

PACS numbers: 62.23.St, 68.37.-d, 75.50.Tt, 81.05.uj, 81.07.Bc, 81.70.Jb, 82.33.Vx

## **Підвищення властивостей та експлуатаційної стійкості зміцнення та відновлення деталей модифікуванням із нано- та дисперсними діамантами**

І. М. Рибалко<sup>1</sup>, С. П. Романюк<sup>1</sup>, Л. В. Омельченко<sup>1</sup>, О. В. Марков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Державний біотехнологічний університет,  
вул. Алчевських, 44,  
61002 Харків, Україна*

<sup>2</sup>*Національна академія Національної гвардії України,  
площа захисників України, 3,  
61001 Харків, Україна*

В роботі аналізуються три нових методи одержання покриттів на деталі з різних матеріалів: низьковуглецевих, низьколегованих і дисперсно-зміцнених, в яких досягалися необхідні властивості якості й ефективності у використанні. До них відносяться: підвищення споживчих властивостей, гальмування зміцнювальних фаз з відновлюваного деталю до покриття й одноразове зміцнення та заліковування дефектів. Для цього використовували різні технологічні підходи введення модифікувальної домішки в рідку ванну за нагрівання з попереднім її відпалом для коригування частки Оксигену; також одноразово коригували і частку модифікувальної домішки, яка змінювалася в межах від 5,0 до 15,0% ваги електроди. Економічний ефект від впровадження технології відновлення 100 шт. карданних валів згідно з розробленою технологією та параметрами їхнього зміцнення сягає 187,5 тис. грн.

The work analyses three new methods of obtaining coatings on parts from different materials: low-carbon, low-alloy, and dispersion-hardened ones, which achieve the necessary properties of quality and efficiency in use. These include improvement of consumer properties, inhibition of the strengthening phases from the restored part to the coating, and one-time strengthening and healing of defects. For this purpose, various technological approaches are used to introduce a modifying admixture into the liquid bath during surfacing with preliminary annealing it to correct the proportion of oxygen. The proportion of the modifying admixture, which varies from 5.0 to 15.0% of the electrode weight, is also adjusted once. The economic effect of the implementation of the technology of restoration of 100 cardan shafts, according to the developed technology and parameters of their strengthening, reaches 187.5 thousands of hryvnias.

**Ключові слова:** модифікування за натоплення, зміцнювальне покриття, структуроутворення, неоднорідність, взаємочин фаз, діамантова фракція, експлуатаційна стійкість.

**Key words:** modification during surfacing, reinforcing coating, structure formation, heterogeneity, phase interplay, diamond fraction, operational stability.

*(Отримано 8 листопада 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

Для підвищення якості металу виробів використовують, крім легувальних домішок, і модифікувальні суміші, які складаються із різних компонентів, що створюють змінні фазових складових і сприяють новим умовам кристалізації. Такий підхід забезпечує коригування структурного стану металу й одержання за подальших технологічних оброблень необхідні споживчі властивості виробів.

Вміст компонентів-домішок для модифікування підбирають в залежності від необхідності забезпечення конкретних властивостей під час одержання виробів різними методами.

В останні роки особлива увага приділяється використанню маловитратних технологій для їх одержання. До них відносяться різні шлаки доменного виробництва, золи від спалювання вугілля ТЕЦ, в склад яких входять мікролегувальні та модифікувальні компоненти.

Новим напрямом модифікування є дослідження (відновлювальних покриттів), спрямовані на використання домішки нано- та дисперсних діамантів, яких одержують різними методами: статичним навантаженням, динамічним і детонаційним. Основним недоліком таких діамантів з шихти є їхня схильність до розпаду з формуванням графіту за навіть невеликого періоду зберігання. Одержання більш стабільних діамантових фракцій досягається багаторазовою детонацією, і це робить їх дуже висококоштовним матеріалом.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка упродовж багатьох років разом з іншими спеціалістами відповідного профілю виконали дослідження стосовно одержання шихти з діамантовою фракцією від утилізації певного набору боєприпасів [1]. Така шихта містить нано- та дисперсні діаманти, які показали свою стабільність під час зберігання. Виходячи зі складу формувальних фаз у такій шихті, на першому етапі у раніш виконаних дослідженнях використовували лише немагнетну її фракцію [1]. У виконаних дослі-

дженнях в цій роботі вперше проводили пошук нових методів і напрямів використання магнетної частки такої шихти, яка може забезпечити нові підходи до ефективного модифікування покриттів з різних матеріалів і за різних умов експлуатації, і тому такі розробки відносяться до важливих та актуальних.

Мета даних досліджень: підвищення експлуатаційних властивостей деталей зміцненням і відновленням їхнього зношеного шару модифікуванням магнетною складовою шихти з діамантовою фракцією від утилізації певного набору боєприпасів.

Завдання досліджень:

- виконати статистичну аналізу складу зерен конгломерату шихти для попереднього прогнозування ефективного використання її;
- теоретично оцінити якісний і кількісний вміст компонентів і фаз за структуроутворення зерен конгломерату магнетної складової шихти та встановити зв'язок між фазами, що формуються;
- обґрунтувати основні параметри розробки новітньої технології відновлення деталей для конкретних умов використання;
- дослідити вплив діамантової фракції та зерен магнетної шихти на технологічні процеси виробництва й експлуатацію;
- провести випробування розробки.

