромоалітовані захисні покриття, які отримані різними методами хіміко-термічної обробки (ХТО), одним з найбільш технічно та економічно ефективних серед яких є технології нанесення покриттів, що базуються на ефектах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС). Однак, на даний час у вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі питання процесів структуроутворення при нанесенні різноманітних покриттів в умовах СВС відображається недостатньо повно, а відома інформація недостатньо систематизована. Це обумовлює **актуальність** рецензованої дисертаційної роботи, яка присвячена розробці легованих бором, кремнієм та титаном хромоалітованих захисних покриттів, отриманих в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу на конструкційних матеріалах, та визначення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Підтвердженням актуальності дисертаційної роботи є її зв'язок з рядом тем наукових досліджень Міністерства освіти та науки України та пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки України «Створення та застосування технологій отримання, зварювання, з'єднання та обробки конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 року.

***Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій***

Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки і рекомендації є достатньо обґрунтованими. В роботі дисертантом чітко визначено мету і основні завдання наукового дослідження, а також об'єкт та предмет дослідження. Достовірність результатів роботи забезпечена коректністю постановки задач і застосуванням сучасних методів комп'ютерного моделювання та лабораторного експерименту з використанням атестованого лабораторного устаткування, стандартних методів випробувань і сертифікованих вихідних компонентів. В роботі використано сучасні методи досліджень структури з залученням оптичної та електронної мікроскопії (мікроскопи «Neophot – 21» і «Neophot – 32», растровий електронний мікроскоп Carl Zeis AG- SUPRA 40 WDS, який використовує електронно-оптичну колону GEMINI 3-го покоління, рентгенівський мікроаналізатор JCXA-733 «Supergrope»), вимірювання мікротвердості (мікротвердомір ПМТ–3М), залишкових напружень (установка "Піон-2"), адгезії (твердомір Роквелл 2090TP), балу крихкого руйнування та комплексу експлуатаційних властивостей, з раціональним вибором методів реєстрації та статистичної обробки результатів дослідження.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У рецензованій дисертаційній роботі одержано ряд нових теоретичних та експериментальних результатів. До найбільш вагомих **наукових положень**, отриманих в результаті виконання даної роботи, на мій погляд відносяться наступні:

1. Вперше встановлено закономірності комплексного впливу легуючих елементів на структуру та фазовий склад легованих хромоалітованих покриттів, що дозволило обґрунтувати раціональні склади СВС-шихт, та визначити оптимальні режими ХТО.

2. Вперше на основі результатів математичного планування експерименту запропоновані та оптимізовані нові склади СВС-шихт з урахуванням їх функціонального призначення для отримання зносостійких, корозійностійких та жаростійких покриттів.

3. Встановлено закономірності впливу бору, кремнію і титану на функціональні характеристики покриттів отриманих в умовах СВС, що забезпечує підвищення рівня залишкових напружень стиску на сталі і латуні на 15–30 %, збільшує адгезійну міцність в 1,2-1,3 рази, збільшує зносостійкість сталі 50 в 1,8–2,1 рази, збільшує жаростійкість ВВКМ в 1,5–1,7 рази, збільшує корозійну стійкість латуні ЛЦ40Мц3Ж в 1,7-2,1 рази, в порівнянні з покриттями отриманими в ізотермічних умовах ХТО.

Новизна технічних рішень, отриманих в результаті виконання даної роботи, захищена 4-ма патентами України корисну модель.

#### ***Практична цінність дисертації***

1. На основі проведених досліджень і отриманих результатів, вдосконалено та оптимізовано режими технічно та економічно високоефективного технологічного процесу

для отримання покриттів різного функціонального призначення та розроблені нові склади легованих хромоалітованих захисних покриттів та склади порошкових шихт для їх отримання з використанням саморозповсюджувального високотемпературного синтезу.

2. Нові леговані бором і титаном хромоалітовані захисні покриття, а також технологія їх отримання пройшла промислове випробування в умовах ТОВ «Прокатспецсталь» (м. Запоріжжя), та в умовах гірничодобувної компанії ТОВ «Мінерал» (м. Пологи), що показало їх високу ефективність (підтверджено актами впровадження результатів науково-дослідної роботи та промислового випробування).

