

УДК 622.276.054

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ПОКРИТТЯ, НАПИЛЕНОГО В НАДЗВУКОВОМУ РЕЖИМІ

*В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ, О. З. СТУДЕНТ, М. М. СТУДЕНТ, І. М. ПОГРЕЛЮК,
Х. Р. ЗАДОРЖНА, О. Г. ЛУК'ЯНЕНКО*

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Встановлено, що механічні властивості та механізм руйнування електродугових покриттів з порошкового дроту (ПД) 90X17P2ГC залежать від тиску розпилювального повітря (0,6 та 1,2 МПа). Виявлено, що залишкові напруження розтягу в покритті, отриманому за надзвукової швидкості повітряного потоку (600 м/с), знизилися на 10%, а їх мікротвердість та когезивна міцність зросли на 30 та 200%, відповідно, порівняно з такими для покриття, сформованого за дозвукової швидкості (300 м/с). Поліпшення властивостей покриття за використання для напилювання надзвукового повітряного потоку пояснено зменшенням розміру краплин розплаву ПД і, відповідно, товщини закристалізованих на підкладці ламелей, а також товщини оксидів між ними через менш тривалий політ краплин під час напилювання та їх слабше високо-температурне окиснення; дисперсійним зміцненням ламелей нанорозмірними часточками боридів (Fe, Cr)₂B; збільшенням частки кризьламельярного руйнування порівняно з міжламельярними розшаруваннями під час випробувань на когезивну міцність.

Ключові слова: *дугове напилювання, над- і дозвукова швидкість повітряного потоку, порошковий дріт, покриття, мікротвердість, залишкові напруження, когезивна міцність, механізм руйнування.*

It was established that the mechanical properties and the failure mechanism of arc sprayed coatings with cored wire (CW) 90X17P2ГC depend on the pressure of the sprayed air (0.6 and 1.2 MPa). It was found that residual tensile stresses in the coating obtained at a supersonic speed of air flow (600 m/s) decreased by 10%, and their microhardness and cohesive strength increased by 30 and 200%, respectively, relative to that formed at the subsonic speed (300 m/s). The improvement in the properties of the coating formed by a supersonic air flow was explained by: a decrease in the size of droplets of the CW melt and, accordingly, the thickness of the lamellas crystallizing on the substrate and also by a decrease in the thickness of interlamellar oxides in the coating due to a shorter flight of droplets during spraying and, accordingly, less intense high-temperature oxidation of their surface; dispersion strengthening of lamellas with nano-sized particles of (Fe, Cr)₂B borides; an increase in the proportion of translamellar failures compared to interlamellar delaminations during cohesive strength tests.

Keywords: *arc spraying, super- and subsonic air flow speed, cored wire, coatings, microhardness, residual stresses, cohesive strength, failure mechanism.*

Вступ. Як свідчить статистика, більшість (до 90%) елементів машин і механізмів виходять з ладу не через руйнування, а внаслідок зношування поверхні окремих деталей [1]. Для їх відновлення використовують різні методи газотермічного напилювання [2, 3], зокрема, газополуменеве [4, 5], плазмове [6–8], високошвидкісне газополуменеве – HVOF [9–12], або холодне газодинамічне – Cold Spray [13, 14]. Їх недолік – висока собівартість через використання паливних та інертних газів, дорогих порошків, складного устаткування та персоналу високої

кваліфікації. Для поліпшення властивостей поверхонь використовують також плазмо-електролітне окиснення [15], тверде анодування [16], електроіскрове оброблення [17], хромування [18], глибина впливу якого обмежена. Електродугове напилювання вважають одним з найбільш простих, технологічних, продуктивних та дешевих методів [19]. Зокрема, відносна вартість електродугових покриттів (ЕДП) до 10 разів нижча, ніж нанесених іншими газотермічними способами. Такі покриття завтовшки до 3...5 mm можна наносити на поверхню підкладок, що різняться складом та геометрією [19–21]. Порошкові дроти (ПД) розширили перспективи використання цього процесу. Адже, додаючи до складу їх шихти порошки металів, їх сплавів та керамічних матеріалів, можна в широких межах регулювати властивості ЕДП [22, 23] та формувати покриття певного складу і з наперед заданими характеристиками [24].