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В дослідженнях використовували сучасні експериментальні та теоретичні методи. Оцінювали зміну структуроутворення під час модифікування магнетною часткою детонаційної шихти від утилізації певного набору боєприпасів, у яких закінчився термін зберігання. Для прогнозування можливості й ефективності її використання для відновлення деталей вивчали якісний і кількісний склади одержаних зерен конгломерату. Оцінку структуроутворення проводили металографічною оптичною мікроскопією, електронною мікроскопією та теоретичним описом оптико-математичним методом. Теоретичні дослідження ґрунтувалися на виявленні фаз різними кольорами, а додатково вони уможливили оцінити і їхній взаємочин. Властивості покриттів оцінювали згідно з вимірами мікротвердості та коерцитивної сили, а також іспитами на знос в умовах стендових випробувань.

На підставі теоретичних та експериментальних досліджень було надано рекомендації з використання магнетної складової детонаційної шихти від утилізації боєприпасів, яка вирізняється тим, що вона містить більше тонких включень оксидів Феруму ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), які покривають дисперсну діамантову фракцію. Одночасно у конгломератах зерен такої шихти є і нанодіаманти з пластичними покриттями, та вони подрібнюються в про-

цесі багаторазової детонації. Враховуючи цю різницю, знайдено додаткові напрями використання магнетної частки шихти для модифікування зміцнювальних і відновлювальних покриттів.

Показано, що використанням такої модифікувальної домішки (за оптимальної технології використання її) забезпечується гальмування дисперсно-зміцнених включень з основного металу, що дає змогу прогнозувати властивості покриття.

Шихта, яка містить дисперсну діамантову фракцію під час внесення її в рідку ванну, є ефективною для використання у спряженнях. Це досягається тим, що така фракція під час тертя за рахунок деформації подрібнюється і її частки довше зберігаються у порожнинах, а потім поступово заміщують зношені, формуючи вторинні захисні оксидні плівки.

Розроблено новий комбінований метод модифікування. Обґрунтовано можливість використання його для модифікування рідкого розчину одноразово для відновлення покриттів і заварювання незначних дефектів. Метод полягає у тому, що дефекти, яких було створено під час експлуатації, можливо ліквідувати заваркою через нанесення шлікерного покриття (локального) на місце їхнього розташування. В залежності від розміру дефектної зони слід використовувати частку домішки від 5,0 до 12%. Після відновлення дефектів ефективним є нанесення додатково покриття з модифікуванням обмазкою електроди. Частка домішки є оптимальною у 5–7% і коригується коефіцієнтом анізотропії структури.

Виконані дослідження згідно з використанням детонаційної шихти (магнетної та немагнетної фракцій) від утилізації певного набору боеприпасів пройшли стендові та промислові випробування на ДП «Завод імені В. О. Малишева»; підтверджено їхню ефективність.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В опублікованих у літературі роботах приділяється увага стосовно можливості використання і нерозчинних модифікувальних домішок, які можуть істотно впливати на рідкий розчин і властивості покриттів за рахунок зміни умов кристалізації, формування нових фаз, дислокаційної структури, схильності до дефектоутворення. Ефективність такого модифікування залежить від міри активності та ступеня їхнього зв'язку з киснем, газонасиченості оброблюваного металу. Важливим є також встановлення оптимальних домішок модифікатора та спосіб його введення.

Методологічно виконання роботи побудовано на основі діаграми Ісікави та відображає послідовність, напрями та зміст досліджень.

Експериментальні дослідження ґрунтувалися на методах мета-

логографічної та електронної мікроскопії, локальній спектральній і хемічній аналізі. Конгломерати зерен оцінювали теж статично спектральною та хемічною аналізами. Така шихта після розподілу її з виділенням магнетної складової включає, крім основних компонентів С, Fe, Cu, Al, ще і малу концентрацію модифікувальних і летких складових.

Зміни структурного стану описували теоретично оптико-математичною аналізою, яка уможливила виявити якісний і кількісний склад фаз, їхню зміну через модифікування, а також взаємочин між окремими складовими.

Властивості покриттів оцінювали методами мікротвердості та показниками коерцитивної сили (неруйнівним методом контролю), зміни яких відображають деградацію структурного стану під час експлуатації та рівень виникаючих напружень.

