

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ІМ. В.М. БАКУЛЯ

**ВОРОНА ТЕТЯНА ВІТАЛІЇВНА**



УДК 621.791.92

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ  
ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОЮ  
ОБРОБКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ВУГЛЕЦЕВОВМІСНИХ  
НАПОВНЮВАЧІВ**

05.02.01 - матеріалознавство

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Кіровоградському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Кропивницький

**Науковий керівник**

член-кореспондент НААН України,  
доктор технічних наук, професор  
**Черновол Михайло Іванович**,  
Кіровоградський національний  
технічний університет МОН України,  
м. Кропивницький,  
ректор

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Подчерняєва Ірина Олександрівна**,  
Інститут проблем матеріалознавства  
ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ,  
провідний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор  
**Копилов Вячеслав Іванович**, Національний  
технічний університет України «Київський  
політехнічний університет ім. Ігоря  
Сікорського» МОН України, м. Київ,  
професор кафедри «Інженерії поверхні»

Захист відбудеться «15» грудня 2016 г. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.230.01 при Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України за адресою: 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України та на сайті інституту у розділі «Захист дисертацій» - «Спецрада Д. 26.230.01».

Автореферат розісланий «14» листопада 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д. 26.230.01  
доктор технічних наук, професор



В.І. Лавріненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Однією з актуальних задач матеріалознавства є заміна дорогих високолегованих сталей і сплавів, з яких виготовлені робочі органи і деталі трибосопряжень сільськогосподарської техніки, на більш дешеві з підвищеною зносостійкістю. Це завдання вирішується шляхом нанесення на робочі поверхні деталей зносостійких покриттів при використанні найбільш економічно доцільних як матеріалів, так і технологій їх нанесення та обробки. Перспективними матеріалами для зносостійких покриттів є сталі феритного і мартенситного класів, головна особливість яких - здатність до структурно-фазових перетворень при термодформаційному впливі. У дослідженнях К.А. Ющенко, Ю.С. Борисова, Ю.О. Харламова, М.І. Черновола, В.С. Івашка, М.А. Білоцерківського показано, що для створення зносостійких покриттів доцільно використовувати більш дешеві і прості в реалізації методи газополуменевого (ГПН) і електродугового (ЕДН) напилення. Разом з тим, при реалізації цих методів максимальна твердість сталевих покриттів недостатня (35...40 НРС), що істотно знижує їх зносостійкість і обмежує сферу застосування.

У даній роботі пропонується підвищити зносостійкість ГПН/ЕДН - покриттів зі сталей феритного і мартенситного класів електроконтактною обробкою (ЕКО) та використанням вуглецевовмісних наповнювачів. При цьому підвищення твердості і зносостійкості забезпечується за рахунок структурно-фазових перетворень в матеріалі напиленого покриття при його ЕКО з використанням вуглецевовмісних наповнювачів і без них.

У зв'язку з викладеним, актуальним є дослідження впливу ЕКО на структурно-фазові перетворення в ГПН/ЕДН - покриттях зі сталей мартенситного і феритного класів, в тому числі з використанням вуглецевовмісних наповнювачів, для підвищення їх зносостійкості. Результати, отримані в роботі, дозволять вирішити науково-технічну задачу створення робочих поверхонь деталей сільськогосподарської (с-г) техніки з підвищеною зносостійкістю шляхом нанесення покриттів методами ГПН/ЕДН дротяних сталей мартенситного (40X13) і феритного (Св-08) класів з подальшою їх ЕКО та використанням вуглецевовмісних наповнювачів. Ефект підвищення зносостійкості досягається за рахунок структурно-фазових  $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$  перетворень в покриттях зі сталей мартенситного і феритного класів, отриманих методами ГПН/ЕДН, шляхом варіювання режимів їх ЕКО та використанням вуглецевовмісних наповнювачів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі експлуатації і ремонту машин Кіровоградського національного технічного університету згідно плану науково-технічної діяльності університету в рамках науково-дослідної роботи за темою: «Трибологічні основи підвищення надійності деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки» (номер державної реєстрації №0114U003656). Автором представлені результати аналізу видів зношування деталей і робочих органів с-г техніки та характеристика способів газотермічного напилення (ГТН) для підвищення їх зносостійкості. Запропоновано використовувати

електроконтактну обробку ГТН- покриттів для створення зносостійких робочих поверхонь деталей с-г техніки. Дисертаційні дослідження виконувались також в інтересах спільної науково-дослідної роботи з ІПМіц ім. Г.С. Писаренко НАН України за темою «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (програма « Ресурс», номер державної реєстрації №0113U002676). Автором проведені дослідження мікроструктури, фізико-механічних властивостей та зносостійкості ГТН - покриттів в залежності від режимів їх формування.

**Мета роботи** полягає в підвищенні зносостійкості газотермічних покриттів із сталей мартенситного і феритного класів для деталей сільськогосподарської техніки шляхом їх електроконтактної обробки і з використанням вуглецевовмісних наповнювачів.

У відповідності з метою роботи програма досліджень включала вирішення наступних задач:

- розробка способу та схеми створення зносостійких сталевих покриттів, що включають ГПН/ЕДН і ЕКО з використанням вуглецевовмісних наповнювачів;
- побудова математичних моделей залежностей зносостійкості та пористості покриттів, отриманих ГПН/ЕДН від технологічних параметрів їх ЕКО;
- визначення фазового складу і мікротвердості ГПН/ЕДН- покриттів зі сталей мартенситного (40X13) та феритного (Св-08) класів (початковий стан) та після їх ЕКО з використанням вуглецевовмісних наповнювачів і без них;
- дослідження впливу електроконтактної обробки і вуглецевовмісних наповнювачів на фізико-механічні властивості (пористість, адгезійну міцність, зносостійкість) покриттів, отриманих ГПН/ЕДН дротяних сталей 40X13 і Св-08;
- визначення інтенсивності абразивного зношування ГПН/ЕДН - покриттів зі сталей 40X13 і Св-08 після їх електроконтактної обробки;
- оптимізація режимів ЕКО напилених покриттів зі сталей 40X13 и Св-08;
- розробка практичних рекомендації для створення зносостійких покриттів зі сталей мартенситного и феритного класів комбінованим методом, який включає ГПН/ЕДН і ЕКО з використанням вуглецевовмісних наповнювачів і без них.

**Об'єкт дослідження.** Процеси нанесення зносостійких покриттів, що включають газополуменево/електродугове напилення сталей мартенситного та феритного класів із послідуною їх електроконтактною обробкою з використанням вуглецевовмісних наповнювачів і без них.

**Предмет дослідження.** Вплив на зносостійкість і фізико-механічні властивості ГПН/ЕДН - покриттів із сталей мартенситного і феритного класів електроконтактної обробки і вуглецевовмісних наповнювачів.

**Методи дослідження.** Для реалізації поставлених задач використовувався комплекс експериментальних методів дослідження фізико-механічних властивостей покриттів та методи металографічного і рентгеноструктурного аналізу для вивчення їх мікроструктури та фазового складу. Мікротвердість визначали на мікротвердомірі "Micromet-II", адгезійну міцність - за допомогою установки СІТ - 3 в ІПМіц ім. Г.С. Писаренка НАН України, інтенсивність зношування – на машині типу 2070СМТ-1 та трибометрі МТВП-9М. Абразивне зношування оцінювали з використанням вільного абразиву. Обробка отриманих

даних здійснювалася за допомогою пакету прикладних програм (ППП ПРІАМ) з використанням методів математичної статистики.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше встановлено, що електроконтактна обробка газотермічних покриттів знижує їх пористість до 2,08...3,03%, підвищує мікротвердість до 7,4...8,5 ГПа та зносостійкість в 2...4 рази при оптимальних параметрах ЕКО (силі струму  $I$ , тиску  $P$ , часу імпульсів  $t_i$  - пауз  $t_n$ ), які визначені за допомогою математичного моделювання та підтверджені експериментально, і для дротяних сталей феритного класу Св-08 складають:  $I=3,0$  кА;  $P=15$  МПа;  $t_i=t_n=0,02$  с, а для сталей мартенситного класу 40X13:  $I=6,0$  кА;  $P=30$  МПа;  $t_i=t_n=0,04$  с.

2. Вперше визначено, що електроконтактна обробка покриттів, отриманих ГПН/ЕДН сталей Св-08/40X13, збільшує вміст оксидів до  $\approx 20$  об.% і знижує концентрацію залишкового аустеніту до  $V\gamma=8$  об.% в покритті та дозволяє здійснювати насичення напилених покриттів вуглецевовмісними наповнювачами (ультрадисперсна алмазо-графітова шихта (УДАГ)/колоїдний графіт).

3. Вперше доведено, що рівень властивостей ГПН/ЕДН - покриттів зі сталей Св-08/40X13 (мікротвердість, зносостійкість) забезпечується  $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$  перетвореннями в них при ЕКО та контролюється ступенем насичення мартенситної  $\alpha\text{-Fe(M)}$ - фази вуглецем, який збільшується з підвищенням вмісту вуглецю і оксидів в покритті, а також при використанні наповнювачів.

