

ШИФР «ЛАМЕЛЬ»

НАУКОВА РОБОТА

**«ВПЛИВ СТРУКТУРНОЇ МІКРОГЕТЕРОГЕННОСТІ
ПОРОШКОВОГО ДРОТУ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ
ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ»**

2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 ЕЛЕКТРОМЕТАЛІЗАЦІЙНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ І ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ.....	4
1.1 Процеси, які змінюють технічний стан машин.....	4
1.1.1 Технологічні методи відновлення зношених деталей.....	8
1.2 Електродугове напилення.....	9
1.3 Матеріали для електродугової металізації	10
1.4 Суцільні дроти для електродугових покриттів.....	11
1.5 Композитні та порошкові дроти для електродугової металізації....	13
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
2.1 Об'єкт дослідження.....	18
2.2 Методика випробувань покриттів на абразивну зносостійкість	20
2.3 Електронна мікроскопія.....	21
2.3.1 Дослідження покриттів на електронному мікроскопі.....	22
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОГЕТЕРОГЕННОСТІ ТА АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОКРИТТІВ.....	23
3.1 Мікрогетерогенність порошкових дротів.....	23
3.1.1 Використані матеріали.....	23
3.2 Вплив структурної мікрогетерогенності на зношування.....	25
3.3 Вплив діаметра порошкового дроту на гетерогенність покриттів...28	
ВИСНОВКИ.....	30
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	31

ВСТУП

Численні деталі елементів техніки та споруд відновлюють методами газотермічного нанесення покриттів [1]. З поміж цих методів електродугове напилення покриттів із використанням спеціальних порошкових дротів технологічно найпростіше, не потребує дороговартісного обладнання. Покриття виявляють високі експлуатаційні характеристики, щонайменше в 3...5 раз дешевші від покриттів аналогічного хімічного складу, нанесених іншими газотермічними методами (плазмове, газополуменеве тощо) [1], [2].

В останні роки в Україні одержано важливі наукові результати з розроблення композиційних електродугових покриттів із використанням порошкових дротів у сталевій оболонці для відновлення та зміцнення різноманітних деталей і конструкцій. Зокрема в Україні, у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів) та Інституті електрозварювання ім. О.Є. Патона НАН України розроблено спеціальні порошкові дроти, які дозволяють розширити область застосування електродугової металізації [3].

Використання для електродугового напилення електродних матеріалів у вигляді спеціальних порошкових дротів уможливило розширення сфери застосування методу та одержання відновних і захисних покриттів різного функціонального призначення з високими експлуатаційними характеристиками. Проте електродуговим покриттям характерна висока поруватість, високий рівень залишкових напружень розтягу, низька когезія та адгезія (порівняно з іншими газотермічними покриттями) [1] – [8]. На відміну від дротів суцільного перерізу покриття з порошкових дротів мають високу мікрогетерогенність за хімічними елементами, яка суттєво впливає на зносостійкість покриттів.

Робота присвячена вивченню впливу складу порошкового дроту на мікрогетерогенність та абразивну зносостійкість електродугових покриттів.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОМЕТАЛІЗАЦІЙНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ І ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

1.1 Процеси, які змінюють технічний стан машин

Відновлення працездатності підйомно-транспортних, дорожніх будівельних, меліоративних машин і обладнання нерозривно зв'язане з розвитком технології машинобудування [1], [2]. Значний внесок у створення вчення про ремонт машин внесли вітчизняні вчені. Теоретичні дослідження в галузі підвищення надійності та довговічності машини, вивчення процесів тертя й зношування проведені видатними вченими М.Н. Хрущовим, Й.В. Крагельським, Б.І. Костецьким, В.Д. Кузнецовим та ін. Винаходи та відкриття, на яких базується технологія ремонту машин, також належать вітчизняним вченим та інженерам – Н.Г. Славянову, Н.Н. Бенардосу, Б.С. Якобі, Є.О. Патону, В.П. Вологдіну, Б.Р. Лазаренку, В.Н. Гусеву та ін.

Під час ремонту машин необхідно забезпечити високу якість продукції, що випускається (надійність, довговічність, працездатність) за мінімальної собівартості. Ремонт машин базується на передових досягненнях вітчизняної та закордонної науки, виробничої практики. У зв'язку з підвищенням якості ремонту, ресурсу відремонтованої техніки й ефективності ремонтного виробництва визначилися головні напрямки розвитку ремонту машин [1].

1 *Покращення експлуатаційних властивостей* відремонтованої техніки (надійності, довговічності, безвідмовності у роботі тощо) досягається застосуванням технологічних методів (наплавлення порошковим дротом, наплавлення з комбінованим захистом розплавленого металу або з

подальшою електро– та термомеханічною обробкою, електролітичне нарощування металами та сплавами, електрофізичні методи нарощування та зміцнення тощо), що підвищують їхню зносостійкість й інші характеристики [2], [3].

Важливу роль при цьому відіграють підготовчі процеси ремонтного виробництва (очищення, мийка та знежирення деталей і вузлів). Якісне виконання цих операцій підвищує експлуатаційні властивості відновлених деталей. Наприклад, покращує адгезію металізованих, гальванічних покриттів і наплавленого металу з деталлю. Підвищенню надійності та довговічності машин сприяють точні складання з'єднань, вузлів і агрегатів, а також якість обкатування та випробування окремих агрегатів і машин в цілому.

2 *Впровадження у виробництво прогресивних методів* відновлення зношених деталей. Це дозволяє підвищити продуктивність технологічних процесів відновлення, якість відновлених деталей, ефективність виробництва тощо.

3. *Автоматизація і комплексна механізація* сучасних технологічних процесів ремонту машин: застосування автоматичних і потокових механізованих ліній, ділянок відновлення деталей і складання деталей (вузлів, машин); автоматичне керування операціями і технологічними процесами (наприклад, регулювання режимів гальванопокриттів, наплавлення тощо); механізація трудомістких ручних процесів, особливо при мийці, очищенні, розбиранні та складанні агрегатів і машин.

4 *Організація централізованого* відновлення деталей (спеціалізація), що уможливорює застосування найраціональніших методів ремонту.

5 Удосконалення технологічної підготовки виробництва (застосування ЕОМ при розробленні технологічних процесів ремонту машин; використання теплових технологічних процесів тощо).

Застосування прогресивної технології й організації ремонту машин дозволяє значно знизити витрати на одиницю продукції, підвищити якість відремонтованої техніки [1] – [3].

Розглянемо найбільш характерні види зношування типових деталей сільськогосподарських машин [1], [2]. За відсутності відносного переміщення поверхонь, що взаємодіють, деталі, як правило, підлягають пластичній деформації (зминання). Зминання виникає в шпонкових, зубчастих з'єднаннях, в упорах та штифтах, осях ланцюгових передач, різьбових з'єднаннях та в інших деталях машин.

Знос деталей *циліндро-поршневої групи* двигунів (циліндр, поршень, кільця), які працюють за високих навантажень, швидкостей і температур, граничного мащення при наявності абразивних і корозійно-активних речовин (часток бруду, продуктів руйнування оксидної плівки) обумовлений абразивним, корозійно-механічним, ерозійним і молекулярно-механічним зношуванням. Знос стінок циліндра – результат механічного (абразивного) та корозійно-механічного зношування. Еліпсоїдний характер зносу циліндра пояснюється дією бокової сили тиску газів. Знос поршневих кілець виникає під дією корозійно-механічного, абразивного та молекулярного зношування.