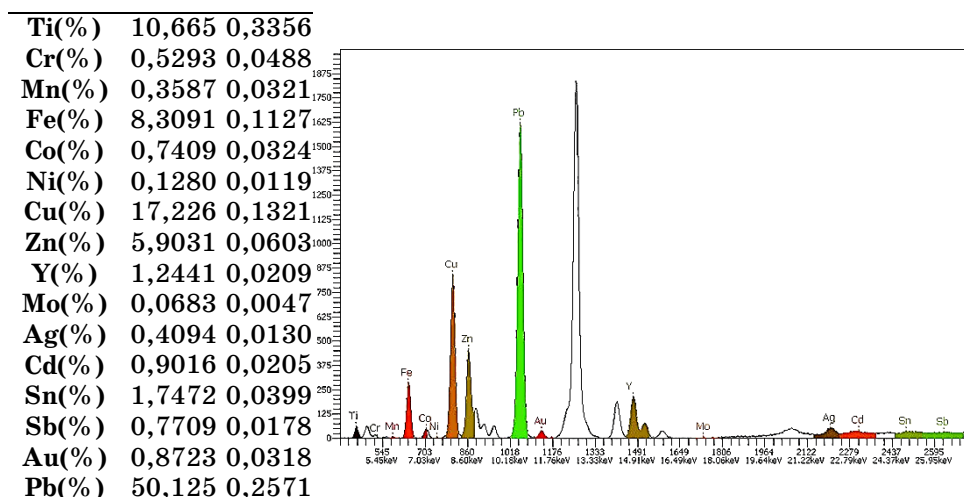
По-перше, розглядали вторинну сировину з діамантовою фракцією для модифікування. Розглянуто склад такої детонаційної шихти від утилізації певного набору боеприпасів, які перевищили термін зберігання та використання. Детальна аналіза її була необхідною, щоб визначити її використання. Оцінено її хемічний склад і можливість розподілу за властивостями. Раніше виконаними дослідженнями було оцінено ступінь впливу на структуроутворення використання такої вторинної сировини.

Розглянуто склад і можливість використання магнетної частини такої шихти, а також спосіб її одержання.

Встановлено, що магнетна складова вторинної сировини від утилізації боеприпасів відрізняється тим, що в її складі є підвищена кількість оксидних включень: FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які створюють захисне покриття на діамантовій фракції та не подрібнюють її за багатошарової детонації. Наявність значної доли Оксигену в цих сполуках, а також покриття цими компонентами діамантів буде підвищувати їхню експлуатаційну стійкість упродовж всього періоду використання зміцнювальних модифікуванням покриттів за натоплення.

Оптимальна частка такої модифікувальної домішки, яка вноситься в рідку ванну, залежить від напряму її використання. Таке модифікування за внесення домішки у 6% супроводжується додатковим внесенням з шихтою у рідку ванну компонентів [у %]: 0,7 Al, 2,56 O<sub>2</sub>, 0,46 C, 0,26 Cu, 0,45 Cl, 0,36 Ba, 0,21 Mg. Загальний склад такої шихти наведено на рис. 1.

Введення шихти з діамантовою фракцією, а також додатковими компонентами, сприяють модифікуванню рідкої ванни, що зменшує розмір зерен, підвищує мікротвердість. Так, за нанесення відновлювального покриття електродою ER321 на деталь з вуглецевої криці максимальна мікротвердість без модифікувальної домішки дорівнює H-50-338, а за його модифікування підвищу-

Рис. 1. Розподіл компонентів у зернах магнетної складової шихти.<sup>1</sup>

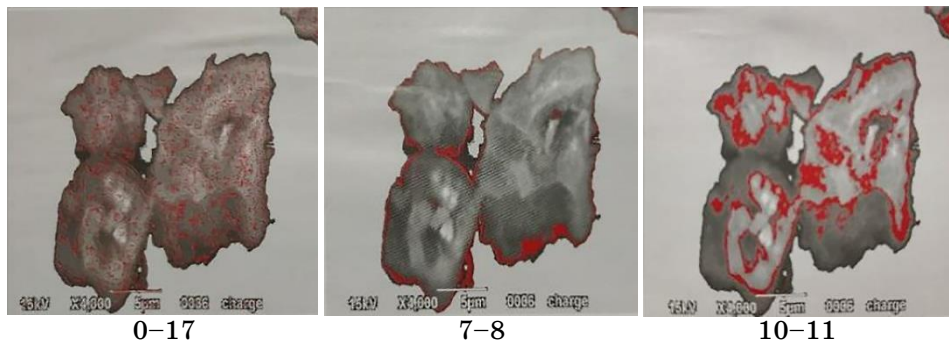
ється до Н-50-362 та стає більш однорідним.

Оцінено вплив модифікування на напружений стан, і для цього використовували неруйнівний метод контролю за коерцитивною силою. Аналізом одержаних результатів вимірів встановлено, що цей показник без модифікування змінюється в межах 25%; після нанесення покриття з домішкою не перевищує 4,4%. Це свідчить про відсутність істотних напружень, які можуть вносити зміни у експлуатаційні показники.

Виконано теоретичну оцінку зерен конгломерату шихти, що використовувалася для модифікування рідкого розчину нанесенням покриттів. Дослідження проведено статистично оптико-математичним методом опису структуроутворення зерен конгломерату [2]. Показано, що діамантова фракція частіше за все знаходиться у середині зерен, а покривають їх різні типи сполук. Перші наночастиці — відносно м'які з'єднання з компонентами різних з'єднань, що включають модифікувальні домішки, легкоотпкі компоненти та леткі (в цьому випадку діамантова фаза подрібнюється за детонації та виявляється зі збільшенням у  $\times 10000$ ). Другі дисперсні діаманти покриті оксидними включеннями, які мають достатньо високу твердість, і за циклічних вибухів детонації така діамантова фракція залишається незмінною за формою та розміром. Її форма округлена та вивчається лише після нагрівання та розчину оксидів Феруму, що її покривають.

