

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793.724

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.256-263>**М.М. Студент**, проф., д-р техн. наук, пров. наук. співр.*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***В.М. Гвоздецький**, старший дослідник, канд. техн. наук, **Х.Р. Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна**e-mail: student.phmi@gmail.com, marko60@ukr.net, gvosdetcki@gmail.com, 880988@ukr.net*

Вплив складу шихти порошкових дротів на механічні властивості та корозійну стійкість електродугових покриттів

Досліджено механічні властивості, хімічну мікрогетерогенність та корозійну стійкість у 3% водному розчині NaCl електродугових покриттів з порошкових дротів (ПД) залежно від компонентного складу шихти, використаного під час їх виготовлення. Показано, що покриттям з ПД властива висока неоднорідність за хімічним складом, що відрізняє їх від покриттів, отриманих розпилюванням суцільних дротів. Адже подрібнені повітряним струменем краплини розплаву ПД, що формують покриття, суттєво різняться за хімічним складом. Такий градієнт спричинений неповним розплавленням і змішуванням складників шихти та сталеві оболонки в дузі між торцями ПД під час електродугового напилювання покриттів. Запропоновано додавати до складу шихти ПД порошки, які забезпечили би в краплинах розплаву ПД необхідну кількість хрому, бору, вуглецю. А саме, додавання до шихти ПД порошоків ферохрому (ФХ), карбіду бору (В4С), ферохромбору (ФХБ), феросплавів (FeSi, FeMn) та самофлюсу ПГ-10Н-01 дало змогу підвищити гомогенність розплаву ПД та активізувати утворення евтектик між складниками шихти ПД 90Х17РГС та ПД 90Х17РЗГС. Завдяки цьому добились нижчої хімічної мікрогетерогенності отриманих покриттів та забезпечили їм високу корозійну тривкість, близьку до корозійної тривкості нержавіюча сталі Х18Н9Т.

покриття, порошкові дроти, мікрогетерогенність, мікротвердість, корозійна тривкість

Постановка проблеми. Електродугове напилювання покриттів поширене у багатьох галузях промислового виробництва, зокрема для відновлення геометрії зношених в експлуатаційних умовах деталей машин, для підвищення їх захисту від абразивного та газоабразивного зношування (причому, і за кліматичних, і за технологічно обумовлених підвищених температур) [1-4]. Як правило, напилювання суцільними, однорідними за хімічним складом дротами дає змогу отримати достатньо гомогенні за хімічним складом електродугові покриття (ЕДП). Проте за їх хімічним складом такі ЕДП істотно відрізняються від використаного для розпилення дроту. Цьому сприяє інтенсивне вигоряння наявних у краплинах розплаву суцільного дроту вуглецю, випаровування таких елементів як Zn, Mn, Cr (з високою пружністю дисоціації їх парів) та оксидування через легке окиснення таких складників як Al, Ti, Cr і Fe.

Покриття, напилені із використанням порошкових дротів (ПД), відзначаються високою хімічною неоднорідністю, що істотно відрізняє їх від ЕДП із суцільних дротів.