4. Вперше рентгенофазовим аналізом встановлено, що в покриттях із сталей Св-08/40X13 поряд з основними фазами мартенситу і аустеніту присутня незначна кількість оксидів і карбідів заліза (3...5%), при цьому кількість мартенситної  $\alpha\text{-Fe(M)}$ - фази, відповідальної за зносостійкість, підвищується зі збільшенням вмісту вуглецю в покритті згідно схем їх утворення в наступній послідовності: 1) ГПН/ЕДН сталей Св-08/40X13; 2) ГПН/ЕДН сталей Св-08/40X13 + ЕКО; 3) ГПН/ЕДН сталей Св-08/40X13+ УДАГ/колоїдний графіт) + ЕКО.

5. Вперше показано, що плавне зменшення мікротвердості по товщині ГПН - покриттів зі сталей 40X13 і Св-08 після їх ЕКО забезпечує адгезійну міцність покриттів до 180-220 МПа і мінімізує ймовірність їх відшарування.

**Практичне значення результатів досліджень.** Розроблено спосіб, схеми і технологію створення зносостійких сталевих покриттів, що поєднує методи ГПН/ЕДН-покриттів і їх ЕКО з використанням вуглецевовмісних наповнювачів і без них. Дослідно-промислова технологія пройшла апробацію при виготовленні ножів і протиріжучих пластин подрібнюючого барабану комбайнів та при відновленні вала муфти зчеплення і розподільного вала дизельного двигуна тракторів на Полтавському дослідно-механічному заводі (м. Полтава, Україна) і Кіровоградському ВАТ «Агробудавтосервіс» (м. Кіровоград, Україна). Стендові і експлуатаційні випробування показали підвищення зносостійкості ножів і протиріжучих пластин на 25-30% та терміну служби відновлених валів в 2 рази. Розроблені технологічні інструкції для зміцнення ножів і протиріжучих пластин та відновлення валів. Дослідно-промисловою перевіркою результатів досліджень було виконано в виробничих умовах Кіровоградського ВАТ «Агробудавтосервіс», м. Кіровоград, Україна (акти від 11.04. 2016 р.).

**Особистий внесок автора.** Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Постановка задач, аналіз наукових результатів і основних висновків досліджень виконано разом з науковим керівником д.т.н. Черноволом М.І. У наукових роботах, які опубліковані в співавторстві, здобувачеві належить: дослідження впливу ЕКО на структурно-фазові перетворення в сталевих ГТН-покриттях та на їх твердість і зносостійкість [1,2,4,11]; електроконтактний метод отримання та обробки покриттів [8-10]; характеристика комбінованих методів інженерії поверхні [12, 13]; метод нанесення зносостійких сталевих покриттів ГПН/ЕДН і ЕКО [14-17]; вибір обладнання для напилення [3]; аналіз причин і видів зносу робочих органів с.-г. машин [5-6] та підвищення їх зносостійкості [7,18,19]; результати досліджень триботехнічних властивостей ГТН-покриттів після їх ЕКО [20].

**Апробація роботи.** Матеріали дисертації були представлені на наукових конференціях і семінарах: XLIV і XVII конференціях аспірантів, викладачів і співробітників Кіровоградського національного технічного університету (м. Кіровоград, 2010, 2011 р.р.); 16-му міжнародному науково-технічному семінарі «Сучасні проблеми підготовки виробництва і ремонту в промисловості і на транспорті» (Свалява, Закарпатська область, 2016 р.р.); 14-й і 15-й міжнародних науково-технічних конференціях «Інженерія поверхні і реновація виробів» (Свалява, Закарпатська область, 2014 р.; Затока, Одеська область, 2015 р.); XI міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2010 р.); 4-й міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2014 р.); 15-й та 16-й міжнародних науково-практичних конференціях «Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика» (Затока, Одеська область, 2015 р., м. Одеса, 2016 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для обслуговування» (м. Херсон, 2015 р.); III міжнародній науково-технічній конференції «Іноваційні технології в машинобудуванні» (м. Новополицьк, 2015 р.); X міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки" (м. Кіровоград, 2015 р.). Робота в повному обсязі була розглянута на науково-технічному семінарі лабораторії зміцнення поверхні елементів конструкцій ІПМіц ім. Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ, 2015 р. та розширеному науково-технічному семінарі Херсонської державної морської академії, м. Херсон, 2016 р.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 20 наукових робіт, в тому числі: 3 статті - у виданнях, які увійшли до переліку міжнародних наукометричних баз, 5 статей - у фахових виданнях, 10 праць апробаційного характеру, 2 патенти України на корисну модель.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота виконана на 149 сторінках машинописного тексту і включає 75 рисунків, 25 таблиць, списку використаних джерел з 235 найменувань та 8 додатків. Загальний обсяг дисертації - 237 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, вказано об'єкт та предмет дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** на підставі огляду літератури та патентно-інформаційних досліджень розглянуті основні види зношування деталей с.-г. техніки. Показано, що в переважній більшості випадків руйнуються тільки робочі поверхні деталей, які можна відновити і захистити від зносу нанесенням покриттів з матеріалів зі спеціальними властивостями. Вибір матеріалів для зносостійких покриттів здійснювався відповідно до умов експлуатації деталей і видів їх зносу. На підставі аналізу статистичних даних по зносостійкості і довговічності деталей с.-г. техніки зроблено висновок, що в якості матеріалів для зносостійких покриттів найефективніше використовувати сталі мартенситного і феритного класів. Вибір цих сталей обґрунтований їх доступністю, низькою вартістю і особливими властивостями, які обумовлені структурно-фазовими перетвореннями в них при термодформаційному впливі.

Одним із шляхів створення зносостійких покриттів є не тільки вибір матеріалів, але і способу їх нанесення. У дослідженнях К.А. Ющенко, Ю.С. Борисова, Ю.О. Харламова, М.І. Черновола показано, що для підвищення зносостійкості деталей с.-г. техніки шляхом нанесення покриттів доцільно використовувати більш дешеві і прості в реалізації методи газополуменового (ГПН) і електродугового (ЕДН) напилення. Однак, при реалізації цих методів максимальна твердість сталевих покриттів становить 35...40 HRC, що знижує їх зносостійкість. Підвищують зносостійкість ГПН/ЕДН - покриттів пластичним деформуванням, струмами високої частоти, лазерним, ультразвуковим, електронно-променевим, хіміко-термічним, термомеханічним та ін. методами обробки. Використання цих методів обмежено рядом недоліків: зокрема, лазерна і електронно-променева обробка призводять до неоднорідної гетерогенної макроструктури поверхні, а хіміко-термічна обробка характеризується великою тривалістю процесу. Огляд літературних джерел свідчить про те, що задача підвищення зносостійкості покриттів ГПН/ЕДН сталей феритного і мартенситного класів на сьогодні не вирішена. Таким чином, дослідження, направлені на створення зносостійких покриттів зі сталей мартенситного і феритного класів методами ГПН/ЕДН для деталей с.-г. техніки, є актуальними.

При виборі способу підвищення зносостійкості ГПН/ЕДН- покриттів необхідно прагнути до використання способів з мінімально необхідним нагрівом (високі температури негативно позначаються на "об'ємних" властивостях деталей, що зміцнюються) і малими величинами припусків на фінішну обробку. Істотне підвищення зносостійкості напилених покриттів можна забезпечити механотермічною обробкою (МТУО). Використання комбінації технології напилення і термомеханічної обробки відкриває широкі можливості в створенні зносостійких покриттів. В найбільшій мірі цим вимогам задовольняє електроконтактна обробка (ЕКО), яка здійснюється під тиском при прямому пропусканні електричного струму і характеризується незначною зоною термічного впливу (0,2...1,0 мм) та імпульсним характером,

який забезпечує збереження вихідних механічних властивостей деталей. Тому предметом дослідження і стало визначення впливу ЕКО на зносостійкість ГПН/ЕДН- покриттів зі сталей феритного і мартенситного класів.

У **другому розділі** представлені загальна схема, методи і методики досліджень, наведені характеристики обладнання і матеріалів, що використані в роботі. В якості матеріалів для покриттів застосовувалися дротяні сталі 40X13 мартенситного класу і Св-08 феритного класу, а в якості вуглецевмісних наповнювачів - колоїдний графіт і ультрадисперсна алмазо-графітова шихта (УДАГ). УДАГ - порошкоподібна система з вуглецевою матрицею, в яку входять частинки алмазу, та яка складається із алмазної і графітоподібної фаз з співвідношенням 30:70. Покриття наносили з використанням установок для високошвидкісного ГПН і ЕДН дротяних матеріалів за такими режимами: ГПН - розпилення повітряним струменем металу, розплавленого в факелі пропано-кисневого полум'я; ЕДН - розпилення струменем продуктів згоряння пропано-повітряної суміші (1/25) металу, розплавленого в електричній дузі. ЕКО покриттів здійснювалося на установці, розробленій на основі машини для точкового зварювання МТП-100.5 з модернізованим блоком управління. Для визначення оптимальних технологічних параметрів ЕКО проводилося математичне планування експерименту за допомогою пакету прикладних програм «Планування, регресія і аналіз моделей» (ППП ПРИАМ). Дослідження мікроструктури проводилися на оптичному мікроскопі «MeF-3» фірми "Reichert" (Австрія) і на скануючому електронному мікроскопі "CamScan" ("Oxford Instruments", Англія). Фазовий склад покриттів визначали на установці ДРОН-3 в  $CoK_{\alpha}$  випромінюванні. Пористість оцінювали кількісним стереологічним аналізом на аналізаторі зображення «Mini-Magiscan» фірми "Josef Loebel" (Англія) за програмою «Genias 26». Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі "Micromet-II". Адгезійну і когезійну міцність покриттів досліджували на установці СІТ-3 в ІПМіц ім. Г.С. Писаренко НАН України. Дослідження на тертя та знос виконували на модернізованій машині типу 2070 СМТ-1 і на трибометрі МТВП-9М за схемою: «пальчиковий індентор - диск» при однонаправленому обертанні диску. Абразивне зношування здійснювали з використанням вільного абразив. Величину зносу визначали на аналітичних вагах АДН-200М. Обробку отриманих даних здійснювали за допомогою методів математичної статистики.