На рисунку 2 показано нановключення діамантів у конгломераті зерен немагнетної частки шихти.

Теоретично оптико-математичним методом описано [3–8], що



**Рис. 2.** Розподіл подвійних груп фаз за кольором на діамантових зернах.<sup>2</sup>

за детонації з формуванням конгломератів кристалізуються різні фази та сполуки, які оцінювали згідно зі зміною кольорів. Встановлено, що в шихті частка одного кольору складає лише 11,26%, з'єднань двох — 80,9%, трьох — 6,19%, чотирьох не перевищує 1,65%, а більше — відповідає 0,81, 0,52, 0,23%. Теоретичну оцінку структуроутворення проводили з використанням Ляпльєсових операторів за розробленими раніше підходами, заснованими на гідродинамічних аналогах із використанням рівнянь Нав'є–Стокса, які враховували дивергенцію (густину фрагменту та дифузійні процеси). Це дало можливість виявити ступінь локальної неоднорідності структури покриттів на металографічних зображеннях.

Дифузюю оцінювали згідно з Ляпльєсіанами, які для кожної точки (пікселя) фрагменту мають вигляд:

$$\alpha_{x,j} = \frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 c}{\Delta j^2} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}. \quad (1)$$

Дивергенцією описували неоднорідність фаз через дисипацію енергії і зміни густини та розрідження, де  $V(x, y)$  характеризує інтенсивність структурних напружень I та II роду внаслідок дифузії:

$$D_{x,j} = \operatorname{div} c_{x,j} = \frac{dc_{x,j}}{dx} + \frac{dc_{x,j}}{dj} \approx D_{i,j} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} - 2c_{x,j}. \quad (2)$$

Оцінити конкретно частину кожного із цих з'єднань не є можливим у зв'язку з тим, що аналізували інтервали з'єднань зі змінним вмістом компонентів; тому на основі базових досліджень можливо припустити лише окремі з них. Одного кольору можуть бути діамантова фаза,  $\gamma$ -залізо, кристали цинку. Подвійні

з'єднання — це оксидні включення, що формуються за багаторазового методу детонації, а також такі, що утворюють солі. Інші з'єднання з трьома та більшим числом компонентів оцінити практично неможливо, та їхня частка не значна. В таблиці 1 наведено можливі з'єднання компонентів, яких досліджено мікрорентгеноспектральною аналізою, що відповідають літературним джерелам та експериментальним дослідженням.

Оптико-математичну аналізу виконували на основі розподілу фаз за 255 кольорами, які поділили на 16 інтервалів. Розрахунки виявили, що оцінювання подвійних з'єднань тільки по одному інтервалу виконати неможливо, тому що вони чітко не поділяються по одній фазі. Це пов'язане з тим, що вони дуже дисперсні; тому повторюються і в інтервалі іншого з'єднання. Тому розрахунки проводили одноразово по двох, близько розташованих інтервалах.

Показано, що максимальна частка подвійних з'єднань — це інтервали 10–14, і вони, виходячи з аналізу їхнього типу, належать оксидним.

Особливістю магнетної складової шихти є наявність у ній значної доли та більших за розміром включень дисперсної діамантової частки, насиченої на поверхні покриттями з твердих оксидних сполук.

Експериментальні дослідження та розробка новітніх технологічних процесів відновлення деталей проведено також на основі комплексних експериментальних оцінок з використанням оптичної й електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектральної аналізи, а також оцінки властивостей згідно з мікротвердістю та коеффіцієнтом сили, яку виконано порівняльною аналізою — без

**ТАБЛИЦЯ 1.** Фази, які можуть формуватися в зернах конгломерату детонаційної шихти.<sup>3</sup>

Компоненти шихти	Можливі фази або з'єднання
Fe	FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeC, Fe <sub>2</sub> C, Fe <sub>3</sub> C, FeP, Fe <sub>3</sub> P, FeS, Fe
Cu	CuCl, CuO, Cu
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , AlCl
Mg	MgO, MgCl <sub>2</sub>
Zn	ZnO, ZnH <sub>2</sub> (кристали)
Ba	BaCl, BaH <sub>2</sub> (солі); BaSO <sub>4</sub> та BaNO <sub>3</sub> , BaC <sub>2</sub> , BaPb, Ba <sub>2</sub> Pb (кристали)
Pb	PbO <sub>2</sub> , Pb <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , PbO <sub>3</sub> , PbO <sub>4</sub> , PbCl <sub>4</sub>
C	кисень, що покриває діаманти
Cl	всі можливі з'єднання, зазначені вище



модифікування і з модифікуванням.