Вивчення впливу складу ПД на структурні, механічні [25, 26] та корозійні [27–30] властивості отриманих з них покриттів привертає увагу багатьох фахівців. Удосконалюють також технологію нанесення ЕДП [31, 32], у т.ч. на різні підкладки [33]. Навіть поверхневий аналіз відомих досліджень свідчить про високий рейтинг технології отримання ЕДП проти інших методів газотермічного напилювання [34]. Когезивна міцність покриттів та залишкові напруження в них визначають робоздатність ЕДП за впливу експлуатаційних навантажень. Ці властивості ЕДП залежать від вмісту елементів зміцнення у ламелях, однорідності їх структури та ширини міжламелярних прошарків оксидів, а отже, від складу ПД та технологічних показників нанесення покриттів. Швидкість переміщення краплин розплаву ПД до підкладки під час нанесення ЕДП може також суттєво впливати на його властивості. Тому очікували, що після використання надзвукового повітряного потоку під час нанесення ЕДП відкриються додаткові можливості, щоб поліпшити їх властивості. Це дослідження спрямоване на експериментальне обґрунтування переваг надзвукового повітряного потоку для формування ЕДП з ПД 90X17P2ГС за результатами визначення когезивної міцності, залишкових напружень та механізму руйнування покриття.

Матеріали і методики. Для напилювання ЕДП використали металізатор, розроблений у ФМІ [35], а як електродний матеріал – ПД 90X17P2ГС діаметром 1,8 mm з оболонкою зі сталі 20. Параметри напилювання: напруга дуги 30 V, струм 150 A, дистанція напилювання 120 mm, витрати повітря 1,3 m³/min. Щоб забезпечити до- та надзвукову швидкість повітряного потоку (до ~300 та ~600 m/s відповідно), застосували тиск повітря 0,6 та 1,2 МПа. Надзвукової швидкості досягли соплом Лавалля, характерні розміри якого розраховували за відомими формулами [35]. Швидкість крапель розплавленого металу, диспергованих так сформованим повітряним потоком, знаходили методом обертання двох дисків [29, 35]. ЕДП напиляли впродовж 30 с ПД масою 300 g.

Когезивну міцність ЕДП визначали на зразках, складених з двох відрізків товстостінної (4 mm) сталеві труби завдовжки 70 mm. Їх торці притискали один до одного шпилькою, пропущеною крізь внутрішній отвір. З обох країв зразка нарізали зовнішню різьбу (під захоплювачі розривної машини), а їх центральну частину проточували, щоб усунути концентратор напружень на місці стику обох частин трубок. Поверхню зразків обробляли абразивно-струменевим методом часточками корунду діаметром 3...5 mm, а на їх центральну частину наносили ЕДП товщиною 1 mm. Покриття утримувало обидві частини трубок як одне ціле навіть після усунення шпильки. Зразки розтягували на розривній машині FPZ-10 і реєстрували руйнівне навантаження, за значенням якого, що припадало на одиницю площі кільцевого зламу покриття, розраховували його когезивну міцність.

Для визначення залишкових напружень в ЕДП використовували кільцеподібний зразок (діаметром 60 mm, висотою 20 mm і товщиною стінки 4 mm) зі

повздовжнім наскрізним розрізом [24], що постійно обертався зі швидкістю 2 s^{-1} . За зміною переміщення берегів розрізу на кільці під час нанесення ЕДП, які реєстрував тензOMETричний перетворювач сигналів, розраховували залишкові напруження.

Мікротвердість покриттів вимірювали приладом ПМТ-3 за навантаження 200 g. Фрактографічні особливості зламів ЕДП після випробувань на когезивну міцність аналізували на сканівному електронному мікроскопі EVO 40-XVP зі системою для мікроаналізу INCA Energy 350*.