Деталі *кривошипно-шатунного механізму* (колінчастий вал, підшипники) піддаються абразивному та ерозійному зношуванню (переважно абразивному). Клапани також працюють за умов високих температур і корозійно-активного середовища. Їхні робочі поверхні підлягають утомному, корозійно-механічному, ерозійному та газоерозійному зношуванню. В деталях *зубчастих зчеплень* переважає механічне та втомне зношування (піттинг). Знос *валів* (шийки) має абразивний характер. Шліцева частина валів піддається крихкому руйнуванню (викришуванню) або пластичному деформуванню поверхні. Швидкість зношування складає від 0,8 мм до 0,15 мм за 1000 год.

Деталі *фрикційних муфт* та *гальм* відносять до таких, що швидко зношуються з причини абразивного зношування. Деталі *гусеничного ходу*

(ведучі та напрямні колеса, опорні та підтримуючі котки, гусеничні ланки, пальці в спряженні з провушиною, ланки тощо) підлягають інтенсивному абразивному зношуванню та пластичному деформуванню. Деталі *робочих органів* машини (зуби та передні стінки екскаваторних ковшів, ножі та відвали бульдозерів) піддаються, в основному, інтенсивному абразивному зношуванню (швидкість зношування до 0,13...1,27 мм/год).

У результаті зношення деталей змінюються наступні технічні характеристики машини: потужність; тягове зусилля; обертальний момент; втрата експлуатаційних матеріалів і використання енергії; експлуатаційна надійність, безпека роботи; продуктивність машини. До факторів, які зумовлюють зношування деталей машин, належать [1]:

- 1) характер взаємодії між третювими деталями;
- 2) матеріал та якість поверхні тертя деталей;
- 3) проміжне середовище між поверхнями тертя;
- 4) оточуюче середовище, в якому проходить зношування.

Розглянемо кожен із цих факторів та їх вплив на зношування. *Характер взаємодії між деталями* тертя залежить від конструкції, призначення, режиму роботи деталей, від тиску, швидкості ковзання, виду тертя, періодичності дії та ступеня динамічності, навантаження, температури поверхонь тертя, величин зазору в спряженні тощо. *Швидкість зношування* буде залежати від хімічного складу та структури матеріалу. Чим більше вуглецю в сталі, тим більша твердість і зносостійкість. *Проміжне робоче середовище* – продукти зносу, мастило, плівки кисневого та некисневого походження, сильно впливають на процес зношення. За допомогою *робочого середовища* можливо керувати процесом зношування, використовуючи для цього активні робочі середовища. Активні робочі середовища – присадки до мастильних матеріалів. Фізичні та хімічно-активні присадки взаємодіють із поверхневими шарами, модифікують метал, змінюють структуру та якість поверхневих шарів, що зумовлює ефект пластифікації, який суттєво знижує силу тертя поверхонь. Такі присадки дістали назву *поверхнево-активних*

речовин (ПАР). Одночасна взаємодія ПАР із поверхнею може приводити до значного зниження міцності матеріалу та виникнення крихкого руйнування за малої інтенсивності навантаження. Негативний вплив позначається й на розклинювальній дії мастила в мікротріщинах.

Навколишнє середовище також значно впливає на зношування. Низькі температури термічно впливають на матеріали деталей машин (наприклад гума втрачає еластичність), що збільшує інтенсивність зношування деталей та їх руйнування. Запиленість атмосфери, підвищена вологість, коливання температур та інші експлуатаційні фактори також негативно впливають на формування відмов як деталей, так і машин у цілому.

1.1.1 Технологічні методи відновлення зношених деталей [1], [2]. Відновити зношену деталь – це встановити початкові геометричні, фізико-хімічні та інші її характеристики, тобто усунути експлуатаційні дефекти, відновити розміри, геометричну форму, структуру та фізико-хімічні характеристики відповідно до технічних умов. Працездатність і ресурс відновлених деталей складає в середньому 60...80 % цих показників для нових. Сучасні методи відновлення (електромеханічні, електрофізичні тощо) дозволяють повністю відновлювати початковий ресурс деталей або навіть збільшувати його. Відновлення деталей допомагає зекономити значну чисельність дефіцитних матеріалів, збільшити термін служби в два – три рази, зменшити випуск запасних частин і знизити собівартість ремонту машини. Для відновлення деталей користуються наступними технологічними методами.

1. *Механічна та слюсарно-механічна обробка* (метод ремонтних розмірів, додаткових ремонтних деталей, припилювання, шабрування, склеювання, встановлення заплат, шліфування, стругання, притирання (наприклад клапанів) тощо).

2. *Зварювання та наплавлення* (газове, електродугове, автоматичне наплавлення під шаром флюсу, вібродугове в середовищі захисних газів тощо).

3. *Електричні та хімічні покриття* (нарощування) – залізнення або тверде остальювання, хромування, міднення, цинкування, осадження електролітичних сплавів, хімічне нікелювання тощо.

4. *Пластичне деформування* – осадка, роздача, обжимання, правка тощо.

5. *Металізація* – газополуменева, високочастотна, електродугова, плазмова.

6. *Електричні методи* – електроіскрова або електроерозійна, електромеханічна, анодно-механічна обробка та зміцнення деталей.

7. Використання *полімерних матеріалів* при ремонті деталей і виправлення дефектів *паянням*.

1.2 Електродугове напилення

Електрометалізаційне, або, як його ще називають, електродугове напилення, є одним із способів нанесення металевих покриттів на металеві та неметалеві поверхні [2], [3]. Суть процесу в тому, що розплавлений електричною дугою рідкий метал струменем стисненого газу (найчастіше повітря) розпилюється на дрібні частинки, які з великою швидкістю в розплавленому або пластичному стані падають на відповідно підготовану поверхню, деформуються під час удару, приварюються або прилипають до поверхні, формуючи покриття.

Електродугове напилення застосовують давно, головне, для одержання цинкових і алюмінієвих антикорозійних покриттів, а також нанесення зносотривких та відновних покриттів. Напилюють покриття за допомогою електрометалізаторів, в яких відбуваються подача електродних дротів до місця горіння електричної дуги між їх торцями, плавлення матеріалу електричною дугою, диспергування металевого розплаву в сопловій частині

металізатора та видування на напилювану поверхню дрібних краплин розплавленого металу. Широкого розповсюдження *електродугова металізація* (ЕДМ) набула завдяки [2]:

- відносно високої продуктивності і меншим енергозатратам порівняно з іншими методами газотермічного напилення – газополуменевим, плазмовим, детонаційним;
- простоті та мобільності обладнання;
- можливості нанесення металевих покриттів на будь-який твердий матеріал (метал, дерево, кераміку, скло, бетон тощо);
- низькій температурі нагріву деталі на яку наносять покриття, що не викликає структурних змін металевих виробів та їх деформування;
- можливості одержання покриттів із широким спектром фізико-механічних властивостей (зносостійкі, антикорозійні, декоративні, фрикційні, антикавітаційні тощо).

Найчастіше електродугову металізацію застосовують для нанесення цинкових і алюмінієвих антикорозійних покриттів на елементи будівельних конструкцій, трубопроводи, резервуари, а також для відновлення різних деталей машин і механізмів, що працюють у парах тертя (шийки колінчастих валів автомобільних і тракторних двигунів, компресорів, pomp, поверхонь штоків, гладких валів, плунжерів, поверхонь гальмівних дисків і барабанів, робочих поверхонь поліграфічного обладнання тощо) [2] – [8].