Детально розглянуто три напрями ефективного використання магнетної частки детонаційної шихти для розробки новітніх технологій, спрямованих на підвищення якості й експлуатаційних властивостей покриттів. Встановлено, що за відновлення нагрівання деталей з дисперсно-зміцнених або засмічених неметалевими включеннями виробів основного металу вони спливають у покриття та частково розчиняються. Це створює локальні неоднорідні зони збагачення компонентами. До них входять ті, у яких температура топлення вище  $1600^{\circ}\text{C}$ , і вони спливають і виявляються по всьому перерізу покриття, що створює неоднорідну структуру, локальні напруження та понижуює експлуатаційну стійкість.

Для гальмування включень запропоновано новий метод і технологічний процес нанесення їх. В цьому випадку для використання рекомендовано додаткове модифікування рідкої ванни вторинною шихтою — детонаційною домішкою магнетної складової шихти, одержаної від утилізації певного набору боєприпасів з включеннями діамантової дисперсної фракції.

Оптимальна частка модифікувальної домішки складає 5–10%.

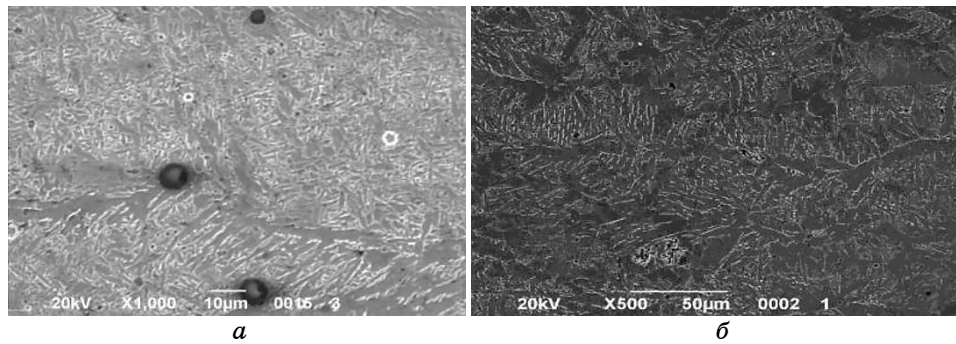
На рисунку 3 наведено сформовану структуру у перехідній зоні та локальний розподіл компонентів. Вони відповідають дисперсним фазам вихідного матеріалу (табл. 2).

За нагрівання з модифікуванням такою шихтою з її спеціальною підготовкою та шлікерним нанесенням шихти на деталь і наступним нагріванням повністю гальмується спливання включень, а також розчинення їх і забезпечується подрібнення зерна, понижуються розкид показників у 3,4 рази (анізотропія структури) за рахунок подрібнення їх (з 0,8 до 0,95). Рівень напружень понижуються на 25%.

Згідно з другим напрямом встановлено, що домішка для модифікування магнетної складової шихти уможливорює підвищити експлуатаційні показники деталей у спряженнях, які недоступні до введення мастил з вуглецевих і низьколегованих криць за рахунок подрібнення дисперсних діамантів із оксидними з'єднаннями ( $\text{CuO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Дисперсні включення діамантової фракції в процесі експлуатації подрібнюються та поступово надходять в осередок тертя, а ті, що залишилися, знаходяться у порожнинах. Це сприяє подовженню періоду дії вторинних захисних оксидних плівок. Така технологія забезпечується введенням домішки з обмазкою електроди в кількості у 5–10%.

Нова технологія нанесення відновлювальних покриттів забезпечує долю Оксигену в плівках до 0,32% і більше; розчинюється і сполука  $\text{CuO}$ . Таке модифікування шихтою підвищує мікротве-



**Рис. 3.** Структура перехідної зони: *a* — дисперсні алмазні вclusions у покритті; *б* — матрична структура в зоні термічного впливу та перехідної.<sup>4</sup>

**ТАБЛИЦЯ 2.** Локальний розподіл компонентів у зоні стоплення покриття з основним металом валу за модифікування магнетною часткою шихти.<sup>5</sup>

Елемент	Умовна концентрація	Корекція інтенсивности	Ваговий %	Атомний %
Si	0,02	0,62	0,18	0,36
S	0,04	0,8489	0,29	0,50
Cr	0,24	1,2613	1,20	1,28
Mn	0,21	0,9769	1,39	1,41
Fe	15,16	0,9968	96,94	96,45
Всього:			100	

рдість на 13,6% (більш ніж у 2 рази), зменшує розмір зерен з 50 до 15–20 мкм, що сприяє підвищенню зносостійкості.

Згідно з третім напрямом рекомендовано технологію модифікування, яка забезпечує найбільш однорідну твердість не тільки на межі зчеплення покриття–основа, а й по його перерізу. Дослідженнями показано можливість одноразового використання підготовки дефектної поверхні з незначними недосконалостями щодо подальшого використання із заліковуванням. Для цього рекомендовано використовувати шлікерне покриття, а потім проводити відновлення електродою з обмазкою магнетною складовою шихти. Сумарна частка модифікувальної домішки в цьому випадку має не перевищувати 12–18%. Частка домішки залежить і від долі та типу дефектів, що утворилися на поверхні тертя.