У **третьому розділі** розроблено спосіб отримання зносостійких покриттів розпиленням сталевих дротів з подальшою ЕКО з використанням вуглецевмісних наповнювачів і без них. Електроконтактна обробка забезпечує деформаційні структурно-фазові перетворення в покриттях зі сталей феритного (Св-08) і мартенситного (40X13) класів. Представлені технологічні схеми формування покриттів із дротяних сталей ГПН/ЕДН: 1) з подальшою ЕКО; 2) з використанням вуглецевмісних наповнювачів і ЕКО (рис.1, табл.1).

Покриттями за пропонованим способом наносили на торцеві поверхні циліндричних зразків зі сталі Ст.3 напиленням дротяних сталей 40X13 або Св-08 (рис. 2,а). Одну партію напилених зразків обробляли електроконтактним методом, другу партію - електролітичним поліруванням. Метою електрохімічної обробки



було розкриття пор для більш глибокого насичення вуглецевмісними наповнювачами. Після напилення і електрополірування зразки обробляли ультразвуком в суспензії з колоїдним графітом або УДАГ (розмір часток 0,03...0,1 мкм). Під дією ультразвуку наповнювачи насичували ГПН- покриття на глибину 0,5...0,8 мм. Потім зразки сушили і обробляли електроконтактним методом шляхом їх розташовування між двома електродами (рис. 2,б,в) установки МТП-100.5 (рис. 2,в). Тиск на електроді складає 10-60 МПа, величина струму – 2-16 кА, час імпульсу-паузу - 0,02-0,04 с. Тривалість нагрівання знаходиться в межах 8-15 с.

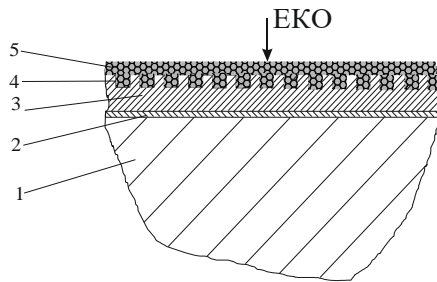
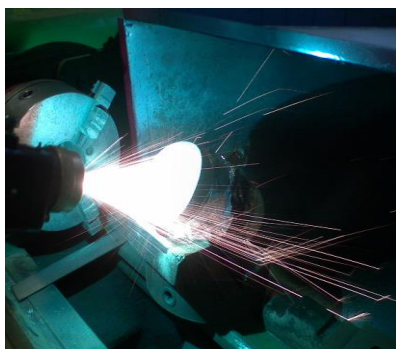


Рис. 1. Схема зносостійкого покриття:  
1 - основа (сталевий Ст. 3);  
2 - прошарок (сталевий Х20Н80);  
3 - ГПН/ЕДН - покриття зі сталей 40Х13/Св08;  
4 - пори в поверхневому шарі покриття;  
5 – вуглецевмісні наповнювачі (колоїдний графіт, УДАГ).

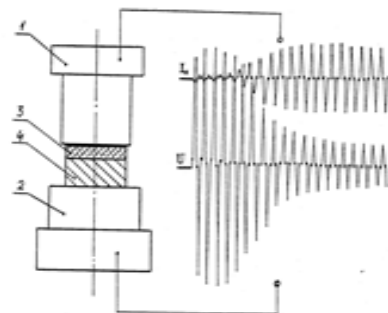
Таблиця 1

### Методи і режими формування зносостійких покриттів

МЕТОД	Характеристика методів			
	Матеріал покриття	Робочі Гази	Відстань напилення, мм	Товщина шару покриття, мм
Газотермічне напилення (ГПН, ЕДН)	40Х13 Св-08	Пропан + кисень	150 – 180	1,0 - 1,5
	Склад електроліту	Температура електроліту, °С	Густина струму, А/см <sup>2</sup>	Тривалість процесу, хв.
Електрохімічне полірування (відкриття пор)	Н <sub>3</sub> РО <sub>4</sub> (760 г)+СгО <sub>3</sub> (100 г)	40 – 50	0,5	8,0 - 10,0
	Тип вуглецевмісного наповнювача	Частота коливання, кГц	Тривалість процесу, хв.	Робоче середовище
Ультразвукова Обробка	Колоїдний графіт, УДАГ, 0,5 об. %.	44,0	7,0-8,0	Спирт етиловий С <sub>2</sub> Н <sub>5</sub> ОН
	Сила струму, кА	Тиск, МПа	Тривалість ЕКО, Т, с	Час імпульсів, t <sub>ім</sub> і пауз t <sub>п</sub> , с
Електроконтактна обробка	І	Р	8-10	0,02...0,04
	3,0-0,8	10 – 60		



а



б



в

Рис. 2. Процес отримання експериментальних зразків з покриттями: а) процес напилення зразків; б) схема ЕКО покриттів: 1, 2-електроди; 3-покриття; 4-зразок; в) установка для ЕКО.

Для визначення оптимальних режимів ЕКО використовували методи математичного планування. Критеріями оптимізації вибрані зносостійкість і пористість. Отримані математичні моделі (1) і (2) встановлюють зв'язок зносостійкості і пористості покриттів з технологічними характеристиками ЕКО.

$$Y_1 = 3,25576 + 2,37774x_3^2 - 2,07533x_3^3 + 0,545923x_1^3x_2 - 0,842191x_1^3 + 0,284621x_2^3x_3^2 - 1,51418x_1^2x_2^2 - 1,45394x_3^3 - 0,73219x_1^3x_2^2 - 1,95605x_2x_3^3 - 1,65074x_2^2 + 1,15314x_2^2x_3^3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,00811228 + 0,00394767x_2x_3^2 + 0,00349501x_2^3x_3^2 + 0,00250342x_1^3x_2^2x_3^2 - 0,00381417x_1^3x_2^2x_3^3 - 0,00172934x_2^3 + 0,000583571x_2 + 0,00135172x_2^3x_3^3 - 0,00107438x_1^3 + 0,00212148x_3^2 + 0,00132599x_2^2 - 0,00223146x_1 + 0,00162397x_3 \quad (2)$$

де  $Y_1$ ,  $Y_2$  – математична модель в кодованих значеннях для пористості та зносостійкості покриття відповідно.

Розрахунок моделей здійснювався за допомогою ППП ПРИАМ. Отримані регресійні залежності (1) і (2) використовували для аналізу та оптимізації технологічного процесу ЕКО. На основі отриманих результатів одержані наочні уявлення про геометричний образ функції відгуку і побудовані відповідні геометричні поверхні, які представлені на рис. 3 та 4.

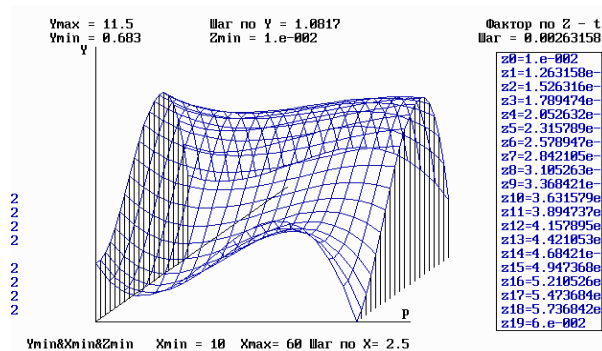


Рис. 3. Графік дослідження поверхні відгуку  $Y_1 = f(X_1, X_2)$  в тривимірному просторі при  $X_3 = 3$  кА

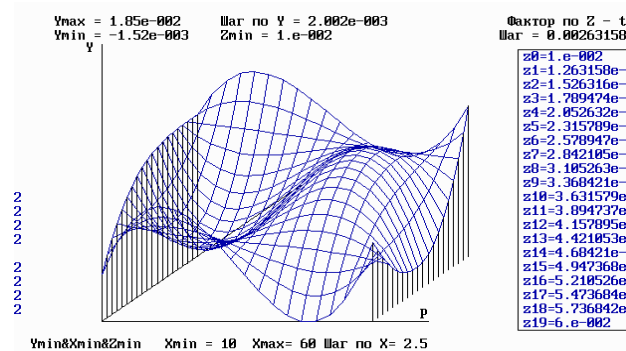


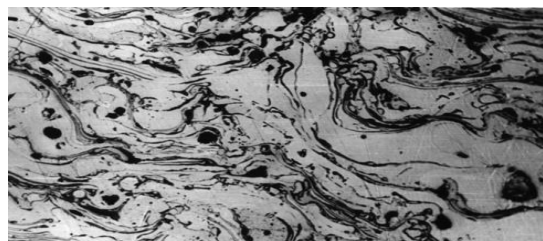
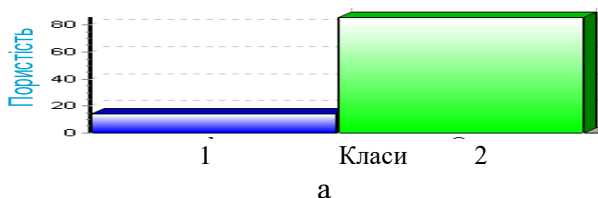
Рис. 4. Графік дослідження поверхні відгуку  $Y_2 = f(X_1, X_2)$  в тривимірному просторі при  $X_3 = 15$  МПа

На підставі проведених досліджень визначені оптимальні режими ЕКО напилених покриттів зі сталей мартенситного і феритного класів, які значно відрізняються. Покриття зі сталей Св-08 феритного класу допускають ЕКО на наступних режимах: струм нагрівання  $I=3,0$  кА, тиск  $P=15$  МПа, час імпульсів-пауз  $t=0,02$  с., а зі сталі 40Х13 мартенситного класу:  $I=6,0$  кА,  $P=30$  МПа,  $t=0,04$  с. Режими ЕКО вибиралися з урахуванням структури і властивостей матеріалу покриття і деталі. Оптимальний режим ЕКО повинен забезпечувати аустенітно-мартенситне перетворення в матеріалі покриття і виключати його розплавлення.