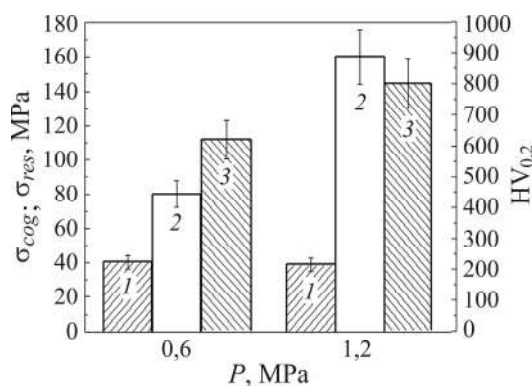
Результати та їх обговорення. Механічні властивості ЕДП з ПД 90X17P2ГС.

Встановили, що швидкість повітряного потоку на виході зі сопла металізатора зростала вдвічі (від ~ 300 до $\sim 600 \text{ m/s}$) з підвищенням тиску повітря на його вході від 0,6 до 1,2 МПа. При цьому збільшувались фокусування металоповітряного потоку, швидкість диспергованих повітряним струменем краплин розплавленого металу (від 90 до 210 m/s) та їх температура в момент контакту з підкладкою, але зменшувалися тривалість польоту та розмір крапель розплаву. Зокрема, за тиску повітря 0,6 МПа у метало-повітряному потоці формувалися краплини завбільшки від 30 до 100 μm , а за тиску 1,2 МПа – від 10 до 30 μm , тоді як товщина міжламельних прошарків оксидів була відчутно меншою за вищого тиску, ніж за нижчого. Окрім того, в покритті із цього ПД зменшилися не тільки загальна поруватість (від 8 до 2%), але і розміри самих пор (від 30 до 3 μm).

Відмінності технологічних показників напилювання та структурних особливостей покриттів вплинули також і на їх механічні властивості (рис. 1). Зокрема, за напилювання надзвуковим повітряним потоком когезивна міцність σ_{cog} напиленого покриття зросла вдвічі, залишкові напруження розтягу σ_{res} знизились на 10%, а твердість $\text{HV}_{0,2}$ при цьому зросла на 30%.

Рис. 1. Механічні властивості (1 – залишкові напруження σ_{res} ; 2 – когезивна міцність σ_{cog} ; 3 – мікротвердість $\text{HV}_{0,2}$) електродугових покриттів з порошкового дроту ПД 90X17P2ГС, сформованих за різного тиску розпилювального повітряного потоку P .

Fig. 1. Mechanical properties (1 – residual stresses σ_{res} ; 2 – cohesive strength σ_{cog} ; 3 – microhardness $\text{HV}_{0,2}$) of arc sprayed coatings with cored wire (CW) 90X17P2ГС, formed at different pressures of the spray air flow P .



Зрозуміло, що таке відчутне поліпшення функціональних властивостей покриття, отриманого за вищого тиску P , зумовлене особливостями його структури. Зокрема, зростання твердості пояснили зниженням поруватості покриття, сформованого надзвуковим потоком. Проте подвійний приріст його когезивної міцності важко пов'язати лише зі послабленням ролі міжламельних оксидів (через зменшення їх кількості та товщини). Очевидно, що внаслідок підвищення тиску розпилювального потоку можна очікувати також зростання міцності самих ламелей. Адже цьому сприяли й відчутніша деформація краплин розплаву за контакту з підкладкою, і сприятливіші передумови для гартування (вища температура краплин

* Фрактографічні дослідження виконано в центрі колективного користування науковими приладами ФМІ НАН України "Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу" за участі д.т.н. С. А. Корнія та д.т.н. В. А. Винара.

через вдвічі меншу тривалість їх польоту до підкладки та інтенсивніше охолодження через значно менші розміри) та дисперсійного тверднення внаслідок самовідпуску ламелей з виділенням із пересиченого твердого розчину всередині них дрібних нанорозмірних часточок вторинних боридів (внаслідок постійного підігрівання ближчих до підкладки ламелей тими, які кристалізувалися у верхніх шарах покриття).