За оптимального співвідношення технологічних параметрів нанесення покриттів досягається достатньо однорідна структура з коефіцієнтом її анізотропії  $K = 0,93–1,05$ ; середній відхил показ-

ників не перевищує 5–7%. Такий метод відновлення формує хвилясту структуру зони стоплення, істотно зменшує зону термічного впливу з 1000 до 185 мкм.

Розглянуто розроблені технологічні процеси відновлення деталей, спрямовані на формування покриттів з більш однорідною структурою металу, зменшення напружень у перехідній зоні, підвищення мікротвердості.

Нові технологічні процеси відновлення деталей захищено 4 патентами України [9–12].

Виконані дослідження пройшли випробування в умовах виробництва. Спосіб зміцнення натопленням із додаванням магнетної складової детонаційної частки шихти у рідку ванну уможливорює коригувати необхідні споживчі властивості відновлених поверхонь виробів і підвищувати їхню зносостійкість до 25% за рахунок зменшення розміру зерен у 3 рази, пониження напружень в 1,2–1,4 рази та підвищення твердості на 15%. Це дає змогу подовжити термін експлуатації та запобігати передчасному руйнуванню деталей.

Дослідженнями виявлено кінетику зміни дисперсних діамантових включень за тертя, яка характерна для магнетної складової шихти. Вона полягає в послідовному подрібненні таких включень і поступовому надходженні їх разом з оксидною складовою в зону тертя (рис. 4).

Завдяки більшій загальній тривалості доступу Оксигену в зону тертя спряжень відновлюються вторинні захисні структури, які підвищують експлуатаційні властивості не тільки деталю з таким покриттям, але і спряженого (табл. 3). Частка Оксигену за більш тривалих досліджень зберігається на поверхні тертя за рахунок покриття плівками з Оксигеном і сполуками  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  діамантової фракції — до 0,9%.

Різні напрями нових технологічних процесів було детально розглянуто з використанням експериментальних і теоретичних досліджень, а потім, згідно з рекомендаціями, пройшли апробацію на підприємстві ДП «Завод імені В. О. Малишева» (табл. 3).

Оцінку економічної ефективності виконали для шліцьових карданних валів спеціальної техніки. Із виготовленням таких деталей тільки 100 шт./рік зменшуються витрати у експлуатації до 185,7 тис. грн.

#### 4. ВИСНОВКИ

Для підвищення якості й експлуатаційної стійкості виробів у роботі розглядаються методи та технологічні процеси модифікування рідкої ванни магнетною часткою детонаційної шихти від утилізації певного набору боєприпасів, які завершили період мо-

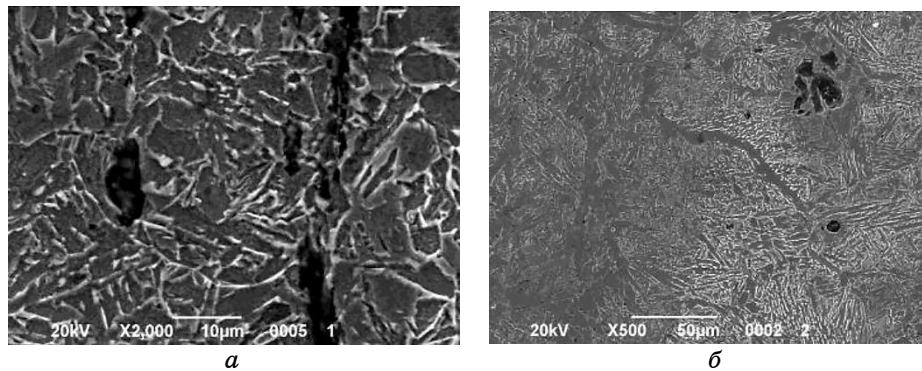


Рис. 4. Зміна дисперсної діамантової фракції через тертя в експлуатації: *a* — на початку експлуатації; *б* — в процесі роботи спряження.<sup>6</sup>

ТАБЛИЦЯ 3. Трибологічні властивості за різних технологій зміцнення покриттями.<sup>7</sup>

№	Спосіб нанесення покриття	Коефіцієнт зношення покриття	Коефіцієнт зношення деталю у спряженні
1	Покриття без модифікування	1,0	1,0
2	Покриття зі шлікерним нанесенням домішки	1,1	0,96
3	Покриття з модифікуванням (обмазка електроди)	0,75	0,63

жливого використання.

Розглянуто можливість використання магнетної частки детонаційної шихти з дисперсною діамантовою фракцією, яку оцінювали на основі комплексного підходу з використанням хемічного, спектрального, локального аналізів. Металографічні дослідження робили методами оптичної та електронної мікроскопії, а властивості вивчали згідно з мікротвердістю покриття та його напруженим станом. Для детального опису формованих фаз та їх взаємозв'язку використовували теоретичні дослідження оптико-математичним методом опису фазових змін скануванням фотографій мікроструктури із коміркою 3×3 пікселя, а всі фази відображали відповідно 16 інтервалам, з яких 0–9 відповідали феритним фазам з різним насиченням Карбоном, 10 — бейніту, 11–15 — карбідним фазам. За модифікування порівнювали зміни структуроутворення без застосування домішки та з ним.