Глибина насичення вуглецевмісними наповнювачами сталевих покриттів визначається їх пористістю. ГПН- покриття менш щільні і містять  $\sim 15\dots 20\%$  пор (табл. 2, рис. 5,а,в), що визначає значну ефективність використання наповнювачів. Менша ефективність використання наповнювачів для ЕДН- покриттів пов'язана з їх порівняно щільною ( $6\dots 10\%$ ) структурою (табл. 3, рис. 5,б,г).

Таблиця 2  
Пористість ГПН-покриттів

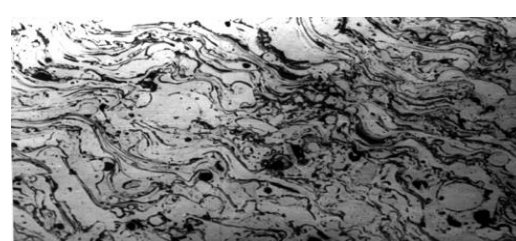
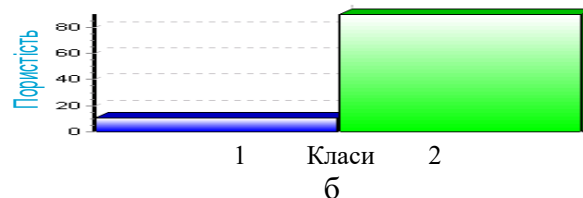
Клас	Опис	% площі
1	Пори	15.39%
2	Основа	84.61%



в ×250

Таблиця 3  
Пористість ЕДН-покриттів

Клас	Опис	% площі
1	Пори	6.29%
2	Основа	93.71%



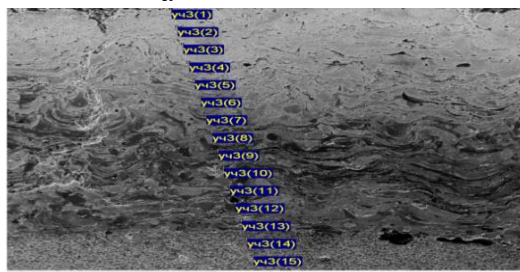
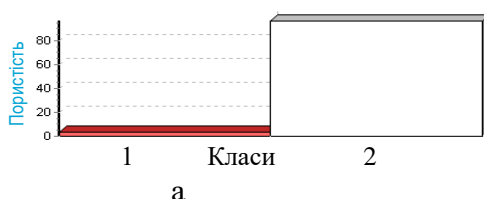
г

Рис. 5. Гістограми розподілу пористості (а,б) та мікроструктура поперечного перерізу покриттів (в,г), отриманих ГПН (а,в) і ЕДН (б,г).

ЕКО покриттів дозволяє зменшити пористість ГПН- покриттів з 10...15 % до 2,08...3,03% (табл. 3 і 5, рис. 5,а,в, рис. 6.а,б) і ЕДН- покриттів з 5...7 % до 0,04...1,11 % (табл. 4 і 6, рис. 5,б,г и рис.6,б,г).

Таблиця 4  
Пористість ГПН - покриттів після ЕКО

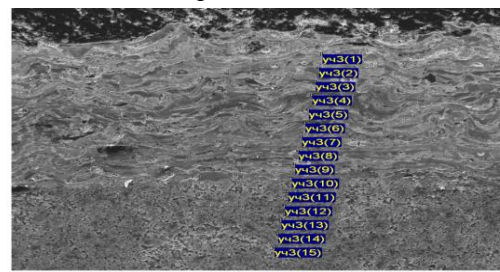
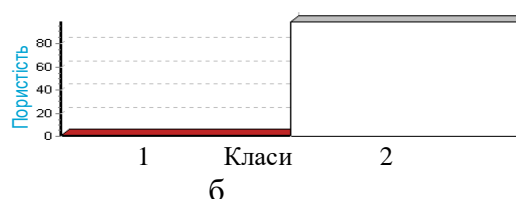
Клас	Опис	% Площі
1	Пори	3.3%
2	Основа	96,87%



в

Таблиця 5  
Пористість ЕДН - покриттів після ЕКО

Клас	Опис	% Площі
1	Пори	1,11%
2	Основа	98,89%



г

Рис. 6. Гістограми розподілу пористості (а, б) та мікроструктури поперечного перерізу покриттів (в, г), отриманих ГПН (а, в) і ЕДН (б, г) після ЕКО

Таким чином, в розділі пропонується спосіб створення зносостійких покриттів з сталей феритного і мартенситного класів шляхом ГПН/ЕДН і їх ЕКО з

вуглецевмісними наповнювачами (колоїдний графіт, УДАГ) і без них. Для визначення оптимальних режимів ЕКО отримані математичні моделі, що встановлюють зв'язок параметрів ЕКО з зносостійкістю і пористістю покриттів.

У четвертому розділі представлені результати досліджень структури, фазового складу і мікротвердості отриманих покриттів. В результаті ГПН/ЕДН формується ламельна гетерофазна мікроструктура покриття (рис. 7 а,б).

У складі ГПН- покриття зі сталі 40Х13 присутні  $\alpha$ -Fe(M),  $\gamma$ -Fe(A), оксиди  $Fe_3O_4$  і FeO (рис. 7,в, табл. 6), а зі сталі Св-08 -  $\alpha$ -Fe (Ф) і оксид FeO (рис. 7,д, табл. 6). У складі ГПН- покриттів зі сталі Св-08 з наповнювачем УДАГ після ЕКО присутні  $\alpha$ -Fe(Ф),  $\gamma$ -Fe(A), оксид FeO, а також невелика кількість карбїду заліза  $Fe_3C$  і вуглецю (рис. 7,е, табл. 6). Поява в фазовому складі цих покриття таких структурних складових, як аустенїт  $\gamma$ -Fe(A), карбїд  $Fe_3C$  і вуглець свїдчить про їх насичення графітом. Для ГПН- покриття зі сталі Св-08 характерна підвищена величина фізичного розширення дифракційної лінії матричної  $\alpha$ -Fe(M)- фази, що вказує на підвищений вміст в нїй вуглецю (рис. 7,д,е). Більш низький вміст оксидів FeO і  $Fe_3O_4$  в ГПН- покриттях порівняно з ЕДН- покриттями пов'язаний з тим, що ГПН властиві нижчі температури і більший розмір розплавлених частинок, ніж ЕДН, що зменшує вигорання легуючих елементів і окислення.

У складі ЕДН- покриттів зі сталі Св-08 присутні  $\alpha$ -Fe(Ф), оксиди FeO і  $Fe_3O_4$  (табл. 6, рис. 7,д). При цьому вміст в покритті оксиду FeO суттєво перевищує вміст оксиду  $Fe_3O_4$ . У ЕДН- покритті зі сталі 40Х13 присутні:  $\alpha$ -Fe(M),  $\gamma$ -Fe(A), оксиди  $Fe_3O_4$  і FeO (табл. 6, рис. 7,а). Вміст FeO в ЕДН- покритті зі сталі 40Х13 досить незначний, порівняно з покриттям зі сталі Св-08. Низький вміст аустенїту  $\gamma$ -Fe(A) в ЕДН- покриттях зі сталі 40Х13 пов'язаний з високою швидкістю польоту частинок, що розпилюються, при якій краплі розплаву не встигають пройти процес насичення їх вуглецем з відновлювальної атмосфери продуктів згоряння пропано-повітряної суміші. Знижена концентрація хрому в покритті має місце завдяки утворенню оксидів  $Fe_3O_4$  (Cr), легованих хромом.

Фазові перетворення, які мають місце при напilenні і обробці сталей Св-08 і 40Х13 з вуглецевмісним наповнювачем впливають на мікротвердість покриттів (рис. 8). Дослідження мікротвердості проводили на ГПН- покриттях, для яких ЕКО більш ефективна, що пов'язано з їх значною пористістю (табл. 2, рис. 5,а).