Перелічені структурні особливості ламелей аналізували, фрактографічно досліджуючи злами покриттів після випробувань зразків на когезивну міцність. Адже за зламами покриттів (як тривимірними відбитками найменш енерговитратного шляху поширення руйнування за випробувань на когезивну міцність), сформованими за обох режимів напилування, можна виявити складники їх структури з найнижчою міцністю до розтягу.

Фрактографічні особливості ЕДП за випробувань на когезивну міцність.

На зламах покриттів, напилених ПД 90X17P2ГС за різного тиску повітряного потоку, не вивили особливих відмінностей на макрорівні (рис. 2). Зафіксували лише більші перепади по висоті зламу покриття, сформованого за дозвукової швидкості (рис. 2b), що свідчило про його більшу макронеоднорідність.

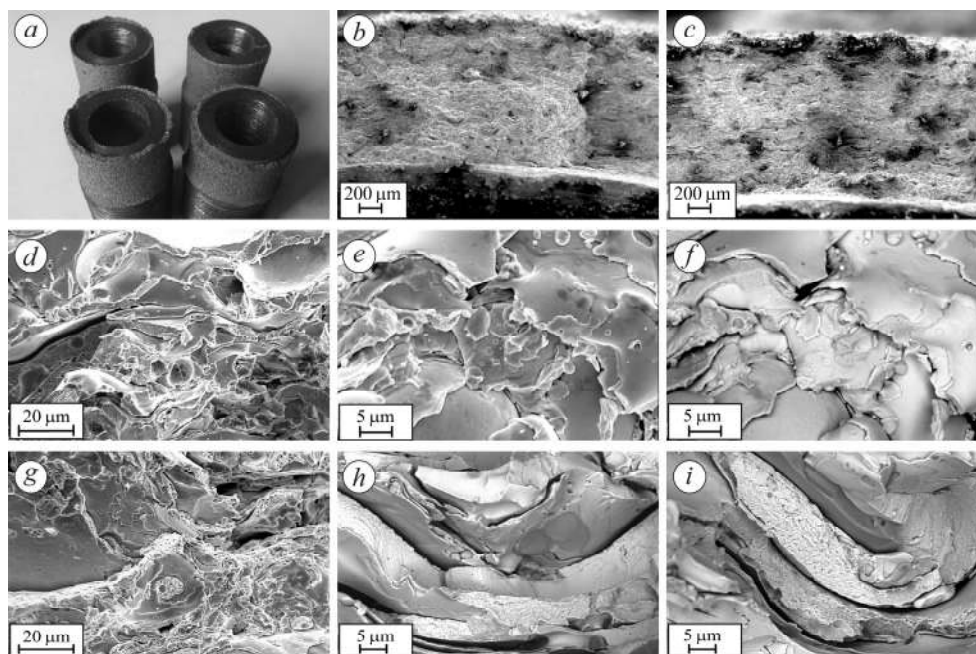


Рис. 2. Макро- (a–c) та мікрофрактограми (d–i) зафіксовані після випробувань на когезивну міцність ЕДП з ПД 90X17P2ГС, сформованих за тиску розпилювального повітря 0,6 (a, b, d–f) та 1,2 МПа (c, g–i).

Fig. 2. Macro- (a–c) and microfractograms (d–i) obtained after cohesive strength testing of arc sprayed coatings with 90X17P2ГС CW, formed under a spray air pressure of 0.6 (a, b, d–f) and 1.2 MPa (c, g–i).