Розглянуто технологію одержання детонаційної шихти та її склад для модифікування рідкої ванни за натоплення покриттів.

Раніше основна увага приділялася дослідженням використання немагнетної частки шихти, одержаної від утилізації певної номенклатури боеприпасів. В цих дослідженнях розглядається можливість використання магнетної частки шихти за багатошарової детонації для підвищення якості й експлуатаційних показників деталей. Склад одержаної шихти вивчали після магнетного оброблення та виділення дрібної фракції зерен конгломератів. Комплексними дослідженнями таких зерен встановлено, що магнетна складова вирізняється більшою часткою дисперсних діамантів, які покриті оксидними, недеформованими включеннями  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що захищають тверду фракцію від руйнування за багатошарової детонації та сприяють додатковій їхній щільності. Включення мають округлену форму, а гострі кути відсутні. В конгломератах шихти одноразово присутня і немагнетна складова. Виявлена ріжниця в складі магнетної шихти уможливує використовувати її і для рішення інших завдань, ніж для вирішення з модифікуванням немагнетної частки. Додатково така шихта включає компоненти:  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Al}$ .

Виконано теоретичну оцінку оптико-математичним методом зерен конгломерату шихти та показано, що всі діамантові включення покриті оксидними плівками різного складу та з'єднаннями. Встановлено, що частка однієї фази (або компонента), оцінена згідно з кольором та його зміною, складає 11,26%, з'єднань двох — 80,9%, трьох — 6,19%, чотирьох не перевищує 1,65%, а більше — відповідає 0,81, 0,52, 0,23%. Максимальна частка належить плівкам сполук компонентів з Оксигеном. Вони відповідають лише 5 інтервалам змін складу 16 розглянутих варіантів. Частка діамантової фракції в зернах конгломерату локально змінюється від 7,04 до 24,27%.

Розроблено нові технологічні процеси нанесення покриттів, які виконували в залежності від умов експлуатації деталей і завдання підвищення їхньої якості. До них відносять наступні процеси.

— Нанесення покриттів на деталі з дисперсно-зміцнених матеріалів або матеріалів, засмічених неметалевими включеннями, які за нагрівання потрапляють у покриття або розчинюються в локальній зоні, що призводить до формування неоднорідності їх та зменшення її життєвого циклу за експлуатації. Для вирішення цієї проблеми розробили параметри технологічного процесу, спосіб введення модифікувальної домішки, її частки. Використовували шлікерне покриття, яке перед нагріванням наносили на відновлювальну поверхню з часткою у 5–10% від долі металу електроди, що за рахунок діамантової фракції гальмувало появу включень у рідкій ванні. Істотно зменшувалися перехідна зона та напруження, які оцінювали згідно з параметром коерцитивної сили.

— Підвищення ефективного модифікування відновлювальних покриттів деталей, що працюють у спряженнях і значних навантаженнях. Рекомендовано використовувати магнетну частку шихти після її спеціальної підготовки та наносити на електроду. В процесі експлуатації дисперсні діаманти магнетної шихти подрібнюються та частково залишаються у порожнинах їхнього первинного розташування, а протягом значного часу частково надходять до зони тертя. Це забезпечує підвищення експлуатаційних властивостей за рахунок постійного відновлення вторинних захисних структур, товщина яких не перевищує 50 нм. Доля Оксигену у плівках змінюється від 0% до 0,32%, а Купруму — з 0% до 0,82%. У покритті зменшується розмір зерен структури металу з 40–60 до 15–20 мкм. Це забезпечується за модифікування часткою шихти у 8–10% від маси електроди.

— Використання комбінованого методу нанесення покриття, що передбачає одноразове заліковування дефектів на поверхні тертя за відновлення. В цьому випадку таку шихту наносили як шлікерний шар на поверхню деталей із вуглецевої криці для заліковування дефектів, що відновлювали. Потім шар, що компенсує знос, формували покриттям з модифікуванням обмазкою електродою. Сумарна частка модифікувальної домішки складала 15–18% від долі електроди. Така комплексна технологія відновлення забезпечувала найбільш однорідний розподіл діамантової фракції, а також модифікувальних домішок. Частка шихти в шлікерному покритті має не перевищувати 5–12%. Така технологія забезпечує формування міцної хвилястої зони стоплення з основним металом, зменшує розмір зони стоплення з основним металом, подрібнює дендритну структуру, зменшує розмір зони термічного впливу в 5,4 разів (не перевищує 185 мкм).

Промисловими випробуваннями на знос за розглянутих варіантів відновлення виробів різного призначення показано, що їхня якість після відновлення та зміцнення магнетною часткою шихти покриттів, підвищується на 20–37%. Показано, що за роботи у спряженні лише одного деталю зі зміцнювальним покриттям підвищує свій життєвий цикл і інший деталь у спряженні за рахунок створення вторинних захисних оксидних плівок в експлуатації. Результати досліджень підтверджують промислове використання. Підвищення експлуатаційної стійкості тільки карданних валів забезпечує економію у 187,5 тис. грн./рік за об'єму виробництва у 100 шт.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. T. S. Skoblo, S. P. Romaniuk, A. I. Sidashenko, L. V. Omelchenko, and A. K. Oleynik, *Problems of Tribology*, 3: 51 (2017) (in Russian).