1.3 Матеріали для електродугової металізації

Для електродугової металізації (ЕДМ), як електродні матеріали, використовують практично будь-які марки суцільних промислових дротів діаметром від 1,0 до 2,5мм (залежно від типу металізатора та його характеристик) [2], [3]. Дріт повинен бути без дефектів, іржі, забруднень, особливо

жирових. Метал має бути помірно пластичним. Жорсткий сталевий дріт потребує відпалу, який проводять у печах із обмеженим доступом повітря для запобігання утворення жаровини.

З 1990 р. в Україні випускають порошкові дроти (ПД) для одержання відновних зносотривких покриттів. Використовують також промислові марки мідних, бронзових, алюмінієвих, ніхромових і сталевих дротів. В окремих випадках – пари різнорідних металевих дротів для покриттів із спеціальними властивостями. Для підвищення адгезійних характеристик покриттів напилують підшари з вольфрамових або ніхромових дротів [3].

За кордоном виробляють спеціальні суцільні та порошкові електродні дроти. В США, починаючи з 70-х років, для відновлення зношених деталей машин використовують високовуглецеву хромисту сталь (“тефтонівську”), покриття з якої дисперсійно тверднуть з часом. Дротом із монель-металу відновлюють деталі, поверхня яких одночасно піддається зношуванню та корозії. Виробляють також бабітовий дріт для наплення підшипників, спеціальні дроти зі свинцевої та фосфористої бронз, спеціальні сорти нержавіючих сталей. Крім того, виготовляють дроти різного призначення, здебільш на основі нікелю з порошковими наповнювачами хрому, кобальту, вольфраму та інших елементів.

1.4 Суцільні дроти для електродугових покриттів

Суцільні дроти в ЕДМ застосовують для формування антикорозійних зносостійких покриттів, нанесення підшару, а також покриттів із високотемпературною корозійною тривкістю [2], [3].

Зносотривкі та відновні покриття. Для одержання зносотривких покриттів методом ЕДМ застосовують дроти мартенситної сталі з вмістом 13% Cr і 0,3...0,46 % C та високовуглецеві зі сталей У8, У12, 65Г2А, 70С3ХА,

ШХ15, Р18 тощо [2]. В структурі покриттів із високовуглецевих дротів одержаних електродуговим розпиленням містяться zdeформовані частинки з вихідним розміром 200...250 мкм, які розмежовані прошарками оксидів товщиною $\sim 0,5$ мкм, а також із видовженими порами завбільшки 50...150 мкм. Дрібніші пори (1...5 мкм) спостережено по всьому об'ємі покриття. Верхній його шар має щільнішу структуру з поруватістю 8...10 %, а поруватість шару, прилеглого до поверхні напилення – 12...16 % [3]. Структура розплющених частинок покриття дрібнокристалічна, що зумовлено високою швидкістю охолодження 10^{-4} ... 10^{-5} К/с [2].

Як правило, перед нанесенням покриттів із високовуглецевих дротів на поверхню деталей напилюють підшар із ніхрому Х20Н80 або молібдену [2], [3]. Мікротвердість таких покриттів не перевищує 4500 МПа і максимальна на віддалі 180...200 мкм від поверхні напилення. Міцність їх зчеплення з поверхнею напилення висока – 35...40 МПа. Матеріал основи, на яку наносять покриття (Ст3, гільзовий чавун тощо), практично не впливає на міцність зчеплення.

Залишкові напруження розтягу у покритті зростають із збільшенням його товщини. Рівень напружень у різних покриттях підвищується так: високовуглецева, високовуглецева хромиста, низьковуглецева та аустенітна сталі [4], [5].

Товщина покриттів суттєво впливає на міцність їх зчеплення з поверхнею напилення. До товщини 0,3 мм міцність зчеплення покриттів майже незмінна, а за більшої стрімко знижується і вже за товщини 0,75 мм становить всього 20 МПа. Випробування на абразивну зносотривкість показали, що зносотривкість покриттів із високовуглецевих сталей практично незмінна і рівна еталону з чавуну марки СЧ-18-36. Лише зносотривкість покриття, отриманого з дроту зі сталі ШХ15, на 50 % вища [2], [5].

Міцність зчеплення покриттів із поверхнею напилення залежить від виду обробки поверхні [6] та коливається в межах 14...21 МПа. Міцність покриттів під час розтягу залежить від хімічного складу дроту, яким напилюють [4] –

[6], і для вуглецевих (0,1...1,1% С), марганцевої, хромистої (13 % Cr) сталей становить 130...188 МПа, а для молібдену – лише 38 МПа.

Мікротвердість електродугових покриттів із суцільних високовуглецевих легованих дротів не перевищує 4500 МПа навіть під час розпилення дротів із сталей ШХ15 та Р18. Це зумовлено інтенсивним вигорянням вуглецю і хрому під час польоту розплавлених частинок у повітряному середовищі. Щоб компенсувати вигоряння легувальних елементів, слід збільшувати їх вміст у дроті. Тому такі покриття не дають бажаного ефекту.

Необхідно створювати покриття з мікротвердістю в межах 6000...9000 МПа, яку можна забезпечити лише порошковим дротом із спеціально підбраною шихтою на основі карбідів і боридів.

1.5 Композитні та порошкові дроти для електродугової металізації

Для усунення недоліків, притаманних електродуговій металізації (ЕДМ) суцільними дротами, у 80-х роках розпочали використовувати *композитні та порошкові дроти*. Спочатку це був дріт скручений із трьох різнорідних матеріалів. Далі його формували, пропускаючи декілька скручених металевих волокон переважно з нержавіючої сталі або нікелю через ванну, заповнену алюмінієм [2], [3]. Такий композит діаметром 1,6...3,5 мм формували у кристалізаторі. З нього отримували достатньо однорідні покриття з декількома фазами, причому переважали фази з мікротвердістю 4200...5720 МПа (в основному, фаза Al_3Ni).

Для ЕДМ використовують також композитний дріт Алюнік 7/2 діаметром 3,2 мм, який розроблено для газополуменевого напилення. Він має декілька скручених нікелевих волокон та алюмінієву оболонку. Спроби напиляти Алюнік 7/2, використовуючи ЕДМ, двома композитними дротами були невдалі, оскільки не вдалося досягти стабільного горіння дуги й

уникнути відриву від електродів грубих фракцій металевого розплаву. Після заміни одного з електродів із композитного дроту Алюнік 7/2 (анода) на суцільний дріт із сталі 65Г стабілізували ЕДМ та отримали якісне покриття. Такі покриття використовують як підшар без попередньої дробоструминної обробки перед нанесенням покриття зі сталі 65Г [3].

У роботі [10] рекомендовано у сердечник із алюмінію додавати оцтовокислий кадмій, для підвищення адгезії покриттів. Відома спроба створення композитного двошарового дроту, верхню оболонку якого виготовляли з міді, а всередину вставляли дріт із сталі SUS-316 [2].

Основним недоліком композитних дротів є висока вартість їх виготовлення і неповний перебіг екзотермічних реакцій між компонентами під час напилення. Тому вони не знайшли широкого застосування в електродуговій металізації.