У випадку сталі Св-08 формуються покриття з низькою твердістю ( $HV=1900\dots2000$  МПа), що обумовлено відсутністю мартенситу  $\alpha$ -Fe(M), невисоким вмістом залишкового аустенїту  $\gamma$ -Fe(A) і малою концентрацією оксидів  $Fe_3O_4$  і FeO (табл. 6, рис. 7,д). В результаті ЕКО збільшення мікротвердості практично не реєструється ( $HV=2250$  МПа), що пов'язано з малим вмістом вуглецю в сталі. ЕКО ГПН - покриттів зі сталі Св-08 з наповнювачем супроводжується збільшенням мікротвердості покриттів до  $H_m=4000\dots6000$  МПа (рис. 8,а) за рахунок насичення покриття графітом (рис.7,е, табл. 6).

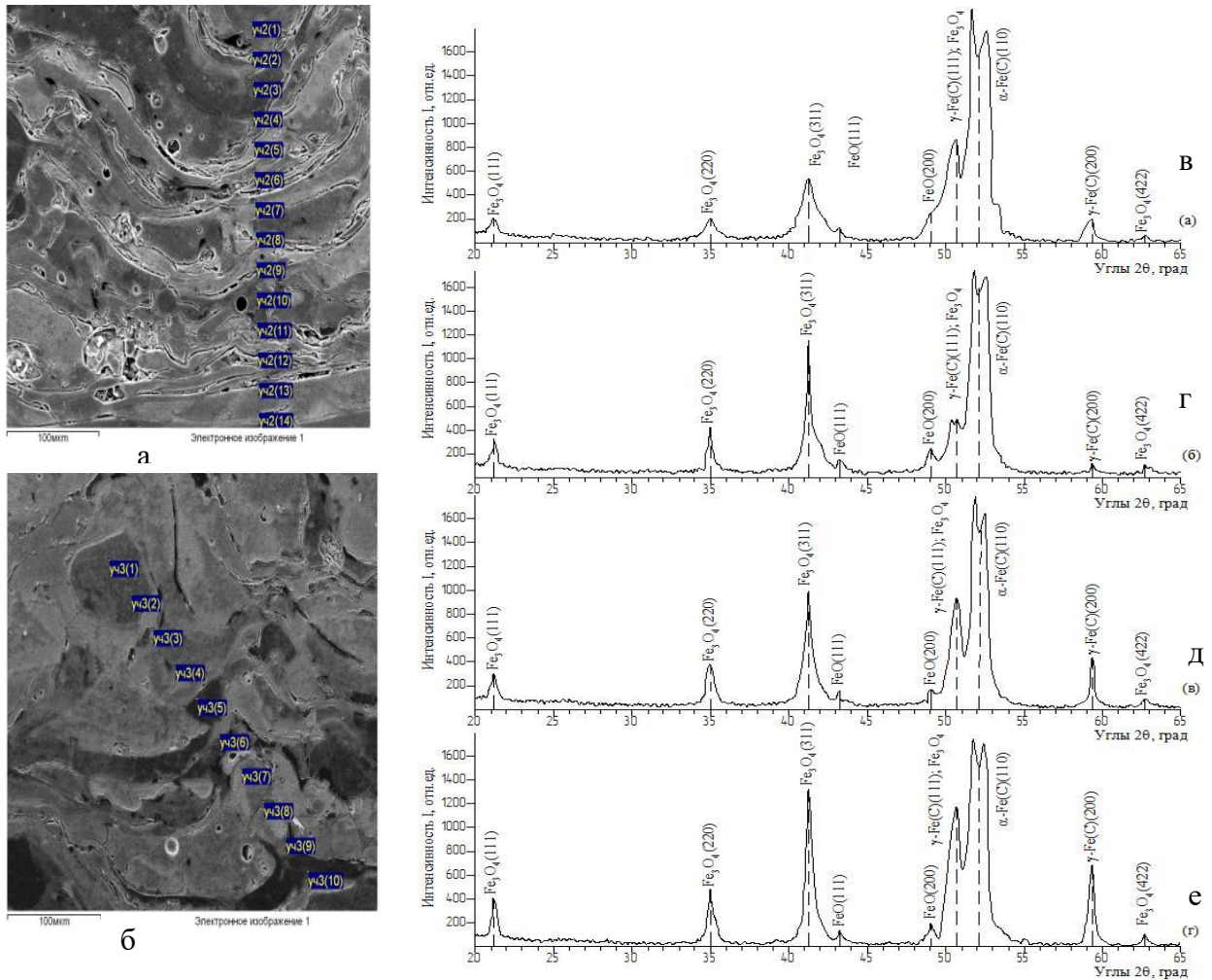


Рис. 7. Ламельна мікроструктура поперечного перерізу ГПН (а) і ЕДН (б) – покриттів. Фрагменти рентгенівських дифрактограм ( $CoK_{\alpha}$ ) ГПН- покриттів зі сталі 40X13 (в, г) і Св-08 (д, е): в - вихідний стан 40X13 (ГПН); г - 40X13 (ЕКО+УДАГ); д - вихідний стан Св-08 (ГПН); е- Св-08 (ЕКО+УДАГ).

Таблиця 6

Фазовий склад покриттів з дротяних сталей Св-08 і 40X13

Матеріал покриття	Метод нанесення покриття	Фазовий склад			
		Вихідний (ГПН/ЕДН)	ГПН/ЕДН +ЭКО	ГПН/ЕДН +ЭКО+С	ГПН/ЕДН +ЭКО+УДАГ
Св-08	ЕДН	$\alpha$ -Fe(Ф); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$\alpha$ -Fe (Ф); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$\alpha$ -Fe (Ф); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$\alpha$ -Fe (Ф); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Св-08	ГПН	$\alpha$ -Fe(Ф) FeO	$\alpha$ -Fe (Ф); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -	$\alpha$ -Fe (Ф); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -	$\alpha$ -Fe (Ф); FeO; Fe <sub>3</sub> C; $\gamma$ -Fe(A)
40X13	ЕДН	$\alpha$ -Fe(M); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe(A)	$\alpha$ Fe(M); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe(A)	$\alpha$ -Fe(M); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe(A)	$\alpha$ -Fe(M); FeO; $\gamma$ -Fe(A)
40X13	ГПН	$\alpha$ -Fe(M); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe(A);	$\alpha$ Fe(M); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe(A)	$\alpha$ -Fe(M); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe(A)	$\alpha$ -Fe(M); FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe(A)

У випадку сталі 40X13 формуються покриття з високою твердістю (HV=3000...3700 МПа), яка забезпечується присутністю  $\alpha$ -Fe(M),  $\gamma$ -Fe(A) і аустенітно-мартенситним ( $\gamma$ -Fe(A)  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe(M) перетворенням (рис.7,г). ЕКО ГПН-покриття зі сталі 40X13 з наповнювачем супроводжується зростанням його

мікротвердості до  $HV=7400\dots 8500$  МПа (рис. 8,б), що обумовлено наявністю в його складі більшої ніж в покритті зі сталі Св-08 кількості вуглецю і оксидів, а також перетворенням залишкового аустеніту в мартенсит деформації. При аустенітно-мартенситному  $\alpha\text{-Fe(M)} \rightarrow \gamma\text{-Fe(A)}$  перетворенні весь вуглець, який міститься в аустеніті, фіксується в мартенситі, утворюючи сильно пересичений не рівноважний розчин. Пересичення  $\alpha$ -твердого розчину вуглецем призводить до сильних спотворень кристалічної решітки мартенситу і як наслідок, до створення високої щільності дислокацій в мартенситі, що обумовлює високу твердість покриття. Характер розподілу мікротвердості по глибині покриття не залежить від типу наповнювачів.

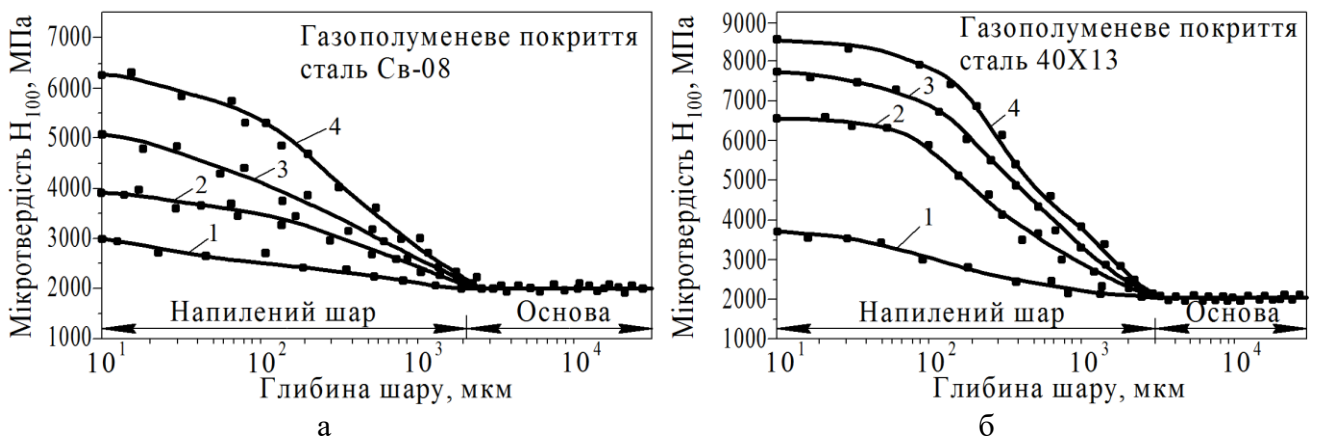


Рис. 8. Розподіл мікротвердості по глибині ГПН- покриттів зі сталей Св-08 (а) і 40X13 (б): 1– вихідний стан; 2– після ЕКО; 3,4 – ГПН– покриття з вуглецевмісним наповнювачем (3 – колоїдний графіт; 4 – УДАГ після ЕКО

Таким чином, відмінності структурно-фазового складу покриттів зі сталей мартенситного і феритного класів є головною з причин зміни їх властивостей при термодформаційному впливі в процесі ЕКО. Структура, фазовий склад, мікротвердість покриттів зі сталей Св-08/40X13 визначаються їх вихідною пористою структурою при ГПН/ЕДН і параметрами ЕКО.

