

Спеціалізованій вченій раді Д 64.832.04
при Харківському національному технічному
університеті сільського господарства
імені Петра Василенка

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Кругляк Ірини Василівни на тему: «Науково-технологічні засади формування зносо-корозійностійких покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01- матеріалознавство

Актуальність обраної теми

Проблема надійності та довговічності деталей машин, їх висока якість і ефективність роботи, економія металу, боротьба з корозією та зносом є, безумовно, **актуальною**. Дисертант зосередив увагу на технології отримання дифузійних шарів із застосуванням композиційних насичуючих середовищ (КНС), що ґрунтується на використанні внутрішніх джерел тепла порошкової шихти. Характерні риси технології: використання більш дешевої внутрішньої хімічної енергії взаємодії реагентів (ECD), замість зовнішньої електричної, простота й низька вартість устаткування, збільшення продуктивності праці, що в цілому призводить до зниження собівартості продукції. Розробка нових захисних покриттів конструкційних і технологічних матеріалів, встановлення закономірностей зв'язку між показниками різних властивостей матеріалів, фізичні та фізико-хімічні явища в об'ємі і на поверхні деталей та вузлів з різних матеріалів в процесі експлуатації є **актуальною** проблемою наукових досліджень з матеріалознавства.

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

Достовірність отриманих результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних експериментальних методів вимірювань та методів визначення експлуатаційних характеристик, дослідженням мікроструктури з використанням оптичної та растрової електронної мікроскопії та подальшим статистичним аналізом. Експериментальні результати узгоджуються з результатами комп'ютерного моделювання. Основні наукові положення та висновки, сформульовані в дисертації, добре обґрунтовані, базуються на глибокому аналізі досліджуваних явищ, інтерпретація результатів узгоджується з фундаментальними положеннями сучасного матеріалознавства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота пов'язана з науково-тематичними планами досліджень Дніпровського державного технічного університету та виконана у рамках держбюджетних та договорних науково-дослідних робіт : «Отримання захисних покриттів на вуглеграфітових матеріалах в умовах саморозповсюд жувального високотемпературного синтезу для деталей аерокосмічної техніки» (№ ДР 0109U000648); «Отримання жароміцних сплавів на інтерметалідній основі в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу» (№ ДР 0111U002176); «Поверхневе зміцнення титанових сплавів деталей газотурбінних двигунів в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу» (№ ДР 0113U002049); «Розробка технології та організації промислового виробництва композиційних матеріалів, стійких в умовах дії високих температур та агресивних середовищ, для авіаційної та космічної техніки» (№ ДР 0115U004839); «Створення і дослідження ефективних способів зміцнення поверхневих шарів деталей автомобілів, дослідження впливу автотранспорту на навколишнє середовище» (№ ДР 019U003603) та госпдоговірних тематик: «Отримання алітованих покриттів на конструкційних матеріалах, працюючих в умовах коксохімічного виробництва ПрАТ «Запоріжжкокс» (№ ДР 0119U000256); «Дослідження експлуатаційних характеристик конструкційних матеріалів з алітованими покриттями, працюючими в умовах ПрАТ «Запоріжжкокс» (№ ДР 0119U000256); «Дослідження експлуатаційних характеристик конструкційних матеріалів з титаноалітованими покриттями, працюючими в умовах ПрАТ «Южкокс» (№ ДР 0120U105805).

Загальна характеристика змісту дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і 10 додатків. Повний обсяг роботи складає 457 сторінок, у тому числі основного тексту 307 сторінок. Робота ілюстрована 187 рисунками, наведено 59 таблиць. Перелік використаних літературних джерел складається із 390 найменувань на 40 сторінках.

Вступ. Обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначені мета, об'єкт, предмет та методи досліджень, сформульовані наукова новизна й практична значущість, наведено особистий внесок здобувача та апробації матеріалів за темою дисертації.