Вперше у 1984 р. використано для ЕДМ порошковий дріт ПАНЧ-11, який розроблено для зварювання металу [11]. Його застосували для реставрації посадкових місць під підшипники. Розпочинаючи з 1988 р. над створенням нових порошкових дротів для ЕДМ працюють в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та Маріупольському металургійному інституті, а також за кордоном, зокрема у США ("Mogul"). Запропоновано використовувати для отримання зносотривких покриттів порошковий дріт ПП125. Показано переваги напилення порошкових дротів (12MnSiTi8, 50MnCrTi4) під час ЕДМ [2].

Для одержання зносотривких покриттів рекомендують також композиційний порошковий дріт із Fe, Co або Ni оболонкою, заповненою порошками бору або карбиду бору [2]. Розмір боровмісних частинок малий і бор достатньо рівномірно розчиняється у покритті. Найкращим варіантом автори вважають порошковий дріт із оболонкою зі сталі, заповненою карбідом бору та феромолібденом.

У 1989 р. у Лондоні відбулася 12 Міжнародна конференція з газотермічного напилення, на якій було визнано, що застосування

порошкових дротів є новим кроком у розвитку газотермічних методів нанесення покриттів [3]. Для шихти порошкових дротів запропоновано використовувати високовуглецевий ферохром ФХ-800 із додатком порошоків графіту, алюмінію та гематиту (Fe_2O_3). Під час напилення таким дротом відбуваються екзотермічні реакції. З'ясовано, що при використанні для порошкового дроту шихти на основі ферохрому ФХ-850 і ферохрому з додаванням алюмінію [12] під час металізації суттєво зростає вміст кисню в продуктах розпилення та в самому покритті, а вміст Карбону в покритті нижчий, аніж у порошковому дроті. У структурі покриття зафіксовано карбідну фазу з мікротвердістю 10000...13000 МПа. Міцність зчеплення покриттів із поверхнею напилення не перевищує 21 МПа.

У роботі [9] запропоновано, розроблений у ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України, порошковий дріт Амотек-101. Для формування його оболонки використано прутки із сталі 09Г2. Як шихту рекомендовано механічну суміш порошоків заліза і карбіду бору за масового співвідношення компонентів 3:1. Результати випробувань на зношування закріпленими абразивними частинками підтвердили високу зносотривкість електродугових покриттів із порошкового дроту системи Fe – В, яка в 1,8–1,9 рази вища, ніж сталі 45 (HRC 46...52), і у 3,6 рази, ніж газополумєневих покриттів із аналогічних порошоків. Високу зносотривкість мають покриття з порошкових дротів системи Fe–Cr–В₄C і за умов граничного тертя.

У табл. 1.1 подано деякі широко розповсюджені у промисловості типи порошкових дротів [3]. Узагальнення результатів досліджень покриттів із порошкових дротів [2], [3] дозволило запропонувати для промислового освоєння декілька марок порошкових дротів, які застосовують у різних галузях промисловості. Конструкція порошкового дроту – це оболонка зі стрічки сталі 08кп товщиною 0,4 мм, заповнена порошковою шихтою легувальних елементів. Діаметр порошкових дротів 1,6...2,2 мм допускає застосовувати помірковані режими напилення (150 А, 24 В).

Таблиця 1.1 – Широко розповсюджені у промисловості типи порошкових дротів для електродугової металізації [3]

Тип ПД	Властивості покриттів
FeCrMnSi	Високозносоустійке покриття за атмосферних умов
FeCrBSi	Зносостійке покриття, хороша загальна корозійна тривкість, висока сила зчеплення
FeCrBSi + + WC–Co–Cr	Висока зносо– та корозійна тривкість, висока сила зчеплення
FeCrSi	Висока зносо– та високотемпературна корозійна тривкість до 900°C, висока сила зчеплення
Ni50Cr50	Високотемпературна корозійна тривкість до 900°C
NiBSi + WC	Висока абразивна зносотривкість, хороша корозійна тривкість
NiCrBSi	Висока корозійна тривкість, хороша зносотривкість

Спеціальні порошкові дроти розширюють межі застосування ЕДМ – найдешевшого та найпростішого методу одержання газотермічних покриттів, який за продуктивністю переважає інші методи та уможливорює формування покриттів, що за зносотривкістю наближаються до оплавлених із порошків ПГ-10Н-01. Проте покриття з порошкових дротів мають суттєвий недолік. За товщини, що перевищує 0,5 мм, у них виникають тріщини, які можуть руйнувати покриття. Відсутність комплексних досліджень про вплив хімічного складу шихти порошкових дротів та технологічних параметрів формування покриттів на фізико-механічні характеристики стримують впровадження цих дротів у промисловість.

На відміну від суцільних дротів, під час плавлення та диспергування розплаву порошкових дротів формуються краплини різного хімічного та структурного складу. Це свідчить про неповне сплавлення компонентів шихти та оболонки і, як наслідок, формується гетерогенне покриття [3]. Одним із найкращих варіантів вважають порошкові дроти зі сталлюю оболонкою та серцевиною, заповненою порошками карбиду бору та феромолібдену.

В роботі [4] запропоновано порошкові дроти діаметром 1,6 мм з товщиною оболонки 0,2 мм. Серцевина дроту заповнена шихтою зі суміші порошків (WC + Co) і розміром частинок, меншим ніж 300 мкм, а також порошками FeB, NiB з розмірами частинок ≤ 150 мкм. Покриття з таких порошкових дротів мають твердість 400 HV для шихти Fe – Co – Cr і 500 HV для шихти Ni – Cr – B. Однак найбільше застосовують порошкові дроти з шихтою на основі феросплавів – ферохромбору ФХБ-1 і ФХБ-2 та високовуглецевого ферохрому ФХ-800 [3], [6], [13], [14]. Вибір таких компонентів обумовлений їхньою високою твердістю, дешевизною і дає підстави припускати високу зносостійкість покриттів.

Аналізуючи відомі результати можна зробити висновок, що використовуючи для електродугової металізації порошкові дроти, можна суттєво продовжити ресурс деталей машин. Проте через обмежену кількість даних про умови плавлення та диспергування розплаву порошкового дроту під час формування покриттів, про вплив компонентного складу шихти на фізико-механічні характеристики покриттів, а також відсутність спеціальних металізаторів [3] стримується широке застосування порошкових дротів у промисловості.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Виготовлення порошкових дротів для одержання покриттів, нанесення цих покриттів на металеві поверхні, дослідження їх структури та фізико-механічних характеристик здійснено колективом авторів [3], [4], [6] – [8] у лабораторії з відповідним обладнанням: сканувальним електронним мікроскопом EVO-40XVP-VP, оптичним мікроскопом МЕТАМ-РВ-21, установками для дослідження на зносостійкість.

2.1 Об'єкт дослідження

Електродугові покриття наносили електрометалізатором типу ГТ-1 розпиленням порошкового дроту діаметром 1,8 мм [3], [4]. За шихтові матеріали використовували феросплави та чисті метали (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Матеріали для виготовлення порошкових дротів

Матеріал	Марка	ГОСТ
Ферохром високо вуглецевий	ФХ-800	4757-85
Феротитан	ФТИ-40А	4761-80
Графіт тигельний (зольність 7)	ГТ-1	4596-75
Порошок алюмінію	ПА-40	
Хром металевий	Х99А	5905-79

Оболонку дроту виготовляли зі стрічки товщиною 0,4 мм і шириною 10 мм із сталі 08кп. Коефіцієнт заповнення порошкового дроту шихтою становив 22...23 %. Режими нанесення покриттів: струм 100...300 А; напруга горіння дуги 32...38 В. Розпилювали ПД струменем повітря під тиском 0,3...0,65 МПа з дистанції 50...150 мм.