Це зумовлено різним хімічним складом краплин, що утворюються із розплаву ПД та переносяться струменем повітря до поверхні підкладки, формуючи на ній покриття. Неповне сплавлення шихти ПД зі сталеву оболонкою під час електродугового напилювання ЕДП зумовлює таку їх гетерогенність. Адже ванна розплавленого металу між торцями ПД миттєво (впродовж часу, сумірного часткам секунди) подрібнюється повітряним струменем на дрібні краплі розплаву і завдяки високому тиску повітря переміщується до поверхні для напилювання. Тому шихта з елементами легування у її складі (у тому числі у важко плавкими такими як ФХ, V_4C , ФХБ не встигає повною мірою розплавитися і перемішатися з розплавом сталеву оболонки. Зрозуміло, що через це дисперговані повітряним струменем краплини розплаву ПД матимуть різний хімічний склад і, як наслідок, покриття, утворені з цих краплин на поверхні підкладки, будуть характеризуватися високою неоднорідністю та значною хімічною гетерогенністю. Зрозуміло, що хімічна гетерогенність отриманих ЕДП впливатиме на їх фізико-механічні властивості за різних експлуатаційних температур і особливо відчутно за впливу корозивних середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Літературні джерела засвідчують, що застосування ПД для отримання ЕДП дає змогу формувати покриття із високими експлуатаційними характеристиками (особливо за впливу корозійно-активних технологічних середовищ) [5-8]. Такі покриття застосовують для відновлення геометрії зношених деталей машин, для захисту робочих елементів і від абразивного зношування (причому і за кімнатних, і за підвищених температур), і від корозійно-абразивного зношування за експлуатації в технологічних середовищах [7, 8]. Разом з тим при їх експлуатації в корозійних середовищах через високу хімічну неоднорідність ЕДП (особливо через градієнт за вмістом хрому на переходах від ламелі до ламелі покриття) в них виникають гальванічні пари, які сприяють їх швидкому знищенню. Тому пошук шляхів зниження хімічної гетерогенності ЕДП, сформованих розпилюванням ПД, відносять до завдань, важливих і актуальних в багатьох застосуваннях.

Постановка завдання. Для ефективного застосування деталей, відновлених нанесенням ЕДП із ПД, в корозійних середовищах перш за все слід з'ясувати як впливає компонентний склад шихти ПД на їх хімічну гетерогенність. Це основа для розроблення нових ПД для формування ЕДП з високою зносостійкістю та достатньо високим вмістом легувальних елементів, необхідних для забезпечення їх ефективної експлуатації в технологічних середовищах.

Виклад основного матеріалу. Для формування ЕДП використали оригінальне устаткування, виготовленого на основі ідеї і конструкторської розробки Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (рис. 1). Для напилювання ЕДП використали модельні ПД діаметром 2,0 мм, створені як базові (систем легування Fe–Cr–C та Fe–Cr–B).

Принципова схема формування електродугових покриттів

рис. 5



Рисунок 1 – Принципова схема розпилювання краплин розплаву порошкового дроту та формування електродугових покриттів на їх основі

Джерело: розроблено авторами

Кількісно величину хімічної гетерогенності ЕДП оцінювали за коефіцієнтом хімічної мікрогетерогенності K_{MG} , який визначали з виразу:

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

де n – кількість прямокутних ділянок на поверхні покриття (площею $35 \cdot 10^{-4}$ мм²), в межах яких методом мікрорентгенівського спектрального аналізу фіксували вміст кожного з елементів легування c_i як в межах кожної окремої ламелі, так і як середній їх вміст $c_{сер}$ у ЕДП.

Вибір компонентів шихти ПД для мінімізації хімічної мікрогетерогенності ЕДП. Для забезпечення високої корозійної стійкості ЕДП в агресивних середовищах необхідно було знизити їх хімічну мікрогетерогенність та досягти достатньо високий вміст хрому (він мав би бути понад 12 мас. %) у кожній з його ламелей. Для досягнення цієї мети до складу шихти ПД додавали інгредієнти, які уможлилювали формування евтектик з низькою температурою плавлення з розчиненням у собі таких тугоплавких складників шихти ПД як карбіди, бориди, тугоплавкі метали та сплави.

Важливо також, що евтектичні сплави з низькою температурою плавлення можуть окрім того виконувати функцію ще й самофлюсу. Тому вони спроможні взаємодіяти із тугоплавкими оксидами (зокрема такими як Cr₂O₃ та Al₂O₃, температура плавлення яких $T_{пл}$ досягає 2435 та 2050°C відповідно), утворюючи при цьому сполуки оксидів, які як правило починають плавитися за відчутно нижчої температури.