Розділ 1. Автор проаналізував стан проблем, які стосуються досліджень особливостей структуроутворення покриттів на матеріалах, їхньої еволюції виготовлення та впливу на фізико-механічні властивості, а також перспективи використання існуючих технологій формування дифузійних шарів. На основі аналізу експериментальних та теоретичних робіт досліджено нові аспекти отримання захисних покриттів, проведено аналіз сучасних методів підвищення надійності деталей машин поверхневим зміцненням, розглянуто особливості формування зносо-корозійностійких

покриттів шляхом створення наноструктурованих поверхневих шарів, особливості процесів структуроутворення дифузійних покриттів з використанням композиційних порошкових середовищ та 3D моделювання структури покриттів конструкційних матеріалів. Проведений аналіз підтвердив актуальність теми і дав змогу автору сформулювати мету роботи і поставити завдання досліджень, які охоплюють три аспекти: 1) методологічний, що ґрунтується на уявленнях про структуроутворення захисних покриттів; 2) експериментальний зі встановлення закономірних зв'язків між параметрами процесу насичення і експлуатаційними властивостями; 3) математичного і термодинамічного моделювання отримання захисних дифузійних шарів.

У **другому розділі** Матеріали та методики експериментальних досліджень сформульовано загальну методику та наведено матеріали і методики досліджень. Розроблена методологія проведення досліджень базується на аналізі та узагальненні основних факторів, що впливають на збільшення експлуатаційних властивостей виробів, які працюють в умовах комплексного впливу агресивних речовин. Методологічний підхід включає теоретичні, експериментальні та практичні дослідження, спрямовані на підвищення довговічності матеріалів за рахунок їх зміцнення. Для порівняння характеристик захисних покриттів проводилось дифузійне насичення з використанням відомих порошкових шихт,. Для отримання достовірної оцінки сформованої структури та властивостей використовували комплексний підхід в дослідженнях із застосуванням сучасних методів і обладнання, аналізу 2D і 3D зображень. Якість дифузійного шару покриттів оцінювали за рівнем фізико-механічних властивостей та сформованої структури (мікротвердості, адгезійної міцності, сумарного балу крихкого руйнування та пористості).

Третій розділ присвячено термодинамічному моделювання насичуючого середовища при формуванні дифузійних покриттів. Термодинамічне моделювання складу газової фази дозволило визначити можливості застосування конкретних речовин, що формують композиційні насичуючі середовища, встановлено хімічні реакції, які можуть протікати в температурному інтервалі 900–1200 °С для дифузійного насичення конструкційних матеріалів. Залежність теплоємності від температури при отриманні захисних дифузійних шарів в КНС носить складний характер на стадії теплового самозаймання. При термодинамічному моделюванні отримання захисних дифузійних шарів в композиційних насичуючих середовищах значення теплоємності від T (К) знаходяться в наступному ряді для КНС №1: В–Al–Ti–Mo–V–W . Для КНС №2: Mo–B–V–Al–Ti–W , що корелює зі значеннями температури самозаймання.

Четвертий розділ містить результати математичного моделювання отримання дифузійних покриттів з використанням композиційних насичувальних середовищ. . Вперше вирішена сполучена нелінійна двомірна задача теорії ЕСД із застосуванням попередньо отриманих результатів рішення задачі теорії дифузії в нестационарному тепловому полі. Визначені температурні поля при насиченні в КНС №1 дозволили встановити дві зони:

зони прогрівання та зони теплового самозаймання. Площини температурного поля збільшується в залежності від температури самозаймання та максимальної температури. Температурні поля при насиченні в КНС №2 мають більшу зону прогрівання в порівнянні з КНС №1 за рахунок подвійного самозапалювання. Так формується ряд зростання температурного поля в залежності від насичуючого елементу: борування – титанування – алітування – вольфрамівання – молібденування – ванадіювання. На загальну картину найбільший вплив мають максимальна температура (940°C – 950°C – 1020°C – 1020°C – 1070°C – 1200°C) і швидкість розповсюдження хвилі самозаймання. Доказано що товщина дифузійного шару, виміряна експериментально в середньому для КНС №1 у 1,16...1,23 рази, а для КНС №2 у 1,14...1,22 рази перевищує отриману величину, розраховану виходячи зі значення коефіцієнтів дифузії. Цю розбіжність можна пояснити тим, що реальні сталі мають полікристалічну будову, а дифузія по міжкристалітним межах значно перевищує дифузію по тілу кристала.