Детальніший аналіз зламів обох варіантів покриттів виявив на них, окрім міжламелярних розшарувань, ще й значні за площею ділянки крізьламелярного руйнування (по тілу ламелей). Співвідношення їх площ оцінювали за фрактографіями, зафіксованими за меншої роздільної здатності (рис. 2d, g), а деталі – за більших збільшень (рис. 2e, f, h, i). Встановили, що за нижчого тиску повітря в покритті формувалися округлі ламелі (рис. 2d–f), а за вищого – вузькі і довгі (рис. 2g–i). За вищого тиску швидкість краплин розплаву на шляху до зразка

вдвічі вища, ніж за нижчого, і тому в момент контакту з підкладкою вони деформувалися сильніше, а сформовані з них ламелі ставали вузькими і довгими.

Прошарки міжламелярних оксидів були товстішими на зламі покриття, сформованому за нижчого тиску повітря (рис. 3а). Глибокі вторинні тріщини відокремлювали суміжні ламелі, що свідчило про слабку когезію між ними. На поверхні окремих ламелей вирізняли торці оксидних прошарків. Адже за нижчого тиску повітря політ краплин розплаву ПД з температурою до 2000°C до поверхні зразка та їх високотемпературне окиснення тривали довше, ніж за вищого, тому ці прошарки були товстіші. За вищого тиску розпилювання вони були значно тоншими і важче виявлялись на зламах (рис. 3б).

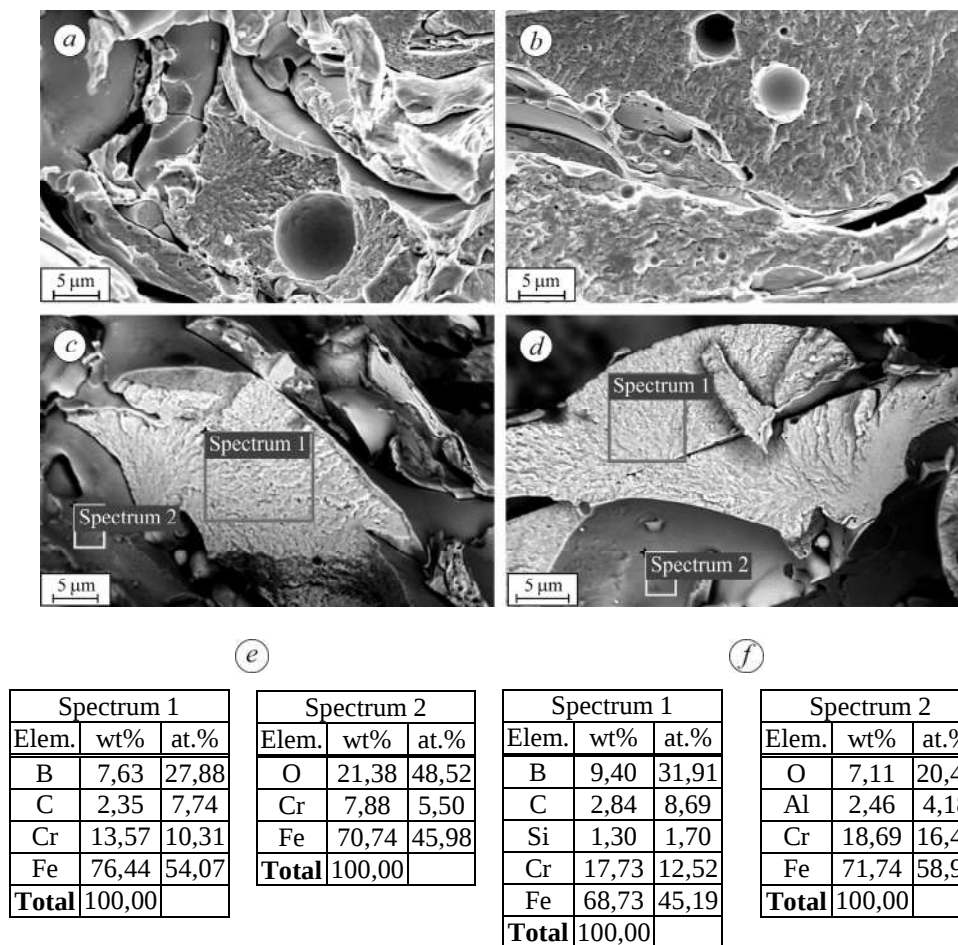


Рис. 3. Фрактограми електродугових покриттів (а–д), сформованих за тиску повітря 0,6 (а, с, е) та 1,2 МПа (б, д, ф) з ПД 90Х17Р2ГС і випробуваних на когезивну міцність, та відповідні результати мікрорентгенівського спектрального аналізу (е, ф), отримані на зламах окремих ламелей (с, д – Spectrum 1) та на поверхнях міжламелярних оксидних прошарків (с, д – Spectrum 2).