Для ЕДП, що експлуатуватимуться в умовах сумісного впливу корозивних середовищ та абразивного зношування, слід використовувати ПД з якомога меншим діаметром. Проте досить часто це важко, або взагалі неможливо досягти. Адже, чим менший діаметр ПД, тим важче досягти потрібний вміст хрому, вуглецю та бормістких компонентів у складі його шихти. Тому, щоб забезпечити необхідну корозійну стійкість ЕДП (з вмістом хрому у кожній з його ламелей не меншим за 12 мас. %), рекомендовано використовувати ПД діаметром не меншим за 2,0 мм.

Для обґрунтування оптимального складу шихти ПД дослідили п'ять дослідних варіантів ПД, які відрізнялися за компонентним складом шихти (табл. 1). До їх складу входили хром, бор, вуглець місткі компоненти (Cr, ФХ, В₄С, ФХБ) з додаванням FeSi, FeMn та самофлюсу ПГ-10Н-01, які сприяли утворенню евтектик між складниками шихти, гомогенізували склад розплаву ПД та знижували мікрогетерогенність ЕДП (рис. 2).

Таблиця 1 – Механічні властивості корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів з різним компонентним складом шихти.

Позначення, хімічний склад порошкового дроту (компонентний склад шихти)	Вміст Cr у ламелях, мас. %	K_{MH}	Залишкові напруження розтягу, МПа	Когезійна міцність, МПа	Мікро-твердість, HV _{0,3}	Струм корозії, 10 ⁻⁴ mA
№1. 90X17P2ГС, склад шихти: Cr+В ₄ С+FeSi+FeMn	17,1	0,07	43,6	140	610	6
№2. 20X16P3H2ГС, склад шихти: FeCrB ₂ + Cr + ПГ10-Н-01	16,4	0,06	41,9	100	690	5
№3. 90X17PГС, склад шихти: FeCrB ₂ + ФХ+Cr+FeSi+FeMn	17,3	0,05	76,9	185	625	2
№4. 90X17P3ГС, склад шихти: Cr + В ₄ С + FeSi+FeMn	17,0	0,1	66,8	150	595	5
№5. X17P3С, склад шихти: FeCrB ₂ +Cr+ FeSi	17,1	0,15	6,17	80	700	14

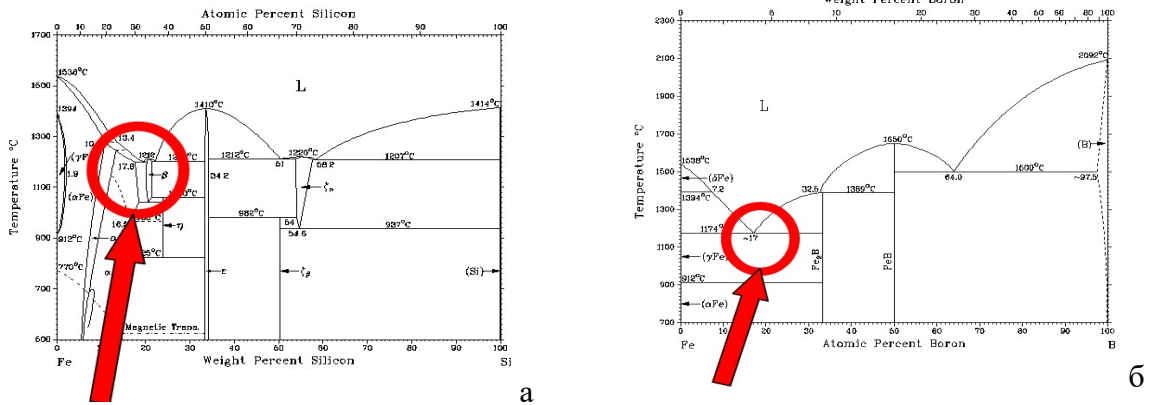


Рисунок 2 - Діаграми стану для заліза та кремнію (а) та заліза й бору (б), що можуть утворювати легкоплавкі евтектики Fe-Si та Fe-B, температура плавлення яких становить відповідно 1212 °С і 1174 °С.