У п'ятому розділі представлені результати дослідження триботехнічних випробувань ГПН/ЕДН покриттів зі сталі Св-08/40X13 з наповнювачем після їх ЕКО, які показали (рис. 9), що в початковому стані покриття зі сталі 40X13 мають низьку зносостійкість (рис. 9, а, крива 1). ЕКО цього покриття знижує інтенсивність його зношування і призводить до збільшення зносостійкості в 3-4 рази (рис. 9,а, крива 2) та в 4-5 раз з наповнювачами (рис. 9,а, крива 3), що пов'язано зі збільшенням їх мікротвердості. Крім цього перетворення аустеніту в мартенсит ( $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$ ) при ЕКО зміцнює покриття і призводить до появи в них стискаючих напруг, що перешкоджає руйнуванню при терті. Покриття зі сталі Св-08 мають більш низьку зносостійкість (рис. 9,б, крива 1) в порівнянні зі сталю 40X13 (рис. 9,а, крива 1). ЕКО цього покриття з наповнювачем і без нього призводить до збільшення зносостійкості (зниження вагового зносу) в 2 рази (рис. 9,б, крива 2, 3). Покриття зі сталі мартенситного класу 40X13 показали кращу стійкість до абразивного зношування. Таким чином, ЕКО покриттів зі сталей Св-08 і 40X13 забезпечують підвищення їх зносостійкості за рахунок  $\alpha\text{-Fe(M)}$ ,  $\gamma$ -

Fe(A), оксидів FeO; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, карбиду заліза Fe<sub>3</sub>C та перетворення аустеніту в мартенсит ( $\gamma$ -Fe(A)  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe(M)).

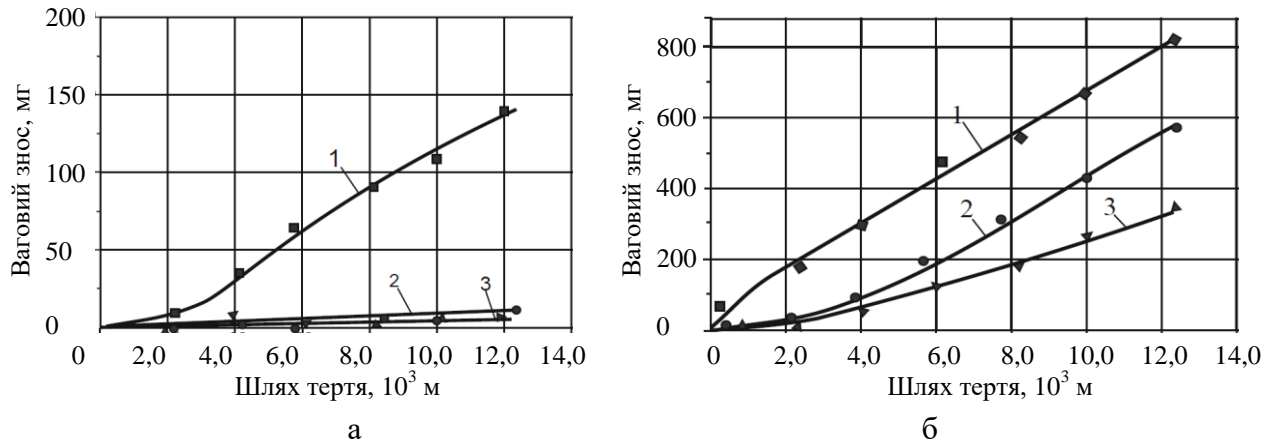


Рис. 9. Залежність вагового зносу  $I_q$ (а) від шляху тертя (тертя без змащення,  $p_a=3$  МПа) для зразків з покриттями із дротяних сталей 40X13 (а,б) і Св-08 (б): 1 – ГПН - покриття; 2 – ГПН-покриття + ЕКО; 3– ГПН – покриття + УДАГ+ЕКО

Розроблені технологічні інструкції та дослідно-експериментальна технологія зміцнення робочих поверхонь ножів і протиріжучих пластин подрібнюючого барабана кормозбиральних комбайнів та відновлення вала муфти зчеплення і розподільного вала дизельного двигуна трактора, яка пройшла апробацію на Полтавському дослідно-механічному заводі і Кіровоградському ВАТ «Агробудавтосервіс» та дозволила підвищити їх зносостійкість на 25-30% і збільшити термін служби в 2,5-3 рази. ЕКО цих покриттів з технологічної точки зору не має відмінних особливостей, що зумовило ідентичну послідовність її технологічного процесу. На основі проведених досліджень рекомендовано робочі органи с-г машин, що працюють в умовах абразивного зношування, виготовляти з ГПН-покриттями зі сталей 40X13 з подальшою їх ЕКО, а деталі трибоспряджень – відновлювати покриттями зі сталі Св-08 з вуглецевовмісними наповнювачами і їх ЕКО.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача створення робочих поверхонь деталей с.-г. техніки з підвищеною зносостійкістю шляхом нанесення покриттів ГПН/ЕДН дротяних сталей мартенситного (40X13) і феритного (Св-08) класів з подальшою їх ЕКО та використанням вуглецевовмісних наповнювачів. Ефект підвищення зносостійкості досягається за рахунок структурно-фазових  $\gamma$ -Fe(A)  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe(M) перетворень в покриттях шляхом варіювання параметрами ЕКО і використанням вуглецевовмісних наповнювачів.

1. Вперше розроблено спосіб і схеми формування зносостійких сталевих покриттів шляхом комбінації методів ГПН/ЕДН і ЕКО з використанням вуглецевовмісних наповнювачів і без них. Встановлено, що ЕКО за рахунок термо-деформаційного впливу реалізує в ГПН/ЕДН – покриттях зі сталей Св-08 і 40X13  $\gamma$ -Fe(A)  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe(M) перетворення і насичує їх наповнювачами.

2. Шляхом математичного моделювання процесу ЕКО отримані залежності зносостійкості і пористості покриттів від параметрів ЕКО (тиску Р, сили струму I,

тривалості імпульсів струму  $t_i$  і пауз  $t_n$ ), що дозволили визначити їх оптимальні значення для сталі Св-08 ( $I=4,9...5,8$  кА,  $P=10...20$  МПа, с.,  $t_i = t_n = 0,02$  с) і сталі 40X13 ( $I=3,0...3,5$  кА,  $P=20$  МПа,  $T_n=8...10$  с,  $t=t_n=0,02...0,04$  с), які знизили пористість до 2,08...3,03%, підвищили мікротвердість до 7,4...8,5 ГПа і зносостійкості в 2...4 рази.

3. Запропоновано метод заповнення пор напилених покриттів вуглецевмісними наповнювачами, який включає електрополірування покриттів для розкриття пор, УЗО в суспензії з наповнювачами і їх ЕКО. Введення наповнювачів здійснюється з двофазної композиції, що складається з суспензії (толуол) і дисперсної фази (колоїдний графіт, УДАГ), яка становить 0,1-3,0 мас.%, з накладенням ультразвукових коливань. Подальша ЕКО покриттів здійснюється прямим пропусканням струму 3-8 кА при тиску 10-30 МПа.

4. Встановлено, що глибина насичення покриттів наповнювачами визначається їх пористістю, яка залежить від швидкості польоту частинок, що розпилюються, і знижується від 15% при ГПН до 6% при ЕДН. Менша ефективність використання наповнювачів при ЕДН- покриттів пов'язана з їх щільною і дисперсною структурою. Використання наповнювачів доцільно для ГПН – покриттів з пористістю 15...30%. Висока концентрація пропану в продуктах горіння і низька швидкість польоту частинок при ГПН сприяють насиченню крапель розплаву вуглецем.

5. Обґрунтовано, що мікротвердість і зносостійкість отриманих покриттів забезпечується  $\gamma\text{-Fe(A)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(M)}$  перетвореннями в них при ЕКО і залежить від ступеня насичення мартенситної  $\alpha\text{-Fe(M)}$ - фази вуглецем. Рентгенофазовим аналізом визначено, що в покритті збільшився вміст оксидів (до 20 об.%), знизилась концентрація залишкового аустеніту (до 8 об.%), що забезпечило підвищення вмісту мартенситу, який відповідає за твердість. Кількість  $\alpha\text{-Fe(M)}$ - фази підвищується зі збільшенням вмісту вуглецю в послідовності відповідно до схем покриттів: 1) ГПН/ЕДН сталей Св-08/40X13; 2) ГПН/ЕДН сталей Св-08/40X13+ЕКО; 3) ГТН/ЕДН сталей Св-08/40X13+наповнювачами+ЕКО.