Режими формування електродугових покриттів. Електродугові покриття формували як із суцільних електродних дротів, так і з порошкового дроту за допомогою електродугового металізатора з модифікованою системою розпилення електродних дротів [13], яка дозволяє отримувати дрібнодисперсні покриття.

Для живлення металізатора постійним струмом використовували випрямляч зварювальний типу ВДУ – 505. Для очищення стисненого повітря від води та мінерального мастила застосовано фільтр-вологівідділювач 23 – 25 – 4 – 4ХЛ4.

Процес формування електродугових покриттів складається з наступних операцій [3]:

- дробоструминної обробки;
- знежирення;
- електродугової металізації;
- контролю якості;
- шліфування.

Режими дробоструминної обробки:

- тиск стисненого повітря, МПа 0,5 ... 0,6;
- дистанція між соплом та очищуваною поверхнею, мм 80 ... 120.

Режими електродугової металізації:

- сила струму, А 150;
- напруга на дузі, В 32;
- дистанція напилення, мм 100...110;
- тиск стисненого повітря, МПа 0,5 – 0,6.

Товщина покриття за один прохід становила 100 мкм.

2.2 Методика випробувань покриттів на абразивну зносостійкість

Випробування покриттів на абразивну зносостійкість проводили методом пришвидшених випробувань на зношування жорстко закріпленим абразивом та нежорстко закріпленими абразивними частинками [14].

Зношування закріпленим абразивом здійснювали абразивним корундовим кругом $d = 150$ мм, з частотою обертання $2,7 \text{ с}^{-1}$ за навантаження $P_1 = 3,83 \pm 0,25$ Н, $P_2 = 9,6 \pm 0,25$ Н та $P_4 = 44,1 \pm 0,25$ Н.

В другому випадку зношування проходило при терті напилених зразків у резиновий диск, який обертався з частотою $2,1 \text{ с}^{-1}$ за навантаження $P_3 = 44,1 \pm 0,25$ Н. В зону тертя подавали абразив (кварцовий пісок), основна фракція якого $0,1 \dots 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Особливістю зношування матеріалів закріпленим абразивом є те, що воно проходить за рахунок ковзання абразиву відносно покриття. При цьому на покриття діють частинки, які зв'язані між собою (корундовий круг). Відокремлення частинок зношування здійснюється в результаті багаточисельного впливу абразиву. При цьому поєднуються мікрорізання в'язкого, крихкого характеру та пластичне деформування, а інтенсивність зношування збільшується зі зростанням частки мікрорізання.

На інтенсивність зношування матеріалів об нежорстко закріплені абразивні частинки впливають ті ж фактори, що й при зношуванні зафіксованим абразивом. Однак переважають не процеси різання, а пластичне відтиснення [14], [15]. За умов зношування об нежорстко закріплені абразивні частинки (P_3), абразивне зношування менш інтенсивне.

Суттєво впливає на зносостійкість форма абразивних часток. Так при переході від корундового абразиву, який має осколкову форму, до кварцового у формі сфери, зносостійкість змінюється в 10 раз при зношуванні сталі 3, а досліджених нами покриттів – у 2...3 рази. Дані, отримані за різних видів абразивного зношування, зіставляювані.

2.3 Електронна мікроскопія

Електронномікроскопічні дослідження проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа марки ZEISS EVO 40XVP із системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy (рис. 2.1).

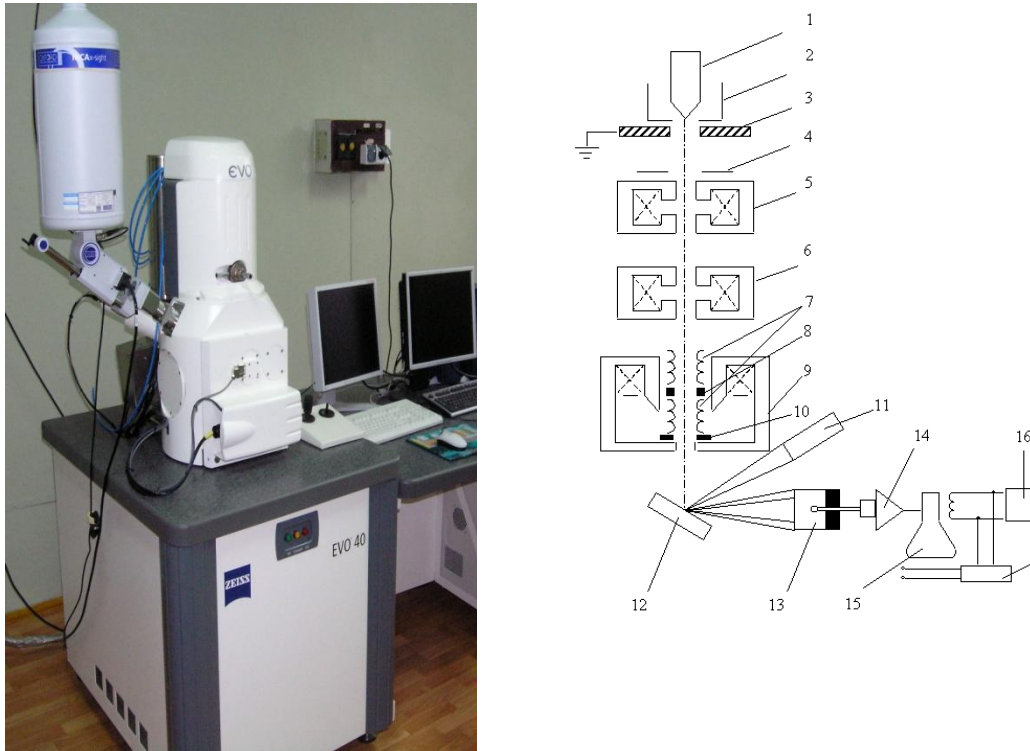


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд і принципова схема електронного мікроскопа

Електронний мікроскоп складається з наступних основних вузлів: електронної пушки 1...3, яка генерує електрони; електронно-оптичної системи 4...10, що формує електронний зонд і забезпечує його сканування на поверхні зразка 12; системи, яка формує зображення 11...17. СЕМ має вакуумну камеру, яка служить для створення необхідного вакууму в робочому об'ємі. Частинами мікроскопа є механічні вузли (шлюзи, гоніометричний стіл тощо), які забезпечують встановлення та переміщення зразка. Зразок 12 закріплюється на предметному столику, який може переміщуватися в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Допускається

нахил зразка до 90° до електронно-оптичної вісі та обертання від 0 до 360° . Для мікроаналізу використовується кремнієво-літєвий енергодисперсійний детектор. Електронний мікроскоп 40XVP Carl Zeiss містить також базовий блок EVO 40XVP із можливістю роботи у режимах високого вакууму, низького вакууму та наднизького вакууму в комплекті з робочою камерою розміром 365x220 мм; столиком із повною моторизацією по 5-ти осях з точністю переміщення і повторюваністю позиції 1,5 мкм; програмним забезпеченням SmartSEM; комп'ютером.