Джерело: розроблено авторами

Додавання до шихти ПД карбіду бору (B_4C) у чистому вигляді не забезпечило достатньої твердості ЕДП (табл. 1), отриманим розпилюванням ПД №1 (90X17P2ГC) та ПД №4 (90X17P3ГC). Вважали, що це зумовлено тим, що в цьому випадку часточки B_4C повністю не розчинились у розплаві ПД, із якого формували покриття. Під час напилювання ЕДП повітряний струмінь під високим тиском видував значну їх частину із шихти ПД і, тим самим, ці часточки не приймали участі у формуванні покриття. При цьому когезійна міцність таких покриттів показала їх середній рівень (табл. 1).

Заміри мікротвердості показали (табл. 1), що найвищої твердості досягли на ЕДП з ПД №2 (20X16P3H2ГC) та ПД №5 (X17P3C). Це відбувалося завдяки наявності у шихті ПД 3 мас.% бору, який потрапляв до їх шихти у складі порошку ферохромбору ФХБ-2. Фазовий аналіз цих ЕДП виявив в їх феритній структурі виділення дрібнодисперсних боридів $FeCrB$ та $FeCr_2B$. Разом з тим когезійна міцність цих покриттів не перевищила 100 МПа (табл. 1). Це пояснили тим, що під час напилювання ЕДП у їх структурі могли виникати залишкові напруження розтягу першого роду, які, як правило, сприяють розтріскуванню покриттів під час їх подальшого механічного оброблення. Тому перед нанесенням ЕДП з таких ПД основу для напилювання слід підігрівати до 150...200 °С.

Середню твердість серед аналізованих варіантів ЕДП показали покриття із ПД №3 (90X17PГC). Мартенситна матриця, додатково зміцнена дрібнодисперсними включеннями боридів $FeCr_2B$ забезпечила їх відносно високу твердість. Такі покриття виявили суттєво вищу когезійну міцність (до 185 МПа) та середній рівень залишкових напружень першого роду 43,6 МПа (табл. 1), що зумовлено наявністю в структурі таких покриттів аустенітно-мартенситної матриці.

Під час кристалізації та охолодження краплин на холодній поверхні напиленої деталі покриття зменшується у розмірах, а масивніша основа чинить опір цьому, що спричиняє напруження розтягу у поверхневих шарах ЕДП. Це зумовлює формування колових напружень першого роду. Оскільки коефіцієнт термічного розширення мартенситу є найнижчим, а аустеніту – найвищим, то внаслідок формування матричної фази мартенситу у покриттях виникали лише незначні напруження розтягу. Такі покриття легше обробляти, оскільки для їх механічного оброблення можна застосовувати значно жорсткіші режими шліфування без загрози виникнення у них тріщин чи відшаровування отриманих покриттів від підкладки.

Корозійна тривкість електродугових покриттів із розроблених ПД після їх різної експозиції в 3%-му водному розчині NaCl. Із залученням потенціодинамічного

методу встановили закономірності взаємодії ЕДП, нанесених ПД п'яти запропонованих компонентних складів шихти, із 3% розчином NaCl. З отриманих поляризаційних кривих прийшли до висновку, що за характером корозійної взаємодії з середовищем усі аналізовані ЕДП з розроблених ПД мало чим відрізняються одне від одного (рис. 3, а, б, в, г).

Отже, попри відмінності розроблених ЕДП за хімічним складом їх електрохімічні параметри та характер зміни поляризаційних кривих особливо не змінюються (рис. 3). Так при витриманні зразків із покриттями в середовищі впродовж 1 години лише потенціал корозії, зафіксований для покриття з ПД №3 (90X17PГC), якому властивий практично найвищий середнім вміст хрому та найнижчий коефіцієнт K_{MG} , суттєво змістився в область більш від'ємних значень порівняно з потенціалом корозії для ЕДП, нанесеного з ПД №5 (X17P3C). Щодо ЕДП, нанесених ПД іншого компонентного складу (№2, №4) то їх потенціали корозії виявилися лише трішки більш позитивними порівняно з ЕДП з ПД №3 (90X17PГC). При цьому відзначили, що зміна густини струму корозії для усіх аналізованих ЕДП, нанесених розпилюванням розроблених ПД, не перевищувала одного порядку.