6. Визначено, що зростання мікротвердості ГПН- покриттів зі сталі 40X13 до  $HV=7400...8500$  МПа після ЕКО забезпечується вмістом залишкового аустеніту (20...30 об.%). Мікротвердість покриттів зі сталі Св-08 в результаті ЕКО ( $HV=2250$  МПа) не збільшується, що обумовлено малою концентрацією оксидів і вуглецю. Поява аустеніту (5 об.%), карбіду  $\text{Fe}_3\text{C}$  і вуглецю в покриттях з наповнювачем після ЕКО підвищує їх мікротвердість до  $HV=4000...6000$  МПа. Плавне зменшення мікротвердості по товщині покриттів після ЕКО мінімізує ймовірність їх відшарування і забезпечує високу адгезійну міцність.

7. Встановлено, що ЕКО ГПН/ЕДН покриттів зі сталі Св-08/40X13 підвищує їх зносостійкість 2-4 рази та в 4-5 разів з використанням наповнювачів. Присутність в покритті метастабільного аустеніту блокує зародження і поширення в ньому мікротріщин, які формують частинки зносу, а перетворення аустеніту в мартенсит призводить до появи в ньому напруг стиску, що перешкоджає руйнуванню при терті. Кращу стійкість до абразивного зношування показали покриття зі сталі 40X13, тому робочі органи с.-г. машин доцільно



виготовляти з ЕДН- покриттями зі сталей 40Х13 з подальшою ЕКО, а деталі трибосопрязений - із ГПН- покриттями з наповнювачем і ЕКО.

8. Розроблено технологічні інструкції для зміцнення і відновлення ножів і протирижучих пластин подрібнюючого барабану комбайнів та валу муфти зчеплення і розподільного вала дизельного двигуна трактора, випробування яких показали підвищення зносостійкості ножів на 25-30% і терміну служби валів в 2,5-3 рази. Дослідно-промислова технологія пройшла апробацію на Полтавському дослідно-механічному заводі та Кіровоградського ВАТ «Агробудавтосервіс». Дослідно-промислово перевірку результатів досліджень виконано в виробничих умовах Кіровоградського ВАТ «Агробудавтосервіс».

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Видання, що внесені до переліку міжнародних наукометричних баз

1. Черновол М.И. Структурно-фазовые превращения в газотермических стальных покрытиях в процессе их напыления и последующей электроконтактной обработки / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, О.А. Микосянчик, Л.А. Лопата // Научно-технический журнал «Проблема тертя та зношування». /Вип. 2(67)/ - Київ: НАУ, 2015. - С. 99-109. Автором встановлено вплив структурно-фазових перетворень на твердість і зносостійкість в сталевих покриттях при їх ГТН і ЕКО. *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу РІНЦ.*

2. Черновол М.И. Использование структурно-фазовых превращений и модифицирования при электроконтактной обработке стальных газотермических покрытий для повышения износостойкости деталей сельскохозяйственной техники / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, О.П. Штемпель, Л.А. Лопата // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. /Вип. № 3./ – Новополоцк: ПГУ, 2016. - С. 115-122. Автором досліджені структурно-фазові перетворення при ЕКО сталевих ГТН-покриттів з вуглецевмісними наповнювачами). *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу РІНЦ.*

3. Дудан А.В. Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта электродуговым напылением / А.В. Дудан, **Т.В. Ворона**, С.А. Довжук, Ю.В. Брусило, Р.М. Салимов, Ю.В. Волков // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. /Вип. № 11/ – Новополоцк: ПГУ, 2014. - С. 121-126. Автором запропоновано обладнання для напильнення. *Журнал входить у міжнародну наукометричну базу РІНЦ.*

### Фахові видання.

4. Черновол М. И. Повышение износостойкости газотермических покрытий из железо-углеродистых сплавов электроконтактной обработкой / М. И. Черновол, **Т.В. Ворона**, Л.А. Лопата // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація /Вип. 28./ – Кіровоград: КНТУ, 2015. – С. 230-236. Автором розроблений спосіб підвищення зносостійкості ГТН-покриттів із залізовуглецевих сплавів ЕКО.

5. Черновол М. І. Умови експлуатації і основні причини виходу з ладу ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин / М. І. Черновол, **Т.В. Ворона** // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. /Вип. 24./ – Кіровоград: КДТУ, 2011. – С. 344-351. Автором проведений аналіз причин виходу з ладу ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин.

6. Бойко А.В. Умови експлуатації, основні причини виходу з ладу та основні напрямки підвищення зносостійкості ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин / А.В. Бойко., В.М. Пришляк, В.Н. Яропуд, **Т.В. Лопата** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природовикористання України. /Вип. 4. №144/ – К.: НУБП, 2010. - С. 200-208. Автором розглянуті основні напрямки підвищення зносостійкості ріжучих елементів робочих органів с.-г. машин.

7. Серeda Л.П. Аналіз методів підвищення зносостійкості і довговічності робочих органів бурякозбиральної техніки / Л.П. Серeda, І.А. Бабин, В.Я. Ніколайчук, **Т.В. Лопата**, // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного ун-ту. Серія: Технічні науки. /Вип. 5./ – В.: ВНАУ, 2010. - С. 28-37. Автором вибраний електроконтактний метод для підвищення зносостійкості робочих органів с.-г. техніки).

8. Лопата Л.А. Получение износостойких дискретных покрытий электроконтактным припеканием / Л.А. Лопата, Б.А. Ляшенко, В.И. Калиниченко, **Т.В. Лопата** // Научно-технический сборник «Проблемы тертя та зношування». /Вип. № 51/ – К.: НАУ, 2009. - С. 139 – 148. Автором запропонований електроконтактний метод отримання покриттів з рівномірними властивостями і підвищеною зносостійкістю.

### **Патенти**

9. Патент на корисну модель № 38178 Україна, МПК В22F 7/00. Спосіб отримання покриттів з порошкових матеріалів /Лопата Л.А., Ляшенко Б.А. Кіндрачук М.В., **Лопата Т.В.**, Медведєва Н.А., Лабунець В.Ф.: Заявник і патентовласник Национальный авиационный университет. Опубл. 2008; Бюл. № 24. Автором розроблений електроконтактний спосіб отримання щільних, зносостійких покриттів з високою адгезійною міцністю.

10. Патент на корисну модель № 103380 Україна, МПК В23Н 9/00, С23С 8/00. Спосіб розмірної обробки деталей машин із зносостійким струмопровідним покриттям / Ляшенко Б.А., Коваленко В.В., Капішон Л.С., Новогрудський Л.С., **Ворона Т.В.**, Кузін М.О., Волков Ю.В.: Заявник і патентовласник Інститут проблем міцності НАН України. Опубл. 2015; Бюл. № 23. Автором запропонований метод ЕКО зносостійких покриттів в розмір.

### **Праці апробаційного характеру**

11. Белоцерковский М.А. Структурные особенности в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования /М.А. Белоцерковский, **Т.В. Ворона**, М.С. Агеев, В.Н. Лопата, С.Л. Чиграй // Материалы 16 го междунар. научно-техн. семинара «Современные проблемы подготовки производства и ремонта в промышленности и на транспорте» 22-26 февраля 2016

г. Свалява Закарпатской области, АТМ Украины. – Киев: 2016. – С. 12-16. Автором досліджені структурні особливості сталевих ГТН- покриттів.

12. Дудан А.В. Применение гибридных технологий для реновации и повышения ресурса судовых машин и механизмов / А.В. Дудан, **Т.В. Ворона**, М.С. Агеев, Б.А. Ляшенко // Вестник Брестского государственного технического университета. Научно-теоретический журнал Машиностроение./Вип. №4(94)/ – Брест: БГТУ, 2015. - С. 18-22. Автором запропонований метод нанесення покриттів, що включає ГТН і ЕКО.

13. Корж В.Н. Комбинированные методы инженерии поверхности. В.Н. Корж, **Т.В. Ворона**, А.В. Лопата // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матер. 4-ї міждун. наук.-практ. конф., 19-21 травня 2014, Чернігів: ЧНТУ, 2014. – С. 159-163. Автором представлений аналіз комбінованих методів інженерії поверхні.

14. Черновол М.И. Способ получения износостойких покрытий / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, О.А. Микосянчик, Л.А. Лопата, В.И. Жорник // Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал «Инженер-механик» /Вип. № 2 (67)/ - Минск: 2015, апрель–июнь. – С. 38-39. Автором розроблені технологічні схеми створення зносостійких покриттів ГПН/ЕДН і їх ЕКО.

15. Черновол М.И. Получение износостойких напыленных покрытий /М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, Л.А. Лопата, Л.С. Капишон // Инжен. поверхн. и реновация изделий: Материалы 14-й международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» 2-6 июня 2014 г., Савлява – Киев: АТМ Украины, - С. 149-151. Автором запропонований спосіб створення зносостійких напилених покриттів.

16. Черновол М.И. Изготовление износостойких элементов трибосопряжений судовых машин и механизмов электроконтактной обработкой газотермических покрытий / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, В.В. Аулин // Материалы междуна. научно-практической конференции «Современные энергетические установки на транспорте, технологии и оборудование для обслуживания» (СЭУТТОО-201524) 25 сентября 2015 года, Херсонская государственная морская академия (ХГМА), г. Херсон: 2015 г. - С. 233-235. Автором розроблені практичні рекомендації для виготовлення зносостійких елементів трибо спряжень ЕКО напилених покриттів.