У п'ятому розділі наведено результати моделювання формування функціональних покриттів на конструкційних матеріалах та розроблено зносокорозійностійкі композиційні насичуючі середовища. Вперше встановлено термодинамічні закономірності температури самозаймання (650 ... 770°C) і максимальної температури (940 ... 1300°C) від вмісту ECD (16...25% мас.) при формуванні дифузійних шарів. Отримані математичні залежності описуються поліномом другого порядку і дають змогу прогнозувати товщину захисних покриттів на конструкційних матеріалах при використанні порошкових композиційних насичуючих середовищ. Отримала подальший розвиток фізико-хімічна модель процесу формування дифузійних шарів з використанням композиційних насичуючих середовищ, яка враховує склад основних галогенідів насичуючого середовища: AlCl , AlCl_2 , AlI , AlI_2 , CrCl , CrCl_2 , CrCl_3 , CrI , CrI_2 , CrI_3 , VCl , VCl_2 , VCl_3 , VCl_4 , CrF , CrF_2 , CrF_3 , TiF , TiF_2 , TiF_3 , TiF_4 , TiI , TiI_2 , TiI_4 , MoCl , MoCl_2 , MoCl_3 , MoCl_4 , MoI , MoI_2 , MoI_3 , MoI_4 , AlF , AlF_2 , BF , BF_2 , WF_2 , WF_3 , WF_4 , WI_2 , WI_3 , I_4 , структуру та фазовий склад дифузійних шарів, температурно-часові параметри процесу насичення.

Виконані дослідження дозволили встановити, що при насиченні в КНС №1: максимальна температура при алітуванні складає 1103 K , концентрація кінцевого продукту 66%; максимальна температура при ванадіюванні складає 1388 K , концентрація кінцевого продукту 55%; максимальна температура при титануванні складає 1303 K , концентрація кінцевого продукту 61%; максимальна температура при молібденуванні складає 1228 K , концентрація кінцевого продукту 46%; максимальна температура при боруванні складає 1138 K , концентрація кінцевого продукту 66%; максимальна температура при вольфраміванні складає 1213 K , концентрація кінцевого продукту 35%. Швидкість поширення хвилі горіння змінюється від $2,7$ до $8,6 \cdot 10^{-2}\text{ м/с}$.

Шостий розділ присвячено дослідженню структури і кінетиці формування захисних покриттів та прогнозування їх експлуатаційних властивостей. Вперше встановлено термодинамічні закономірності температури самозаймання (650 ... 770°C) і максимальної температури

(940...1300 °C) від вмісту ECD (16...25% мас.) при формуванні дифузійних шарів. Отримані математичні залежності описуються поліномом другого порядку і дають змогу прогнозувати товщину захисних покриттів на конструкційних матеріалах при використанні порошкових композиційних насичуючих середовищ. Вперше встановлено, що в умовах термохімічної взаємодії компонентів формуються багатофазні дифузійні шари: Fe_2Al_5 , Fe_3Al , $(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe)_7C_3$, $FeCr$, Al_2Cr_3 , $CrAl_2$, V_2C , VC , TiC , Mo_2C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, Fe_3Mo_3C , Fe_2Mo_2C , $(Fe,Cr,Al)_2B$, FeB , $Fe_3(CB)$, Fe_2W_2C , Fe_7W_6 з виділенням надлишкових зміцнюючих фаз на основі інтерметалідних сполук $TiAl$, Cr_2Ti , Fe_7W_6 , що дозволяє підвищити показники зносостійкості матеріалів. Запропоновано та реалізовано принципово новий підхід щодо прогнозування експлуатаційних властивостей з використанням приведених воксельних кольорів оцінки 3D структур: пористості, фазового складу, карбідних фаз, характеру розподілу насичуючих елементів в захисних дифузійних шарах з використанням оксидних і безоксидних систем.