3. Отримані в результаті виконання роботи результати використовуються також в навчальному процесі підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» в дисципліні «Монтаж, діагностика та ремонт обладнання» та при формулюванні тем і завдань магістерських робіт (підтверджено актом впровадження результатів кандидатської дисертації у навчальний процес ДДТУ).

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

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (168 найменувань) та 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 186 сторінок, у тому числі 137 сторінок основного тексту, 30 таблиць та 88 рисунків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність розробки нових легованих хромоалітованих покриттів з підвищеним комплексом фізико-механічних властивостей отриманих в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу, сформульовано мету і задачі дослідження, наведено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, показано зв'язок дисертації з науковими темами. Наведено особистий внесок здобувача і відомості про апробацію та кількість публікацій.

В **першому розділі** проведено аналіз методів отримання хромоалітованих захисних покриттів. Обґрунтовано необхідність легування хромоалітованих покриттів, що дозволяє різко підвищити експлуатаційні характеристики і поряд з високою корозійно- та жаростійкістю за рахунок утворення додаткових оксидів кремнію і титану, отримувати захисні покриття з високими показниками поверхневої твердості.

Всі відомі методи характеризуються високими енергетичними затратами. Газотранспортна СВС-технологія дозволяє різко зменшити тривалість технологічного процесу, що приводить до зменшення собівартості виробу.

Таким чином, перспективним шляхом отримання покриттів з заданим комплексом властивостей є їх легування в умовах СВС. За результатами аналізу наукової інформації були поставлені наукові та практичні завдання дисертаційної роботи, вирішення яких

дозволить отримувати леговані хромоалітовані покриття на вуглецевих матеріалах та латуні в умовах СВС.

У **другому розділі** приведені відомості про матеріали та обладнання для досліджень, методика математичного планування експериментів, методики дослідження фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів з отриманими захисними покриттями.

**Третій розділ** присвячений моделюванню процесів формування леговани хромоалітированих покриттів. Розроблений механізм формування захисних покриттів в умовах теплового самозаймання СВС-шихт. Термодинамічний аналіз можливих реакцій для діапазону температур 400–1600 К показав, що продукти розпаду активаторів ( $I_2$ ,  $NH_4Cl$ , і  $NH_4F$ ) реагують з елементами шихти з утворенням газоподібних сполук  $AlI$ ,  $AlI_2$ ,  $Al_2I_6$ ,  $CrF_2$ ,  $CrI_2$ ,  $CrI_3$ ,  $VI_3$ ,  $VF_2$ ,  $VF_3$ ,  $TiCl_3$ ,  $TiCl_4$ ,  $TiI_2$  і ін. При підвищенні температури, кількість продуктів в газоподібній фазі зростає і виділяються конденсовані продукти. Основними сполуками в газовій фазі, при температурах 1200–1600 К, є йодиди, фториди та хлориди легувальних елементів.

Вперше з використанням методу фізико-хімічного моделювання встановлені етапи формування легованих ХЗП на сталі 50, латуні ЛЦ40Мц3Ж і ВВКМ при теплового самозаймання в залежності від складу СВС-шихт.

Проведено математичне планування експериментів, яке полягало в дослідженні впливу технологічного режиму обробки і складів СВС-шихт на фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів. Оптимізацію складових шихт для проведення СВС-процесів в умовах теплового самозаймання проводили на підставі результатів досліджень температурних характеристик.

Доведено, що оптимальне поєднання фізико-механічних і функціональних властивостей забезпечують СВС-шихти що містять: 14–25% хромової складової, 7% кремнію; 10% бору; 15–20% титану; 12–15% алюмінію, 3-5% активатора, та баластного матеріалу ( $Al_2O_3$ ) - решта.

У **четвертому розділі** досліджена структура і кінетика формування захисних покриттів, отриманих в умовах теплового самозаймання свс-шихт

Отримано залежності впливу температури та часу ізотермічної витримки на товщину захисного покриття. Доведено, що температурна залежність зміни товщини покриття підпорядковується експоненціальному, а часова параболічному закону. Вперше встановлено, що оптимальна кількість газотранспортного агента у СВС- шихті, при отриманні легованих ХЗП, становить 2% мас.  $I_2$  та 3% мас.  $NH_4Cl$  або  $NH_4F$ (при легуванні бором).