2.3.1 Дослідження зразків на електронному мікроскопі. На мікроскопі можна досліджувати шліфи та поверхні об'єктів без попередньої підготовки [3]. Приготування шліфів для досліджень на електронному мікроскопі загалом здійснюється так само, як і для досліджень методами оптичної мікроскопії. Однак є особливості. Велика глибина різкості зображення на ЕМ дозволяє отримувати додаткову інформацію, проводячи глибоке травлення шліфів. В той же час при отриманні зображень у відбитих електронах шліфи травленню не піддають. Зразки повинні бути електропровідними. Для забезпечення їх д електричного контакту з столиком і для фіксації зразків при нахилі столика використовують спеціальні струмопровідні клеї або струмопровідну двосторонню самоклеючу плівку. При дослідженні непровідних матеріалів – діелектриків, на їх поверхню напилюється тонка плівка електропровідників – золото, графіт тощо. При роботі з органічними матеріалами необхідно врахувати, що за тривалого контакту зонда зі зразком можливе його термічне руйнування.

Перед дослідженнями зразки слід ретельно очистити, щоб не утворювалися газоподібні продукти, що утруднюють отримання необхідного вакууму при відкачуванні мікроскопа та забруднюють його колону. Рекомендується проводити очищення зразків у розчинниках з використанням ультразвуку. При проведенні топографічних досліджень не можна допускати окиснення поверхонь.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОГЕТЕРОГЕННОСТІ ТА АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОКРИТТІВ

З поміж газотермічних методів напилення покриттів метод електродугового напилення є технологічно найпростішим і найдешевшим. Використання для електродугового напилення електродних матеріалів у вигляді спеціальних порошкових дротів дало змогу розширити сферу застосування методу та одержати відновні та захисні покриття різного функціонального призначення з високими експлуатаційними характеристиками. Проте електродуговим покриттям (ЕДП) є характерна висока поруватість, високий рівень залишкових напружень розтягу, низька когезія та адгезія (порівняно із іншими газотермічними покриттями) [3] – [8]. На відміну від дротів суцільного перерізу покриття із порошкових дротів мають високу мікрогетерогенність за хімічними елементами, яка суттєво впливає на абразивну зносостійкість покриттів. Робота присвячена вивченню впливу складу порошкового дроту на мікрогетерогенність та абразивну зносостійкість електродугових покриттів [4], [7], [8].

3.1 Мікрогетерогенність порошкових дротів

3.1.1 Використані матеріали. Порошкові дроти виготовляли в одношаровому виконанні (рис. 3.1). Для оболонки порошкових дротів використовували стрічку з маловуглецевої сталі 08пс (0,05...0,11 % С; не більше 0,02 % S; 0,025...0,5 % Mn; 0,04 % P) [3], [5].

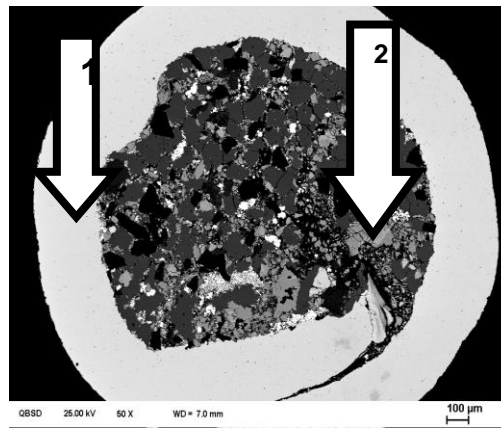


Рисунок 3.1 – Конструктивне виконання порошкового дроту:

1 – сталевая оболонка, 2 – шихта

В якості шихтових матеріалів при виготовленні порошкових дротів вибрали доступні, широкоживані та дешеві матеріали, а саме феросплави: ферохром, феромарганець, феромолібден, ферохромбор. Електрометалізаційні покриття з порошкових дротів наносили на зразки з вуглецевої сталі 20 [5], [7], [8].

Електродуговим покриттям характерна гетерогенна структура. Ступінь гетерогенності структури запропоновано оцінювати за величиною коефіцієнта мікрогетерогенності (K_{MG}), згідно формули:

$$K_{MG} = \left(\sum_{i=1}^n |c_{сер} - c_i| \right) / n \times c_{сер}$$

де n – чисельність прямокутних ділянок площею $35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, виділених на фото мікроструктури електродугового покриття.

На цих ділянках за допомогою спектрального аналізу визначається вміст кожного елемента легування c_i в межах окремої ламелі та середній вміст елемента легування $c_{сер}$ в покритті.

Коефіцієнт K_{MG} характеризує відхилення вмісту кожного з елементів легування в межах окремої ламелі c_i від його вмісту в покритті. Загалом коефіцієнт K_{MG} свідчить про повноту сплавлення шихти та оболонки.

Для визначення коефіцієнта K_{MG} порівнювали інтегральний вміст конкретного елемента легування $c_{сер}$ на ділянці площею 10 мм^2 з його

локальним вмістом c_i на прямокутних ділянках площею $35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, які за величиною сумірні з середньою площею ламелей у покриттях (рис. 3.2).

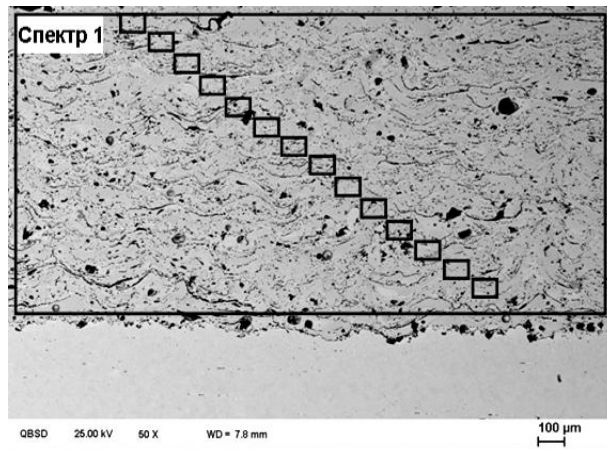


Рисунок 3.2 – Схема визначення локального вмісту елементів легування у покритті.

Визначення K_{MG} покриття проводили мінімум на десяти ділянках, які розташовані одна від другої на віддалі 5 мм, по ширині плями пучка напилення, яка становить 25...30 мм. Значення K_{MG} із цих ділянок усереднювали [5].

3.2 Вплив структурної мікрогетерогенності на зношування

Встановлено, що збільшення мікрогетерогенності покриттів сприяє зростанню абразивної зносостійкості за випробувань закріпленим абразивом та зменшує її за випробувань незакріпленим абразивом (рис. 3.3). Це зумовлено різними механізмами зношування, що реалізуються за випробувань закріпленим та незакріпленим абразивом.

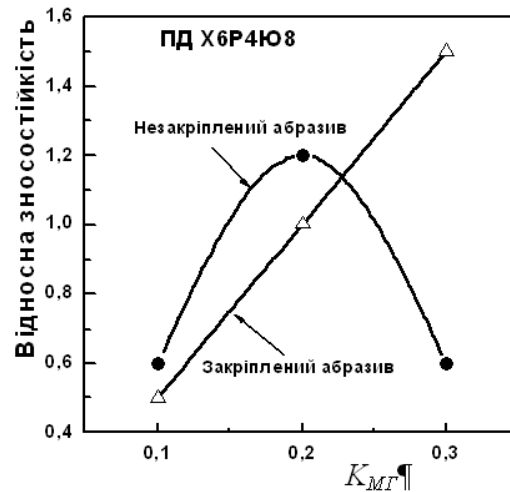


Рисунок 3.3 – Вплив коефіцієнта мікрогетерогенності K_{MG} на відносну абразивну зносостійкість покриттів під час тертя закріпленим і незакріпленим абразивом.