Досліджено вплив кількості газотранспортного агента при отриманні захисних покриттів. Встановлено, що введення його в кількості більше 6% призводить до зменшення товщини покриття на 25–35% за рахунок стравлювання дифузійного шару на п'ятій стадії при охолодженні контейнера. ГТА входить до складу покриття, що негативно впливає на корозійну стійкість захисного шару. Дифузійні шари мають пористу поверхню та характеризуються нерівномірністю. При введенні менше 1...3% ГТА товщина покриття зменшується на 35...40%. Отримані рівняння, що характеризують залежність товщини дифузійних шарів від технологічних характеристик процесу. Кінетичні залежності впливу часу витримки та температури процесу на товщину захисного покриття в КНС №1 і КНС №2 доказали, що часова залежність близька до параболічної, а температурна до експоненціальної, що свідчить про механізм отримання покриттів завдяки дифузії елементів в поверхню конструкційних матеріалів. Для прогнозування структуроутворення при дослідженні мікроструктури дифузійних шарів на конструкційних матеріалах з різним вмістом вуглецю (0,07...0,8% C) побудовано кольорові моделі із застосуванням 2D зображення мікроструктури, вокселізації 3D мікроструктури при оцінці пористості, встановлення порогових значень фазового складу дифузійного шару, 3D структура оцінки карбідних фаз при ідентифіковані мікроструктури та 3D зображення характеру розподілу насичуючих елементів, які забезпечують високу точність збігу металографічного зображення оригінальної структури.

Сьомий розділ присвячено дослідженню експлуатаційних характеристик конструкційних матеріалів після зміцнення в композиційних насичуючих середовищах. На основі теоретичних і експериментальних досліджень отримано нові закономірності впливу Al, V, Ti, Mo, B, W (12...35% мас.) – для безоксидних систем КНС №1 і V_2O_5 , Mo_2O_3 , B_2O_3 , WO (20...35% мас.) – для оксидних систем КНС №2 на зносо-корозійні властивості конструкційних матеріалів. Запропоновано новий комплексний підхід дослідження мікротвердості з використанням геометричної

інтерпретації у вигляді трикутника, що складається з основних елементів при насиченні в КНС. Виділено області з різним значенням мікротвердості, які задаються співвідношенням основних насичуючих компонентів, таких як ECD, ГТА та насичуючий елемент. Досліджено розподілу залишкових напружень по товщині захисного покриття, які мають стискаючі напруження і описуються поліномом четвертого порядку. В порівнянні з покриттями, отриманими в ізотермічних умовах в відновлених шихтах, вони більші на 17–22%, що може пояснюватись більш високою концентрацією легуючих елементів в покриттях, отриманих з використанням КНС та їх проникненням в конструкційний матеріал на більшу глибину. Результати досліджень міцності зчеплення дифузійних покриттів, отриманих в розроблених КНС та отриманих в ізотермічних умовах у відновлених шихтах дозволили доказати, що найбільш висока міцність зчеплення отримана у алітованих і молібденованих покриттів. Адгезія на сталі 45 зростає від 5,8–6,1 МПа (алітування) до 6,5–6,6 МПа (молібденування), міцність зчеплення зростає в 1,15–1,20 рази. Отримані результати корелюють з показником сумарного балу крихкого руйнування, який у ізотермічних покриттів більше на 20–30%. Це можна пояснити більшим часом термічної обробки деталі, при отриманні покриттів в ізотермічних умовах, коли значно росте зерно. При обробці з використанням КНС вона не перевищує 2 години тоді, як для отримання подібних товщин в ізотермічних умовах потрібно часу в 1,5–1,7 рази більша. На основі теоретичних і експериментальних досліджень формування захисних покриттів розроблено моделі та встановлено зв'язок структуроутворення з експлуатаційними властивостями. Здійснено промислову апробацію технології отримання захисних шарів з використанням КНС на промислових підприємствах України. Одержані результати досліджень використовуються у навчальному процесі Дніпровського державного технічного університету при підготовці фахівців третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальності 132 –Матеріалознавство (галузі знань 13 – «Механічна інженерія») з навчальних дисциплін «Поверхнєве зміцнення захисними покриттями», «Методи експериментальних досліджень, аналіз та презентація результатів» «Способи підвищення зносостійкості деталей автомобілів», «Дослідження технологій зміцнення робочих поверхностей автомобілів», «Моделювання технологічних і фізичних процесів», що дало змогу підвищити рівень теоретичного засвоєння матеріалу, поліпшило практичні навички та забезпечило набуття необхідних компетентностей.