Показано, що при легуванні бором захисне покриття на ВВКМ складається з карбідної зони  $V_4C$  та фаз  $CrAl_2$ ,  $Cr_2B$ . При легуванні кремнієм захисне покриття складається з карбідної зони  $SiC$  та фаз  $CrAl_2$ ,  $CrSi_2$ . При легуванні титаном захисне покриття складається з карбідної зони  $TiC$  та фаз  $CrAl_2$  та  $TiAl$ . За результатами рентгеноструктурного та мікрорентгено- спектрального аналізів визначено, що СВС-покриття на латуні ЛЦ40Мц3Ж складається з легованих фаз:  $Cu_3Al$ ,  $CuTi$ ,  $CuTi_2$ ,  $CuZn_2$ ,  $Cu_5Si_4$ ,  $Cu_5Si$ ,  $CuB$  під якими знаходиться зона твердого розчину  $Cr$ ,  $Al$ ,  $B$ ,  $Si$ ,  $Ti$  у міді.

Доведено, що при отриманні на сталі 50 легованих бором ХЗП, покриття складається з легованих фаз  $(FeCr)_{23}C_6$ ,  $(FeCr)_7C_3$ ,  $(FeCrAl)_2B$ ,  $Fe_2Al_5$  і  $\alpha$  - твердого розчину  $Cr$ ,  $Al$  та  $B$  в  $Fe$ . При отриманні легованих кремнієм ХЗП, покриття складається з легованих фаз  $(FeCr)_3C_2$  та фази  $Fe_3Al$  леговоаної  $Cr$  та  $Si$ , із включеннями  $(Fe,Cr)_3Si$  та  $\alpha$  - твердого розчину  $Al,Cr$  та  $Si$  в  $Fe$ .

При отриманні легованих титаном ХЗП покриття складається з легованих фаз:  $(FeCr)_{23}C_6$ , алумініду  $Fe_2Al_5$ , легованого хромом і титаном із включеннями  $Cr_2Ti$ , упорядкованого твердого розчину  $Fe_3Al$ , легованого  $Cr$  та  $Ti$ , а також  $\alpha$  - твердого розчину  $Al$ ,  $Cr$  і  $Ti$  в  $Fe$ .

У **п'ятому розділі** досліджено експлуатаційні характеристики конструкційних матеріалів з покриттями отриманими в умовах СВС. Обґрунтовано вплив параметрів СВС-процесу і складу СВС-шихт на мікротвердість, залишкові напруги, мікрокрихкість легованих ХЗП, що отримані на сталі 50, латуні ЛЦ40Мц3Жта ВВКМ. Розроблено раціональний процес поверхневого зміцнення.

Нові леговані бором і титаном хромоалітовані захисні покриття і технологія їх отримання пройшли впровадження в умовах ТОВ «Прокатспецсталь», (м. Запоріжжя). Термін служби прокатних валків і бандажів станів 30-10 і МКУ-280 збільшився в 1,7–2,1 рази, що підтверджено відповідними актом. В умовах ТОВ Гірничодобувна компанія Мінерал (м. Пологи) нові леговані ХЗП пройшли промислове випробування для деталей бульдозера Б10. Впровадження розробленого покриття, технологічного процесу його формування на деталі технологічного обладнання, дозволяє підвищити зносостійкість у 1,9–2,1 рази, що підтверджено відповідним актом.

Сформульовані в роботі висновки відповідають основному змісту проведених досліджень і тексту дисертаційної роботи та відображають основні наукові результати роботи.

#### ***Повнота викладення результатів роботи в опублікованих працях***

Основні положення і результати досліджень знайшли досить ґрунтовне відображення в 25-ти наукових працях, з яких: 12 статей у фахових виданнях України, 3 статті у журналах,

що входять у міжнародну наукометричну базу даних SCOPUS, 6 тез доповідей на наукових конференціях різного рівня, 4 патенти України на корисну модель.

Зміст автореферату повністю відповідає основним положенням дисертаційної роботи, достатньо повно відображає основні наукові результати, отримані здобувачем.