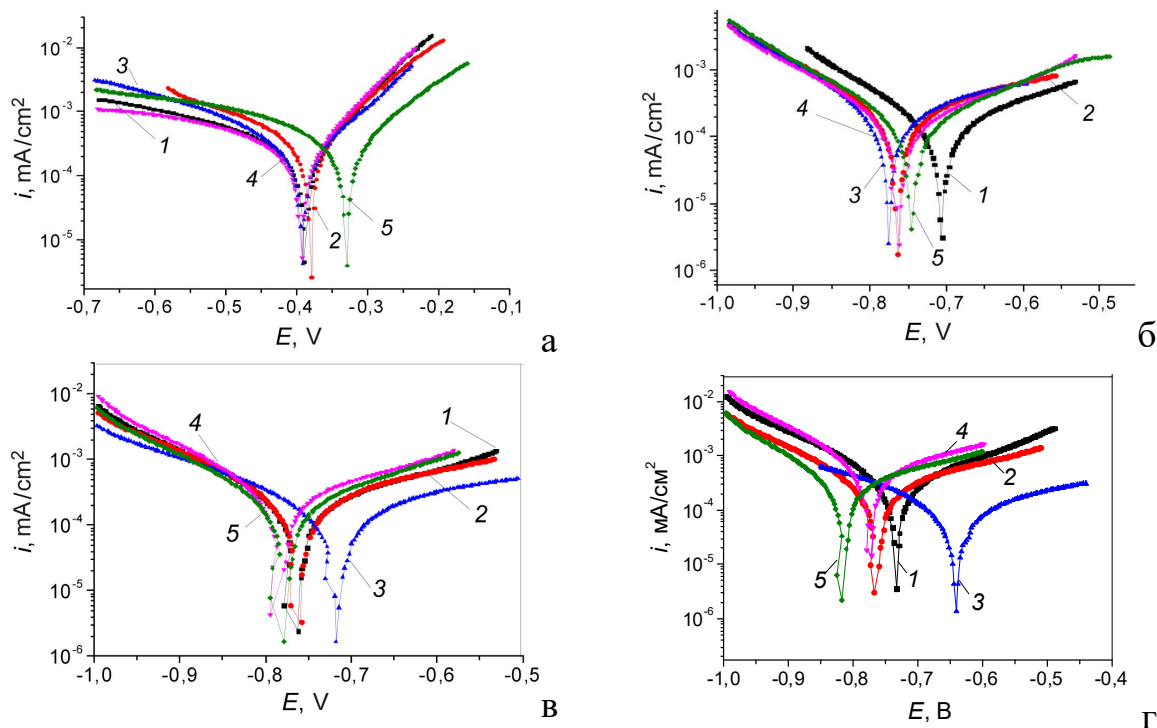


Рисунок 3 – Потенціодинамічні криві напилених електродугових покриттів з порошкових дрітків різного складу: 1 – ПД 90X17P2ГC; 2 – ПД №2 (20X16P3H2ГC); 3 – ПД №3 (90X17PГC); 4 – ПД 90X17P3ГC; 5 – ПД №5 (X17P3C) після витримки їх у 3% розчині NaCl протягом 1 год (а), 1 доби (б), 3 діб (в) та 7 діб (г)

Джерело: розроблено авторами

Послідовність розташування потенціодинамічних кривих, отриманих на ЕДП з аналізованих ПД після збільшення тривалості витримання зразків з покриттями у 3%-му розчині NaCl (до 1 доби), практично не змінилася (рис. 3, б).