2. T. Skoblo, A. Nanka, Yu. Kuskov, A. Saychuk, V. Romanchenko, S. Romaniuk, I. Rybalko, A. Markov, Yu. Samsonov, and T. Maltsev, *Nanomateriali, Nanotehnologii*, **19**, Iss. 1: 23 (2021); <https://doi.org/10.15407/nnn.19.01.023>
3. T. S. Skoblo, O. O. Honcharenko, A. V. Markov, V. V. Teliatnikov, and S. V. Tupichenko, *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, **6**: 57 (2016) (in Ukrainian).
4. T. S. Skoblo, L. V. Omelchenko, and S. P. Romaniuk, *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, **183**: 145 (2017) (in Russian).
5. A. A. Honcharenko, S. P. Romaniuk, A. S. Polyanskyi, L. V. Omelchenko, and V. V. Kolomiets, *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, **10**: 20 (2017) (in Russian).
6. A. V. Nanka, L. V. Omelchenko, and A. V. Markov, *Agricultural Technology and Energy Supply*, **1**, 18: 16 (2018) (in Russian).
7. L. V. Omelchenko, *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, **11**: 301 (2018).
8. T. S. Skoblo, A. I. Sidashenko, S. P. Romaniuk, A. A. Honcharenko, L. V. Omelchenko, and V. A. Bantkovskiy, *Materials Science*, **55**: 884 (2020); <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00383-4>
9. T. S. Skoblo, O. I. Sidashenko, S. P. Romaniuk, L. V. Omelchenko, I. M. Rybalko, O. O. Honcharenko, and V. M. Zaets, *Sposib Pidvyshchennya Vlastyivostey Pokryttiv Modyfikuvannyam Pry Naplavlenni* [The Method of Improving the Properties of Coatings by Modification During Surfacing] (Patent No. 117615 of Ukraine, B22D 19/08, B22D 19/10 (Korysna Model', No. 12) (2017)) (in Ukrainian).
10. T. S. Skoblo, O. I. Sidashenko, O. I. Trishevskiy, S. P. Romaniuk, L. V. Omelchenko, V. M. Vlasovets, and O. D. Martynenko, *Kombinovany Sposib Modyfikuvannya Dlya Pidvyshchennya Yakosti Vidnovlennya Vyrobit* [A Combined Method of Modification to Improve the Quality of Restoration of Products] (Patent No. 121869 of Ukraine, B23K 26/342, C04B 41/87 (Korysna Model', No. 24) (2017)) (in Ukrainian).
11. T. S. Skoblo, O. V. Nanka, O. I. Sidashenko, L. V. Omelchenko, S. P. Romaniuk, O. O. Honcharenko, E. A. Satanovskiy, O. K. Oliynyk, and O. V. Markov, *Sposib Vidnovlennya Detalei Dyspersno-Zmitsnennykh Abo Iz Znachnym Skupchennyam Nemetalevykh Vklyuchen Stalei* [The Method of Restoration of Parts of Dispersion-Strengthened Steels or With a Significant Accumulation of Non-Metallic Inclusions] (Patent No. 128982 of Ukraine, B29C 41/16, C23C 8/00, B23P 6/04, B22D 19/10 (Korysna Model', No. 19) (2018)) (in Ukrainian).
12. T. S. Skoblo, O. I. Sidashenko, S. P. Romaniuk, L. V. Omelchenko, O. O. Honcharenko, and O. D. Martynenko, *Sposib Pidvyshchennya Ehkspluatatsiynoi Stiykosti Spryazhen' Pry Vidnovlenni Detaley* [A Method to Increase the Operational Stability of the Mates During the Restoration of Parts] (Patent No. 137676 of Ukraine, B23P 6/04, B23K 9/00, B23K 35/22, C23C 8/00 (Korysna Model', No. 21) (2019)) (in Ukrainian).

---

<sup>1</sup>State Biotechnological University,  
44, Alchevskykh Str.,  
UA-61002 Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>*National Guard Military Academy of Ukraine,  
3, Zakhysnykiv Ukrainy Sq.,  
UA-61001 Kharkiv, Ukraine*

<sup>1</sup> **Fig. 1.** Distribution of components in the grains of the magnetic component of the charge.

<sup>2</sup> **Fig. 2.** Distribution of double groups of phases by colour on diamond grains.

<sup>3</sup> **TABLE 1.** Phases that can form in conglomerate grains of the detonation charge.

<sup>4</sup> **Fig. 3.** Structure of the transition zone: *a*—dispersed diamond inclusions in the coating; *б*—matrix structure in the zone of thermal influence and transition.

<sup>5</sup> **TABLE 2.** Local distribution of components in the fusion zone of the coating with the base metal of the shaft when modified with a magnetic particle of the charge.

<sup>6</sup> **Fig. 4.** Change in the dispersed diamond fraction during friction during operation: *a*—at the beginning of operation; *б*—during the process of conjugation.

<sup>7</sup> **TABLE 3.** Tribological properties of various coating strengthening technologies.