17. Черновол М.И. Изготовление деталей сельскохозяйственной техники с покрытиями из сталей ферритного и мартенситного классов повышенной износостойкости / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, С.Л. Чиграй, А.В. Лопата // Материалы 16-й междуна. научно – практическая конференция «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика» 20-23 сентября 2016, Одесса: 2016. - С. 198-201. Автором запропоновано виготовляти деталі с-г. техніки підвищеної зносостійкості з мартенситних і феритних сталей.

18. Черновол М.И. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной обработкой стальных газотермических покрытий / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский // Материалы III международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении»(ИннТехМаш-15)28 – 29 октября 2015 года, Полоцкий государственный университет (ПГУ),

Новополоцк: 2015 г. - С. 211-214. Автором показана можливість підвищення зносостійкості деталей с-г техніки ЕКО сталевих ГТН- покриттів.

19. Черновол М.И. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин и аппаратов перерабатывающей и пищевой промышленности / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, А.В. Башта, Л.А. Лопата Материалы 15-й международной. научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» 1-4 июня 2015, Затока Одесской области – Киев: АТМ України. - С. 202-205. Автором запропоновано підвищення зносостійкості деталей машин і апаратів харчової промисловості комбінованою технологією нанесення покриттів, яка включає ГТН покриттів і їх ЕКО.

20. Черновол М.И. Исследование триботехнических свойств газотермических покрытий модифицированных электроконтактной обработкой / М.И. Черновол, **Т.В. Ворона**, В.В. Аулин, В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский // Материалы 15-я междуна. научно – практическая конференция «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика» 15-18 сентября 2015, Одесская область, Затока: 2015. - С. 191-196. Автором отримані результати досліджень триботехнічних властивостей ГТН- покриттів після ЕКО.

### АНОТАЦІЯ

**Ворона Т.В. Підвищення зносостійкості сталевих газотермічних покриттів електроконтактною обробкою з використанням вуглецевмісних наповнювачів.** – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, 2016 р.

Розроблено спосіб і технологічні схеми формування зносостійких покриттів зі сталей феритного і мартенситного класів шляхом комбінації методів газополуменевого/електродугового напилення і електроконтактної обробки з використанням вуглецевмісних наповнювачів і без них. Встановлено, що дротяні сталей мартенситного класу доцільно розпилювати методом газополуменевого напилення, а дротяні сталі феритного класу – методом електродугового напилення. Шляхом дослідження структурно-фазових перетворень в напилених покриттях зі сталей феритного і мартенситного класів показано, що їх електроконтактна обробка дозволяє шляхом температурно-силового впливу реалізувати деформаційні  $\gamma \rightarrow \alpha$  (гама  $\rightarrow$  альфа) перетворення в матеріалі покриттів і тим самим підвищити їх твердість і зносостійкість та керувати ними. Електроконтактна обробка активує процес дифузії вуглецевмісних наповнювачів в покритті. Вуглецевмісні наповнювачі не тільки підвищують зносостійкість, але і можуть виконувати роль твердого мастила. Електроконтактна обробка не тільки активує процес дифузії вуглецевмісних наповнювачів в покриття, але і зменшує пористість напилених покриттів до 1...3%. Підвищена мікротвердість покриття зі сталі мартенситного класу після електроконтактної обробки обумовлена наявністю в складі покриття більшої ніж в феритній сталі кількості вуглецю. Плавне зменшення мікротвердості по товщині покриттів і на межі «покриття-основа» після їх електроконтактної обробки забезпечує високу адгезійну міцність покриттів і мінімізує ймовірність їх відшарування.

**Ключові слова:** електроконтактна обробка, газополуменеве і електродугове напилення, сталі ферритного і мартенситного класу, зносостійкість, структурно-фазові перетворення, газотермічне покриття, вуглецевовмісні наповнювачі.

## АННОТАЦІЯ

**Ворона Т.В. Повышение износостойкости стальных газотермических покрытий электроконтактной обработке с использованием углеродсодержащих наполнителей.** - Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, 2016 г.

Разработан способ и технологические схемы формирования износостойких покрытий из сталей ферритного и мартенситного классов путем комбинации методов ГПН/ЭДН с углеродсодержащими наполнителями и без них. Установлено, что ЭКО позволяет реализовать  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в стальных покрытиях, которые приводят к повышению в стали твердой мартенситной  $\alpha$  - фазы, что обеспечивает высокую твердость и износостойкость покрытий. ЭКО покрытий из стали 40X13 приводит к увеличению их износостойкости в 3-5 раз. Превращение аустенита в мартенсит в процессе ЭКО создает в покрытии сжимающие напряжения, что препятствует разрушению при трении. ЭКО сталей Св-08 приводит к двукратному увеличению их износостойкости. Сравнительно более низкая эффективность ЭКО покрытий из сталей ферритного класса обеспечивает относительно низкую их твердостью, что обусловлено малой концентрацией оксидов и углерода в стали. Покрытия из мартенситных сталей характеризуются лучшей стойкостью к абразивному изнашиванию. Повышение микротвердости покрытий из стали мартенситного класса после ЭКО обусловлено наличием в составе покрытия большего, чем в ферритной стали, количества углерода. Плавное уменьшение микротвердости по толщине покрытий, а также на границе «покрытие-основа» после их ЭКО обеспечивает высокую адгезионную прочность покрытий и минимизирует вероятность их отслоения. В результате исследований обосновано, что проволочные стали мартенситного класса необходимо распылять методом ГПН, а проволочные стали ферритного класса – методом ЭДН. При использовании углеродсодержащих наполнителей ЭКО активизирует процесс их насыщения в покрытии. Углеродсодержащие наполнители не только повышают износостойкость покрытий, но и могут быть использованы в качестве твердой смазки. Глубина насыщения покрытий углеродсодержащими наполнителями определяется их пористостью, которая зависит от скорости полета распыляемых частиц и уменьшается от 20...15% до 5...6% при переходе от ГПН к ЭДН. Использование углеродсодержащих наполнителей более целесообразно для ГПН-покрытий, так как они менее плотные и содержат 10...30% пор. Электроконтактная обработка позволяет не только активировать процесс насыщения покрытия углеродсодержащими наполнителями, но и уменьшать пористость напыленных покрытий до 1...3%. Электроконтактная обработка покрытий из сталей Св-08 и 30X13 с технологической точки зрения не имеет

отличительных особенностей, что обусловило идентичную последовательность ее технологического процесса. Рекомендовано рабочие органы деталей с-х машин, которые работают в условиях абразивного изнашивания, изготавливать с покрытиями, полученными напылением сталей мартенситного класса с последующей ЭКО, а детали трибосопряжений - напылением с использованием углеродсодержащих наполнителей и ЭКО. Разработаны практические рекомендации, которые были использованы при упрочнении и восстановлении ножей и противорежущих пластин измельчающего барабана кормоуборочных комбайнов, что позволило увеличить их износостойкость на 25-30%. Опытно-экспериментальная технология была использована при восстановлении вала муфты сцепления и распределительного вала дизельного двигателя трактора и обеспечивала повышение износостойкости и срока службы деталей в 2,5-3 раза.

**Ключевые слова:** электроконтактная обработка, газопламенное и электродуговое напыление, стали ферритного и мартенситного классов, износостойкость, структурно-фазовые превращения, газотермические покрытия, углеродсодержащие наполнители.

## SUMMARY

**Vorona T. Raising wear resistance of gas-thermal steel coatings *via* electric contact processing using carbon-containing fillers.** - Manuscript. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.01 – material science. – V. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine, Keiv, 2016.

Structural-phase transformations in sprayed coatings from steel of ferrite and martensite grades arising under electrocontact processing which initiates deformational  $\gamma \rightarrow \alpha$  (gamma  $\rightarrow$  alpha) transitions in the material of coatings and thus increase their hardness and wear resistance have been studied. The electrocontact processing activates the diffusion of carbon modifiers into coating accompanied by formation of atom-molecule bonds with its components and so enables obtaining a nanosized cell substructure on the basis of carbon modifiers, which not only can increase the coating wear resistance but also serve as a solid lubricant. A method and processing schemes for formation of wear-resistant coatings from steels of ferrite and martensite grades *via* combination of techniques for gas flame/electric arc spraying with and without modifiers have been developed. It was established that in order to produce high-hardness coatings, it is necessary to spray wire martensite steel by flame spraying whereas wire ferrite steels – by electric arc spraying. The increase in microhardness of coating from martensite steel after electrocontact processing is conditioned by the presence of higher contents of carbon and chromium carbide inclusions as compared to ferrite steel. The smooth decrease in microhardness through thickness and at the “coating-base” interface upon the coating processing provides a strong coating-to-base adhesion and minimizes the probability of coating detachment.

**Key words:** structural-phase transformation; steels of ferrite and martensite grades; wear resistance; gas-thermal coatings; flame and arc spraying; electrocontact processing.

Підписано до друку 10.11.2016. Формат 60x84 1/16.  
Умов. друк. арк. 0,9. Зам. № 241/2016. Тираж 100 прим.

©РВЛ КНТУ, м. Кіровоград, пр. Університетський, 8  
Тел. (0522) 55-92-45