В той же час необхідно відзначити деякі **зауваження** по рецензованій роботі, а саме:

1) При дослідженні температурних характеристик СВС процесу (стр. 85-87 дисертації) автор оцінював вплив складу суміші на температуру самозаймання, швидкість поширення хвилі горіння та максимальну температуру процесу. Однак, в роботі відсутня інформація щодо методики визначення вказаних параметрів, що не дає можливості повною мірою оцінити ступінь достовірності отриманих результатів.

Те ж зауваження відноситься і для даних, наведених на рис. 3.16 (стр. 89), де відсутня інформація щодо методики вимірювання, зокрема, швидкості поширення хвилі горіння.

Крім того, при обговоренні результатів цих експериментів автор лише констатує отримані результати, але практично не наводить обґрунтованого пояснення відмічених закономірностей з точки зору базових фізико-хімічних та термодинамічних уявлень.

2) Звертає на себе увагу невдале структурування роботи. Так, зокрема, в розд. 3, наведені результати оптимізації складу покриття та насичуючої шихти на основі результатів математичного планування експерименту для одержання зносостійких, корозійностійких та жаростійких покриттів, але не відсутні як фактичні дані вихідного експерименту, на яких будувалися вказані моделі так і їх обговорення.

Те ж відноситься до частини роботи, присвяченій побудові фізико-хімічних моделей нанесення покриттів на різні типи підложки, виконаної головним чином за результатами фазового та мікрорентгеноспектрального аналізу покриття, які власне наведені лише в четвертому розділі.

3) В роботі (розділ 2) занадто лаконічно наведено опис частини використаних методик (зокрема – для оцінки залишкових напружень та їх розподілу по товщині покриття, визначення поруватості, адгезійної міцності, мікротвердості покриттів, тощо). Крім того, видається дискусійним питання щодо доцільності використання для оцінки адгезійної міцності покриття методу вдавнення конічного індентора за наявності суттєво більш широко використовуваних та більш, на мій погляд, достовірних прямих методів оцінки адгезійної міцності (наприклад – штифтовий метод, метод згину зразка, тощо).

4) У другому розділі дисертації, присвяченому питанням методики виконання експериментів, автор вказує, що дослідження зносостійкості матеріалів проводилося за двома різними схемами з використанням двох різних машин тертя. Однак, в роботі відсутні

дані відносно того, яка із описаних схем була базовою для побудови оптимізаційної моделі отримання зносостійких покриттів, наведеної в розд. 3.

5) Деякий подив викликають характер залежностей кінетики зношування різних складів покриттів, наведених на рис. 5.8,а та 5.10,а. Аналіз цих залежностей свідчить, що практично для всіх видів покриттів після 5-ти годин випробувань інтенсивність зношування (як похідна від функції абсолютної величини зношення по часу) наближається до нуля, що навряд чи може знайти обґрунтоване пояснення. Крім того, абсолютні величини зношення  $((60 \div 180) \cdot 10^{-4} \text{ г/м}^2)$  після п'яти годин випробувань навіть за наявності змашування видаються дещо нереалістичними.

6) На мій погляд автор дещо зловживає незагальноприйнятими скороченнями (ХС, ХЗП, ВВКМ, ТА, ГТА, тощо), що ускладнює легкість сприйняття тексту дисертації.

7) Звертає на себе увагу помітна кількість технічного браку та термінологічних неточностей в тексті дисертації на кшталт: «питомий обсяг» замість «питомий об'єм», «залишкові напруги» замість «питомі напруження», «з'єднання» замість «сполуки», «доказано» замість «доведено», «одержання нітридів при горінні металів у рідкому азоті», тощо.

Наведені зауваження, втім, не впливають на загальну позитивну оцінку наукових та практичних результатів дисертаційної роботи яка, на мій погляд, виконана на належному науковому рівні, поєднує наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, висновків та рекомендацій. Стиль викладення матеріалу досліджень відповідає прийнятому в науково-технічній літературі.

На підставі вищенаведеного вважаю, що за об'ємом, науковим рівнем, змістом і оформленням представлена дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 5671.2 від 24 липня 2013 р.; (зокрема розд. 9 та 11), її зміст відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство, а її автор Серєда Дмитро Борисович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент,

заступник директора ІПМ НАН України

з наукової роботи, д.т.н.



Г. А. Баглюк