Разом з тим виявилось, що зі збільшенням тривалості витримання зразків з покриттями в корозивному середовищі до 1 доби потенціал корозії сталі з покриттям зсунувся в область негативніших значень на 0,3...0,4 В (рис. 3г), порівняно із зафіксованим за експозиції у цьому ж середовищі, але впродовж 1 год (рис. 3в). Таке зміщення потенціалу корозії до негативніших значень пояснили зміною хімічного

складу ламелей ЕДП, напилених різними ПД. Зокрема, за наявності в ЕДП таких елементів як Al, Mn та Ni, які рівномірно розподілялись в ламелях і виконували роль анодних ділянок. Тоді як сталь основи виконувала функцію катода.

На усіх напилених ЕДП виявили відкриту поруватість, що суттєво впливало на корозійну поведінку як самого ЕДП, так і матеріалу основи. Адже завдяки цій поруватості корозивне середовище проникало по наскрізних порах до основи та створювало сприятливі передумови для реалізації підплівкової корозії. Продукти корозії при цьому накопичувалися вздовж меж розділу ЕДП з основою, порушували їх адгезію і полегшували їх відшарування.

Аналіз результатів потенціодинамічних досліджень ЕДП (рис. 3) виявив, що на початку занурення зразків у корозивне середовище процес електрохімічної корозії протікав з перевагою катодного контролю ($b_k > b_a$). Катодне відновлення окислювача при цьому лімітує процес електрохімічної корозії (рис. 3). Зі збільшенням тривалості експозиції покриттів у 3%-му розчині NaCl корозійний процес починає протікати за анодного контролю ($b_a > b_k$), а лімітуючою стадією при цьому стає реакція анодного окислення металу (рис. 3 б,в,г).

Зміна потенціалу корозії ЕД, напилених на сталеву основу, (рис. 3 в,г) засвідчила анодну природу корозійних процесів, які супроводжують роботу покриття в корозивному середовищі. При цьому сталева основа залишатиметься катодно захищеною, доки покриття повністю не буде знищене через корозійне розчинення.

За витримування зразків із ЕДП у корозивному середовищі понад 2 доби їх струми корозії зростали, тобто їх корозійна тривкість зменшувалася. Спричинено це наскрізною поруватістю. Адже за тривалої експозиції середовище могло проникати до сталеві основи і спричиняти підплівкову корозію з відшаруванням покриття від основи (рис. 4).

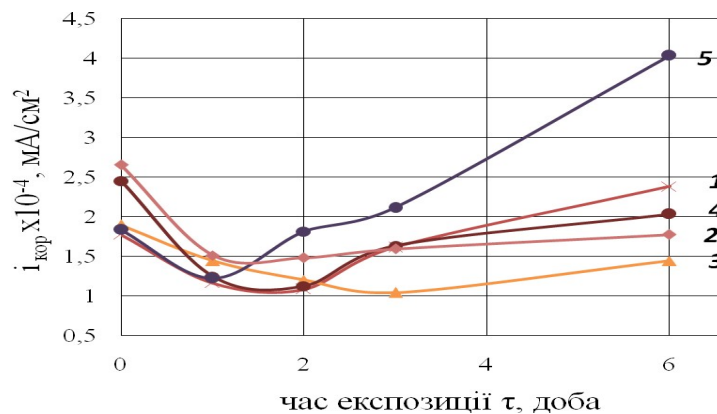


Рисунок 4 – Вплив тривалості експозиції ЕДП з різних ПД (1 – ПД 90X17P2ГС; 2 – ПД №2 (20X16P3H2ГС); 3 – ПД №3 (90X17PГС); 4 – ПД 90X17P3ГС; 5 – ПД №5 (X17P3С) в 3% розчині NaCl на густину струму (а) та потенціал (б) корозії, визначені за результатами потенціодинамічних досліджень

Джерело: розроблено авторами

Зазначимо, що частина хрому під час формування покриттів витрачається на утворення боридів. Внаслідок цього в твердому розчині хрому залишається менше. Це призводить до значної мікрогетерогенності покриття через різницю за вмістом хрому в різних ламелях покриття. Як наслідок виникає велика кількість гальванічних пар, що інтенсифікує електрохімічну корозію.