Результати роботи, які мають наукову новизну:

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розвитку науково-технологічних основ керування процесами структуроутворення при дифузійному насиченні конструкційних матеріалів з використанням термохімічного синтезу елементів.

1. Вперше розроблено та сформульовано теоретичні фізико-хімічні положення формування функціональних покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ, які полягають в термохімічному

поєднанні елементів в єдину складову композицію, де головним чинником виступає вид композиційних сполук на базі оксидних систем з V_2O_5 , Mo_2O_3 , B_2O_3 , WO і без оксидних систем з Al, V, Ti, Mo, B, W з 5...6% мас. газотранспортного агенту: NH_4Cl , I_2 , AlF_3 , NH_4F . При цьому використовуються внутрішні термохімічні джерела тепла енергетичної складової дифузії (ECD). Це розширює можливості створення конструкційних матеріалів, працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин коксохімічного виробництва за рахунок підвищеної концентрації хрому на 5...27%, алюмінію на 8...19 %.

2. Вперше встановлено термодинамічні закономірності температури самозаймання (650...770 °C) і максимальної температури (940...1300 °C) від вмісту ECD (16...25% мас.) при формуванні дифузійних шарів. Отримані математичні залежності описуються поліномом другого порядку і дають змогу прогнозувати товщину захисних покриттів на конструкційних матеріалах при використанні порошкових композиційних насичуючих середовищ.

3. Вперше встановлено, що в умовах термохімічної взаємодії компонентів формуються багатофазні дифузійні шари: Fe_2Al_5 , Fe_3Al , $(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe)_7C_3$, $FeCr$, Al_2Cr_3 , $CrAl_2$, V_2C , VC , TiC , Mo_2C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, Fe_3Mo_3C , Fe_2Mo_2C , $(Fe,Cr,Al)_2B$, FeB , $Fe_3(CB)$, Fe_2W_2C , Fe_7W_6 з виділенням надлишкових зміцнюючих фаз на основі інтерметалідних сполук $TiAl$, Cr_2Ti , Fe_7W_6 , що дозволяє підвищити показники зносостійкості матеріалів.

4. Отримала подальший розвиток фізико-хімічна модель процесу формування дифузійних шарів з використанням композиційних насичуючих середовищ, яка враховує склад основних галогенідів насичуючого середовища: $AlCl$, $AlCl_2$, AlI , AlI_2 , $CrCl$, $CrCl_2$, $CrCl_3$, CrI , CrI_2 , CrI_3 , VCl , VCl_2 , VCl_3 , VCl_4 , CrF , CrF_2 , CrF_3 , TiF , TiF_2 , TiF_3 , TiF_4 , TiI , TiI_2 , TiI_4 , $MoCl$, $MoCl_2$, $MoCl_3$, $MoCl_4$, MoI , MoI_2 , MoI_3 , MoI , AlF , AlF_2 , BF , BF_2 , WF_2 , WF_3 , WF_4 , WI_2 , WI_3 , I_4 , структуру та фазовий склад дифузійних шарів, температурно-часові параметри процесу насичення – 1...2,5 години.

5. На основі теоретичних і експериментальних досліджень отримано нові закономірності впливу Al, V, Ti, Mo, B, W (12...35% мас.) – для безоксидних систем КНС №1 і V_2O_5 , Mo_2O_3 , B_2O_3 , WO (20...35% мас.) – для оксидних систем КНС №2 на зносо-корозійні властивості конструкційних матеріалів.