Зокрема, за випробувань закріпленим абразивом абразив рівномірно зношує всю поверхню покриття, а зносостійкість забезпечують тверді ламелі в його структурі. Тому у цьому випадку більша зносостійкість покриття реалізується за його високої MG , яка забезпечує низький рівень напружень розтягу.

За випробувань незакріпленим абразивом вільний абразив першочергово зношує м'які та пластичні ламелі покриття. При цьому тверді ламелі втрачають зв'язок із матрицею покриття та викришуються. Тому гетерогенні покриття з високим коефіцієнтом K_{MG} , які мають і тверді, і пластичні складові (ламелі) виявляють низьку зносостійкість. Зі зменшенням мікрогетерогенності покриттів їх зносостійкість зростає. Разом тим в міру зменшення $K_{MG} < 0,2$ у такому покритті одночасно зростають залишкові колові напруження розтягу. З їх досягненням рівня ~ 100 МПа у покритті виникає мережа мікротріщин і руйнування відбувається шляхом їх росту та викришування цілих ламелей. Зносостійкість при цьому суттєво знижується.

З їх досягненням рівня ~ 100 МПа у покритті виникає мережа мікротріщин і руйнування відбувається шляхом їх росту та викришування цілих ламелей. Зносостійкість при цьому суттєво знижується.

Залежно від режимів напилювання у покритті формуються ламелі різної товщини. В міру збільшення товщини ламелей зносостійкість покриттів знижується за випробувань закріпленим абразивом та зростає за випробувань незакріпленим абразивом (рис. 3.3). Чим менша товщина ламелей, тим більше міжламелярних меж, які є слабким місцем за випробувань незакріпленим абразивом. У цьому випадку зношування інтенсифікується саме вздовж меж ламелей.

Порівнюючи топографію поверхні в плямі тертя, утвореної за випробувань незакріпленим абразивом (рис. 3.4), відзначимо, що як на поверхні сталі, так і наплавлених матеріалів є характерні однаково орієнтовані подряпини від абразиву та рівномірне зношування.

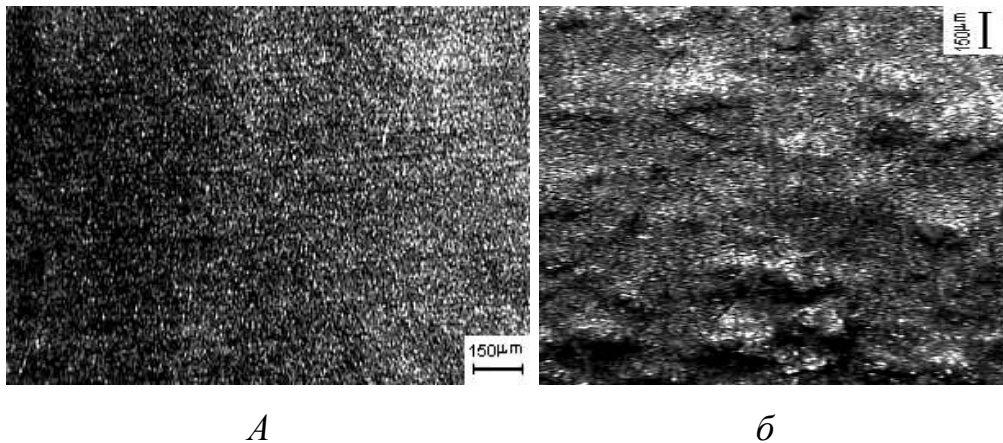


Рисунок 3.4 – Топографія поверхні тертя сталі У8 (а) та покриття Х6Р4Ю8 (б) після випробувань незакріпленим абразивом

Водночас усім покриттям (гетерогенним в більшій мірі) властива наявність виступів та заглибин на поверхні тертя та нерівномірне зношування. Визначальними для рельєфу зони зношування покриттів є величина ламелей, їх хімічна неоднорідність, яка спричиняє неоднорідність за твердістю, та кількість міжламелярних меж.

3.3 Вплив діаметра порошкового дроту на гетерогенність покриттів

Для встановлення впливу діаметра порошкового дроту на абразивну зносостійкість електродугових покриттів закріпленим абразивом досліджували покриття із ПД250Х21ВФГС діаметром 1,6 мм та 2,4 мм із вмістом хрому 21 %. (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад та діаметр дроту 250Х21ВФГС

Марка та діаметр дроту	Хімічний склад порошкового дроту								
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	W
1,6 мм	74,37	2,50	0,30	0,39	0,02	0,03	21,10	0,60	0,40
2,4 мм	74,00	2,51	0,62	0,38	0,01	0,01	21,40	0,52	0,55

Хімічний склад дроту 250Х21ВФГС різного діаметру практично однаковий, лише вміст кремнію у порошковому дроті діаметром 2.4 мм у два рази більший, ніж у порошковому дроті діаметром 1.6 мм. (табл. 3.1).

Гетерогенність напилених покриттів достатньо низька та не перевищує 8,2 % мас. відхилення концентрації хрому від його середнього значення в покритті (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Мікрогетерогенність напилених покриттів

Напруга, V	Струм, А	Ø дроту, мм	Мікрогетерогенність, K_{MG}
30	180	2,4	0,07
31	150	2,4	0,08
31	125	2,4	0,05
30	150	1,6	0,06
30	125	1,6	0,07
30	100	1,6	0,07

Така низька гетерогенність покриттів зумовлена наявністю ферокремнію та феромарганцю у шихті порошкового дроту. Ці компоненти мають низьку температуру плавлення, утворюють евтектику зі сталлю оболонкою (рис. 3.5) і починають плавитись у шихті порошкового дроту за 2...5 мм до торця порошкового дроту при напиленні покриттів.