За наявності у шихті ПД90X17PГС та ПД90X17P3ГС хрому, ферохрому, ферокремнію та феромарганцю мінімізувало хімічну мікрогетерогенність ЕДП і, як

наслідок, забезпечувало їм високу корозійну тривкість - $0,0002 \text{ mA/cm}^2$, близьку до корозійної тривкості нержавіючої сталі X18H9T – $0,0001 \text{ mA/cm}^2$.

Висновки:

1. Для забезпечення повного сплавлення компонентів шихти ПД між собою та з його сталеву оболонкою запропоновано додавати до шихти ПД порошки феросплавів Fe-Mn, Fe-Si, які здатні взаємодіяти із тугоплавкими компонентами шихти з утворенням низькотемпературних евтектик. Експериментально обґрунтовано правомірність такого компонентного складу шихти ПД як ефективний спосіб зниження температури плавлення складників ПД.

2. Додавання до складу шихти ПД на основі ферохробору та ферохрому порошоків ферокремнію, феромарганцю та самофлюсного сплаву ПН-10Н-01 забезпечило високу твердість ЕДП, малу їх гетерогенність за вмістом хрому у ламелях і, як наслідок, високу корозійну тривкість, яка сумірна з властивою нержавіючій сталі.

Список літератури

1. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / M.M.Student, S.I. Markovych, V.M. Hvozdet'skyi, O.S. Kalakhan, V.M. Yuskiv. *Materials Science*, 2022, Vol.58(1), pp. 96–104.
2. Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings / H.V. Pokhmurs'ka, M.Ya. Holovchuk, Yu.V. Dz'oba, V.M. Hvozdet'skyi, L.V. Dzyubyk. *Materials Science*. 2018. Vol.53, №6. P. 868–874.
3. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings / T.R. Stupnyts'kyi, M.M. Student, H.V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet'skyi, *Materials Science*, 2016, Vol. 52(2), pp. 165–172.
4. Студент М.М., Головчук М.Я., Гвоздецький В.М. Вплив хімічного складу порошкових дрітків на структуру та зносостійкість покриттів різного хімічного складу. *Проблеми трибології*. 2017. № 3. С. 56-61.
5. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering Korobov Yury. *Coatings*. 2018. Vol.8(2). 71 p.
6. The structure and properties of electric arc coatings based on ferroboron obtained from powder wires / AL Borisova, IV Mitz, TV Kaida [et al.]. *Automatic welding*. 1991. 9. P. 66–68.
7. Dallaire S., Levert H. Synthesis and deposition of TiB₂ containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*. 1992. 50, 2. P. 241–248.
8. Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying / Ana Arizmendi-Morquecho, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martinez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2014. Article ID 836739 <https://doi.org/10.1155/2014/836739>.

Referencis

1. Student, M.M., Markovych, S.I., Hvozdet'skyi, V.M., Kalakhan, O.S., Yuskiv, V.M. (2022) Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings. *Materials Science*, 58(1), 96–104 [in English].
2. Pokhmurs'ka H.V., Holovchuk M. Ya., Dz'oba Yu. V., Hvozdet'skyi V. M., Dzyubyk L. V. (2018). Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings. *Materials Science*, Vol.53, 6, 868–874 [in English].
3. Stupnyts'kyi, T.R., Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet'skyi, V.M. (2016). Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*, 52(2), 165–172 [in English].
4. Student, M.M., Holovchuk, M.Ya. & Hvozdet'skyj, V.M. (2017). Vplyv khimichnoho skladu poroshkovykh drotiv na strukturu ta znosostyjkist' pokryttiv riznoho khimichnoho skladu [Influence of chemical composition of flux-cored wires on the structure and wear resistance of coatings of different chemical composition]. *Problemy trybologhii – Problems of tribology*, 3, 56-61 [in Ukrainian].
5. Korobov, Yury. (2018). Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering *Coatings*, 8(2), 71 [in English].