6. Запропоновано та реалізовано принципово новий підхід щодо прогнозування експлуатаційних властивостей з використанням приведених воксельних кольорів оцінки 3D структур: пористості, фазового складу, карбідних фаз, характеру розподілу насичуючих елементів в захисних дифузійних шарах з використанням оксидних і безоксидних систем.

7. Вперше отримано нові експериментальні дані та встановлено закономірності впливу складу композиційних насичуючих середовищ, що леговані хромом (15% мас.), алюмінієм (12...25% мас.), титаном (18% мас.), ванадієм (22% мас.), молібденом (32% мас.), бором (12% мас.), вольфрамом (35% мас.) на експлуатаційні властивості дифузійних шарів, що дає можливість збільшити відносну зносостійкість конструкційних матеріалів на

15...40%, корозійну стійкість на 18...35% і жаростійкість на 22...30% у порівнянні з покриттями, отриманими в ізотермічних умовах. Залежність зносостійкості від часу випробувань описується поліномом п'ятого порядку, а корозійна стійкість у 20% водних розчинах HCl, H₂SO₄, HNO₃ – поліномом четвертого порядку.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження

Отримано нові результати моделювання, прогнозування структури, фазового складу покриттів і їх експлуатаційних властивостей. Розроблено інноваційні технології, що дозволили забезпечити підвищення зносо-корозійної стійкості захисних покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ. Здійснено промислову апробацію технології отримання захисних шарів з використанням КНС на ПрАТ «Южжокс», «Полтавському ГЗК», ТОВ «Придніпровський механічний завод» і ТОВ «Верхньо-дніпровський авторемонтний завод» з очікуваним річним економічним ефектом від впровадження нових технологій 2 060 000 грн. Нові композиційні насичуючі середовища для зміцнення поверхні конструкційних матеріалів захищені 4 патентами України.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях. Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень за темою дисертації викладено автором в 74 науково-технічних праці, в тому числі: 3 монографії, 34 статті у наукових фахових виданнях України, 15 статей у закордонних виданнях, що індексуються наукометричною базою даних SCOPUS, 1 стаття у закордонному науково-технічному виданні, 17 публікацій у матеріалах і працях конференцій, отримано 4 патенти України. Індекс Гірша (h-index) h=5 SCOPUS. Публікації за темою дисертації повністю відображають основні положення і висновки докторської дисертації.

Відповідність дисертації та автореферату встановленим вимогам.

Дисертація і автореферат написані грамотною технічною мовою на високому науковому рівні. Стиль викладення результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує належну доступність їх сприйняття. Автореферат за змістом є ідентичним основним положенням дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота і автореферат оформлені у відповідності до діючих вимог і відповідає затвердженому МОН України паспорту спеціальності 05.02.01-матеріалознавство. Дисертаційна робота містить наукові положення, які раніше не були захищені і нові науково-обґрунтовані результати досліджень та задовольняє вимогам пп.2,5,7,8 паспорту спеціальності 05.02.01-матеріалознавство.

Основні зауваження щодо змісту дисертації:

До змісту представленої дисертаційної роботи є наступні зауваження:

1. В оглядовому розділі дисертації, зокрема у пп. 1.3, де йдеться про формування зносо-корозійностійких покриттів шляхом створення

наноструктурованих поверхневих шарів необхідно ширше розглянути наноструктуризацію поверхонь тертя, яка здійснюється за допомогою різних технологій, залежно від комбінації "покриття – підкладка".

2. У розділі 2 дисертації приведена методика дослідження пористості покриттів, яка описується металографічним методом на шліфах за допомогою металографічного, або растрового електронного мікроскопу відповідно до ГОСТ 9391-80 (СТ РЕВ 2947-81 і СТ РЕВ 2952-81), але в роботі широко застосован метод вокселізації при 3D моделюванні. Необхідно все було розмістити в одному розділі.