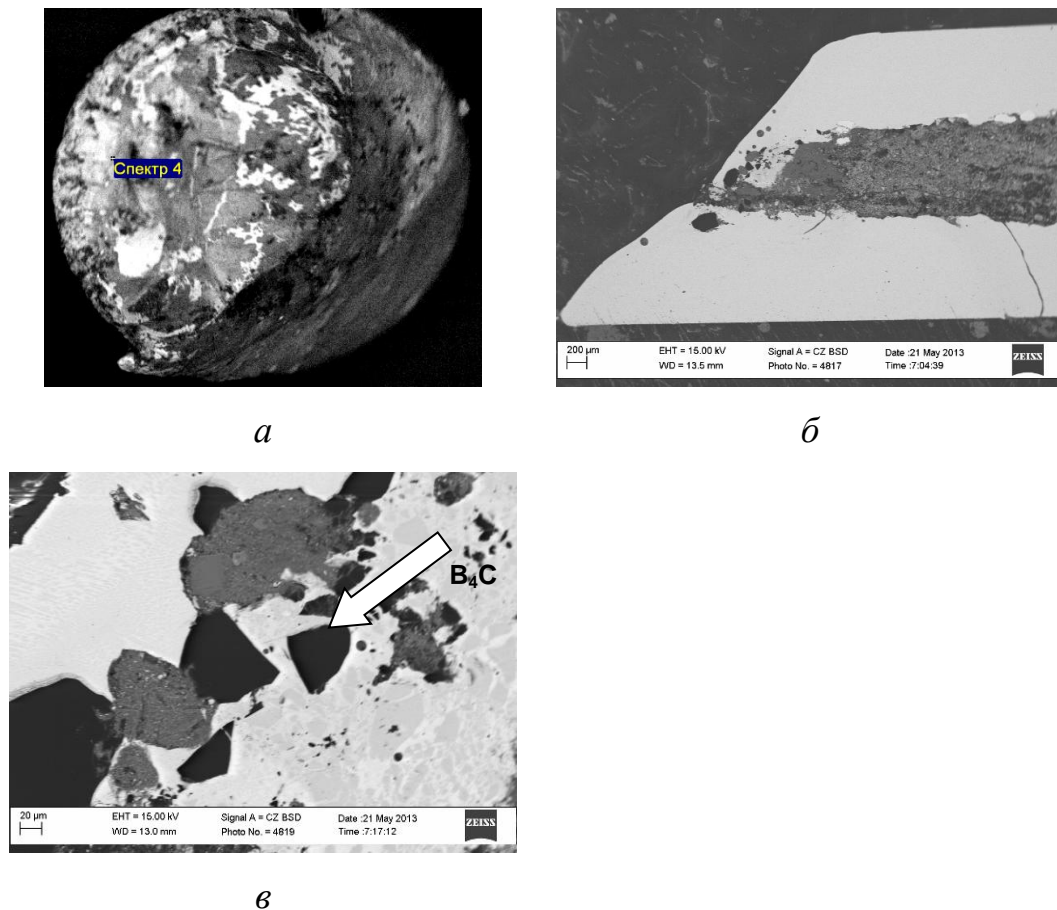


Рисунок 3.5 – Утворення легкоплавкої евтектики на торцях порошкового дроту 250X21ВФГС, х25:

a – вигляд оплавленого торця ПД;

б, в – поперечний розріз оплавленого торця порошкового дроту (B₄C – боромісткий компонент шихти порошкового дроту).

Розподіл хрому на торці порошкового дроту свідчить про збільшення хрому у розплавленому торці.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що збільшення мікрогетерогенності електродугових покриттів збільшує їх абразивну зносостійкість при випробуваннях за схемою закріпленого абразиву та зменшує її при випробуваннях за схемою незакріпленого абразиву.

2. Низька гетерогенність електродугових покриттів зумовлена ферокремнієм та феромарганцем у шихті порошкового дроту. Зазначені компоненти мають низьку температуру плавлення, утворюють евтектику зі сталлю оболонкою та розпочинають плавитись при напиленні покриттів у шихті порошкового дроту за 2...5 мм до торця порошкового дроту. Цей евтектичний розплав інтенсивно розчиняє в собі тугоплавкі карбіди та сталю оболонку утворюючи гомогенний розплав, внаслідок утворюються краплини, які формують достатньо гомогенне покриття.

3. Зі збільшенням струму для двох діаметрів порошкового дроту мікрогетерогенність K_{MG} покриття спочатку зростає, а потім стабілізується навколо значення 0,07.

4. Результати досліджень опубліковано в 3-ох працях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сухенко Ю. Г., Литвиненко О. А., Сухенко В. Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: підручник. – Київ: НУХТ, 2010. – 430 с.
2. Коробов Ю. С., Луканин В. Л., Прядко А. С. Преимущество активированной дуговой металлизации. *Сварщик*. 2002. № 2. С. 16 – 17.
3. Електродугові відновні та захисні покриття: монографія / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник та ін. – Львів : Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2005. – 190 с.
4. Вплив Карбону в порошкових дротах системи Fe-Cr-C-Al на відносну зносостійкість покриттів за умов граничного мащення / М. Студент, О. Калахан, Т. Ступницький, В. Гвоздецький, О. Шабатура, В. Кульматицький // *Вісник ЛНАУ : агроінж. дослідження*. Львів : Львів. нац. агроуніверситет, 2013. № 17. С. 261 – 268.
5. Вплив діаметра порошкового дроту на мікрогетерогенність покриття / М. М. Студент, О. С. Калахан, М. Я. Головчук, Х. Р. Задорожна, Б. В. Занько // *Вісник ЛНАУ : агроінж. дослідження*. Львів: Львів. нац. агроуніверситет, 2017. № 21. С. 61 – 68.
6. Абразивна зносостійкість плазмоелектролітних шарів на основі корунду синтезованих на алюмінієвих сплавах та електродугових покриттях / М. Студент, О. Калахан, В. Посувайло, В. Гвоздецький, Я. Сірак, Б. Гнатів // *Вісник ЛНАУ : агроінж. дослідження*. Львів: Львів. нац. агроуніверситет, 2017. № 21. С. 69 – 74.
7. Калахан О.С., Левонюк В.Р., Занько Б.В., Гнатів Б.Б. Відновлення деталей машин енергетичного призначення електродуговою металізацією порошковими дротами. *Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих вчених. Зб. наук. праць. Кривий Ріг: 2018. С. 162.
8. Гнатів Б. Б. Вплив діаметра порошкового дроту та мікрогетерогенності покриття та його абразивну стійкість. *Перші наукові кроки 2018: матеріали*

ХІІ Всеукр. наук.-практ. конф. студ. та молодих наук. Зб. наук. праць. – Кам’янець – Подільський : 2018. С. 120.

9. Harris S. I. Cobb R. S., Leste T. R. Hard surface composite coatings produced by arc spraying. *Surface Eng. Stafford-upon-Avon: Proc. 2nd Int. Conf.*, 1987. Abington, 1988. P. 447 – 458.

10. Козьяков И. А., Коржик В. Н., Борисов Ю. С. Трибологические характеристики аморфизированных газопламенных покрытий, напыляемых порошковыми проволоками системы Fe–Br. *Автомат. сварка*. 1996. № 10(523). С. 24 – 28.

11. Борисов Ю. С., Козьяков И. А., Коржик В. Н. Структура и свойства газотермических покрытий, полученных с использованием порошковых проволок системы Fe–Cr–Br, Fe–Cr–Br–С. *Автомат. сварка*. 1996. № 5(518). С. 21 – 24.

12. Кононов Г. В., Миличенко А. С., Матвейшын Е. Н. Нанесение слоев с высокой прочностью сцепления методами электродуговой металлизации / Г. В. Кононов, *Новые конструкционные материалы и эффективные методы их получения и обработки: монография*. Київ, 1988. С. 49 – 51.

13. Кубатка В. Г. Круглов Л. С. Электродуговая металлизация и сварка проволокой ПАН4-11 при ремонте. *Сварочное производство*. 1984. №12. С. 31 – 41.

14. Борисова А. Л., Миц И. В., Кайда Т. В. Структура и свойства электродуговых покрытий на основе феробора, полученных из порошковых проволок. *Автомат. сварка*. 1991. № 9. С. 66 – 68.

15. Добровольский А. Ф., Кошеленко П. И. Абразивная износостойкость материалов : справ. пособие. Київ: Техника, 1989. 128 с.

16. Крагельский Н. В. Трение и износ. – 2-е изд. Москва: Машиностроение, 1968. 479 с.