6. Borisova, A.L., Mitz, I.V., Kaida, T.V. et al. (1991). The structure and properties of electric arc coatings based on ferrobore obtained from powder wires. *Automatic welding*, 9, 66–68 [in English].
7. Dallaire, S. & Levert, H. (1992). Synthesis and deposition of TiB₂ containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*, 50, 2, 241–248 [in English].
8. Ana Arizmendi-Morquecho, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martínez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López. (2014). Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2014. Article ID 836739 <https://doi.org/10.1155/2014/836739> [in English].

Mykhailo Student, DSc., Senior Researcher

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Volodymyr Hvozdetkii, PhD tech. sci., Research, **Khrystyna Zadopozna**, PhD tech. sci., Research

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Research on the Dependence of the Microhardness of Modified Surfaces of Titanium Alloys on the Depth of Nitrogen Saturation During Vacuum Ion Plasma Nitriding in the Thermocyclic Mode

Electric arc spraying of coatings is common in many branches of industrial production, in particular to restore the geometry of machine parts worn in operational conditions, to increase their protection against abrasive and gas-abrasive wear (at the same time, both at climatic and at technologically determined elevated temperatures). Coatings sprayed using powdered wires are characterized by high chemical heterogeneity, which significantly distinguishes them from electric arc coatings made of solid wires. This is due to the different chemical composition of the droplets formed from the molten powder wires and carried by the air jet to the surface of the substrate, forming a coating on it. The charge with alloying elements in its composition (including difficult-to-melt ones such as FH, B₄C, FHB) does not have time to fully melt and mix with the melt of the steel shell. It is clear that because of this, the melt droplets of flux-cored wires dispersed by an air jet will have a different chemical composition and, as a result, the coatings formed from these droplets on the surface of the substrate will be characterized by high heterogeneity and significant chemical heterogeneity, which will affect their physical and mechanical properties at different operating temperatures and especially when exposed to corrosive environments.

To ensure high corrosion resistance of electric arc coatings in aggressive environments, it was necessary to reduce their chemical microheterogeneity and achieve a sufficiently high chromium content (it should be more than 12 wt.%) in each of its lamellae. To achieve this goal, ingredients were added to the composition of the charge, which enabled the formation of eutectics with a low melting temperature, with the dissolution of such refractory components of the powder wire charge as carbides, borides, refractory metals and alloys. Microhardness measurements showed that the highest hardness was achieved by electric arc coatings made of powder-coated wires № 2 (20X16P3H2ГC) and powder-coated wires № 5 (X17P3C). This happened due to the presence in the charge of 3 wt.% of boron, which entered their charge as part of the FHB-2 ferrochromiumboron powder. Phase analysis of these EDPs revealed the segregation of finely dispersed FeCrB and FeCr₂B borides in their ferrite structure. However, the cohesive strength of these coatings did not exceed 100 MPa. This was explained by the fact that during filing, residual first-order tensile stresses could occur in their structure, which, as a rule, contribute to the cracking of the coatings during their subsequent mechanical processing. Therefore, before applying coatings from such powdered wires, the base for spraying should be heated to 150...200°C.

Conclusions. 1. To ensure complete fusion of the components of the powder-coated wire charge with each other and with its steel sheath, it is proposed to add Fe-Mn, Fe-Si ferroalloy powders to the powder-coated wire charge, which are able to interact with the refractory components of the charge with the formation of low-temperature eutectics. The legality of such a component composition of the charge of flux-cored wires as an effective method of reducing the melting temperature of the components has been experimentally substantiated. 2. The addition of ferrosilicon, ferromanganese powders and self-fluxing alloy PH-10H-01 to the charge of flux-cored wires based on ferrochromium and ferrochromium ensured high hardness of electric arc coatings, low heterogeneity of the chromium content in the lamellae, and, as a result, high corrosion resistance, which comparable to that of stainless steel.

coating, powder wires, microheterogeneity, microhardness, corrosion resistance

Одержано (Received) 14.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 02.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023