3. На с. 149 сказано, що на грані АІТ–ECD зростає кількість галогенідів. Отже, джерелами атомів хрому, бору при насиченні з використанням композиційного насичуючого середовища є чисті метали, відновлені з відповідних оксидів, а насичення алюмінієм відбувається з АІТ. В роботі недостатньо роз'яснено що мається на увазі з АІТ.

4. На с.209 вказано, що максимальна температура ECD - реакції становить 2100 К. Співвідношення $Me_{vn}O_{zn}$ і Al знаходять по відповідних стехіометричних рівняннях реакцій відновлення з урахуванням міри відновлюваності оксидів. В роботі не приведено числового значення цієї міри.

5. При дослідженні температури самозаймання й максимальної температури (рис. 5.1–5.6) залежно від КНС вказано, що зі збільшенням кількості інертної домішки настає момент, коли відбувається виродження теплової хвилі. З роботи не зрозуміло чи врахован масштабний фактор. Який контейнер застосовувався при дослідженнях?

6. В роботі розглядається первинна вірогідність (DS) при 3D моделюванні по пороговим значенням, за рахунок підсилення різниці фазового складу дифузійного шару (кореляція з 3D зображенням (рис. 6.10–6.11, г) і структурної оцінки карбідних фаз. Необхідно було б для порівняння ефективності процесів насичення, навести такі значення для покриттів отриманих в ізотермічних умовах.

7. На с. 280 вказано, що дифузійні боровані шари отримані в КНС №1 з вірогідністю 0,95–0,98 мають в своєму складі фази при насиченні в КНС №1: $(Fe, Cr, Al)_2B$, вкраплення FeB, Fe_3Al , борокарбід цементитного типу $Fe_3(CB)$ і тв. розчин бору, хрому, алюмінію в α -залізі (рис. 6.42, б). В КНС №2 має фази: $(Fe, Cr, Al)_2B$, $(Fe, Cr)_7C_3$, Fe_3Al , (рис. 6.42, в) і тв. розчин бору, хрому, алюмінію в α -залізі. Необхідно дати пояснення чому не має борокарбиду цементитного типу $Fe_3(CB)$ в фазовому складі при використанні КНС №2 і як це впливає на експлуатаційні властивості борованих покриттів.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Наведені зауваження не зменшують загального високого рівня результатів роботи та її практичного значення і не впливають на її загальну позитивну оцінку. В цілому дисертація і автореферат викладені в логічній послідовності й написані технічно та стилістично грамотною мовою. Розділи

дисертаційної роботи достатньо проілюстровані таблицями і рисунками та мають безпосередній зв'язок з одержаними науковими і практичними досягненнями. Загальні висновки дисертації відповідають меті та завданням дослідження. Зміст автореферату відповідає тексту, науковим і практичним положенням дисертаційної роботи. Наукова новизна, сформульовані висновки і рекомендації, що виносяться на захист, відповідають темі, меті та головному напрямку існуючої науково прикладної проблеми. За темою, змістом та рівнем проведення теоретичних і експериментальних досліджень дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.0-матеріалознавство. Робота Кругляк Ірини Василівни на тему «Науково-технологічні засади формування зносо-корозійностійких покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій вирішено важливу науково-прикладну проблему сучасного матеріалознавства.

Дисертаційна робота «Науково-технологічні засади формування зносо-корозійностійких покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ» повністю відповідає вимогам пунктів 9,10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів» до докторських дисертацій, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р., зі змінами та доповненнями (постанови Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015р., № 1159 від 30.12.2015р.), а її автор, Кругляк Ірина Василівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01- матеріалознавство.

Офіційний опонент:

Професор кафедри матеріалознавства
і обробки матеріалів Державного вищого навчального
закладу «Придніпровської державної академії
будівництва та архітектури» МОН України,
доктор технічних наук, професор

 Д. В. Лаухін

Підпис д.т.н., проф. Лаухіна Д.В. засвідчую:

Вчений секретар ДВНЗ ПДАБА



 А. М. Гайдар