Fig. 3. Fractograms of arc sprayed coatings (a–d), formed under air pressure of 0.6 (a, c, e) and 1.2 MPa (b, d, f) from 90X17P2GC CW and tested for cohesive strength and corresponding X-ray spectral analysis data (e, f), obtained on the fracture surfaces of individual lamellas (c, d – Spectrum 1) and on the surfaces of interlamellar oxide layers (c, d – Spectrum 2).

Але основний наслідок використання надзвукового повітряного потоку для формування ЕДП з ПД – поява на зламі більшої кількості крихких кризьламелярних (по тілу ламелей) відколів (рис. 2h, i та 3b, d) порівняно з покриттям, отриманим

дозвуковим потоком (рис. 2d та 3a, c). Практично плоскі ламелі такого покриття (рис. 2g–i) відрізнялися від округліших, сформованих за нижчого тиску (рис 2d–f). Зрозуміло, що значно більша частина поверхні округлих ламелей була сприятливо (майже нормально) орієнтована до прикладених ззовні напружень розтягу за випроб на когезивну міцність. Тоді як у покритті з плоскими ламелями лише їх торці могли відповідати цій умові. Тому в покритті з округлішими ламелями, що утворилися за дозвукової швидкості повітряного потоку, основним механізмом руйнування за розтягу були розшарування внаслідок відокремлення суміжних ламелей. І їх низьку когезію спричинили товсті прошарки крихких оксидів на їх поверхні та нормальна орієнтація значної частини поверхні округлих ламелей відносно зовнішніх напружень.

Водночас за надзвукової швидкості повітряного потоку під час розпилювання ПД у покритті формувалася текстура з однонаправлених тонких ламелей з розвиненою мережею тоненьких прошарків оксидів між ними. За одновісного розтягу когезивну міцність покриття визначали напруження, прикладені до тоншого перерізу ламелей. Вважали, що шляхом міжламельного розшарування спочатку відокремлювалась деяка частина ламелей (на коротших ділянках їх меж, нормально орієнтованих до напружень і послаблених тонким прошарком крихкого оксиду). Адже руйнування будь-яких матеріалів відбувається вздовж шляху з найнижчим опором його поширенню, і розділені прошарками оксидів торці окремих вузьких ламелей відповідали цій умові. Ці пошкодження створювали концентрацію напружень у суміжних, менш сприятливо розташованих, ламелях, полегшуючи їх руйнування. Проте відбувалось воно вже не міжламельно, а за механізмом крізьламельного відколу (рис. 2g, h, i). Отже, когезивна міцність покриття, сформованого у надзвуковому повітряному потоці, залежить від енерговитрат не лише на міжламельне розшарування, але і на крізьламельне відколювання.

Подібні ділянки крізьламельного відколу виявляли також на зламі покриття, сформованого розпиленням ПД у дозвуковому повітряному потоці (рис. 3a, c), але у цьому випадку їх було значно менше. Тоді як на зламі покриття, отриманому у надзвуковому потоці, вони були визначальними (рис. 3b, d). Більше того, оксидні прошарки вздовж довших меж ламелей орієнтовані в напрямі дії напружень розтягу і розташовувались перпендикулярно до зламу покриття. Така їх орієнтація ускладнювала поширення руйнування, оскільки сприяла утворенню відгалужень у вигляді вторинних тріщин, які відхилялися від магістрального напрямку руйнування і поширювались вздовж ламельної текстури, спрямованої в глибину зламу. За розгалуження тріщини напружено-деформований стан у вершинах кожного з відгалужень слабшає, спричиняючи зростання енерговитрат на руйнування матеріалу. Сліди таких відгалужень від поверхні зламу у вигляді глибоких розшарувань, які розпочинались на його поверхні і поширювались вглиб, фіксували на переходах практично між усіма вузькими ламелями покриття, отриманого за вищого тиску повітряного струменя (рис. 2h, i), що також узгоджується зі зростанням його когезивної міцності.

Зауважили також певні особливості ділянок крізьламельного відколу в обох аналізованих варіантах покриттів (рис. 3c, d). Зокрема, на фасетках відколу зафіксували невисокий рельєф з віялоподібних гребенів відриву, які нагадували річкові візерунки, що розпочинались на межах ламелей і поширювались на весь їх переріз. Аналіз цих ділянок з допомогою детектора зворотно-розсіяних електронів (BSD) виявив сліди дуже дрібних (нанорозмірних) часточок. Вважали, що це вторинні бориди типу $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$, які забезпечили покриттям високу твердість (див. рис. 1). Оскільки подібні сліди таких часточок на зламі ламелі покриття, напиленого за вищого тиску повітря, були менш помітні (рис. 3d), а його твердість виявилась дещо вищою, то припустили, що розміри боридів у цьому випа-

дку були ще меншими, а ефект дисперсійного зміцнення, відповідно, ще відчутнішим, ніж у ламелях сформованих за нижчого тиску.

Для підтвердження наявності боридів всередині ламелей порівняли вміст елементів на їх поверхні і в тілі (рис. 3e, f). Виявили, що вміст бору на ділянках крізьзеренного відколу в ламелях покриття, напиленого за вищого тиску повітря, був більшим (рис. 3f, Spectrum 1), ніж за нижчого (рис. 3e, Spectrum 1). Отже, бориди всередині ламелей, сформованих за надзвукової швидкості повітряного потоку, забезпечили вищі і твердість, і когезивну міцність ЕДП.

Подібний аналіз підтвердив, що в обох покриттях ламелі вкриті шаром оксидів (рис. 3e, f, Spectrum 2). Причому на поверхні ламелей у покритті, сформованому за вищого тиску повітря, вміст кисню, як правило, був нижчим, ніж за нижчого. Це ознака інтенсивнішого окиснення крапель розплаву ПД під час польоту до поверхні зразка і, як наслідок, формування товстішого шару оксидів на поверхнях ламелей в ЕДП, сформованому за нижчого тиску.

Враховуючи результати фрактографічних досліджень, вважали обґрунтованим застосування надзвукового повітряного потоку для напилування ЕДП, щоб поліпшити їх властивості.

ВИСНОВКИ

З використанням надзвукового повітряного потоку для розпилювання ПД 90X17P2ГС отримано структурно однорідніші покриття з тоншими ламелями та меншою товщиною міжламелярних оксидних прошарків. Через це когезивна міцність покриття збільшилась удвічі, на 30% підвищилась його мікротвердість та на 10% знизилась залишкові напруження розтягу. Суттєве поліпшення механічних властивостей такого покриття фрактографічно пояснили домінуванням на його зламі ознак механізму крізьламелярного відколу, значним розгалуженням тріщини вздовж меж ламелей, орієнтованих перпендикулярно до прикладених напружень за випробувань на когезивну міцність, дисперсійним зміцненням самих ламелей нанорозмірними часточками вторинних боридів $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$, що підтверджено підвищеним вмістом бору на поверхні крізьламелярного відколу та його відсутність на поверхні міжламелярного розшарування. На основі виконаних фрактографічних досліджень зламів покриттів, випробуваних на когезивну міцність, виробили алгоритм якісного оцінювання їх когезії, заснованому на визначенні співвідношення площ крізьламелярних відколів та міжламелярних розшарувань, що припадають на одиницю площі зламу покриття.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту № 2022.01/0005 “Концепція відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу обладнання найважливіших галузей народного господарства України”.

1. Формування композиційних металокерамічних та металокарбідних електродугових покриттів / А. А. Карпеченко, М. М. Бобров, О. М. Дубовий, Т. О. Макруха, Є. Ю. Неделько // Вісник НТУ “ХПІ”: Сер. “Нові рішення в сучасних технологіях”. – 2021. – № 1 (7). – С. 9–17. DOI:10.20998/2413-4295.2021.01.02
2. Fauchais P. and Vardelle A. Thermal sprayed coatings used against corrosion and corrosive wear // Adv. Plasma Spray Appl. / Ed.: by Dr. H. Jazi, 2012. – EBOOK (PDF) ISBN978-953-51-6160-8, DOI:10.5772/34448
3. <https://www.researchgate.net/publication/221929505>,
<https://www.intechopen.com/chapters/32974>
4. Cavitation resistance of FeMnCrSi coatings processed by different thermal spray processes / R. F. Vaz, L. L. Silveira, J. R. Cruz, and A. G. M. Pukasiewicz // Hybrid Adv. – 2024. – 5. – Article number: 100125. DOI:org/10.1016/j.hybadv.2023.100125
5. Al/Al₂O₃ composite coating deposited by flame spraying for marine applications: alumina skeleton enhances anti-corrosion and wear performances / J. Huang, Y. Liu, J. Yuan, H. Li // J. Thermal Spray Technol. – 2014. – 23. – P. 676–683. DOI: 10.1007/s11666-014-0056-7

6. *Effects of boron carbide content on the microstructure and properties of atmospheric plasma-sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C composite coatings* / Y. Cao, C. Huang, W. Liu, W. Zhang, and L. Du // *J. Thermal Spray Technol.* – 2014. – **23**. – P. 716–724. DOI:10.1007/s11666-014-0061-x
7. *Elevation of the wear resistance of low-alloy structural steel by plasma-powder surfacing with alloys based on iron, chromium, and nickel* // E. F. Perepl'otchikov, K. B. Vasylyv, V. A. Vynar, I. O. Ryabtsev, and V. I. Zakiev // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 3. – P. 378–386. DOI:10.1007/s11003-018-0195-y
8. *Influence of electric impulse impact on the mechanical properties of plasma coatings* / A. N. Dubovoy, A. A. Karpechenko, M. N. Bobrov, and A. A. Novikov // *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. – 2015. – №1 (3). – P. 102–110. DOI: 10.15589/SMI.2015.01.04
9. *Preparation of MCrAlY-Al₂O₃ composite coatings with enhanced oxidation resistance through a novel powder manufacturing process* / M. Bai, B. Song, L. Reddy, and T. Hussain // *J. Thermal Spray Technol.* – 2019. – **28**. – P. 433–443. DOI: 10.1007/s11666-019-00830-y
10. *Student M. M., Pokhmurs'ka H. V., and Zadorozhna Kh. R. Structure and wear resistance of VC-FeCr and VC-FeCrCo coatings obtained by supersonic flame spraying.* // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 1. – P. 22–29. DOI:10.1007/s11003-018-0152-9
11. *Corrosion resistance of VC-FeCr and VC-FeCrCo coatings obtained by supersonic gas-flame spraying* / M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, Kh. R. Zadorozhna, V. M. Hvozdet-s'kyi, and Ya. Ya. Sirak // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 5. – P. 535–542. DOI:10.1007/s11003-019-00214-1
12. *Effect of spray particle velocity on cavitation erosion resistance characteristics of HVOF and HVAF processed 86WC-10Co4Cr hydro turbine coatings* / R. K. Kumar, M. Kamaraj, S. Seetharamu, T. Pramod, and P. Sampathkumaran // *J. Thermal Spray Technol.* – 2016. – **25**(6). – P. 1–14. DOI: 10.1007/s11666-016-0427-3
13. *Wear and corrosion resistance of cold-sprayed Cu-based composite coatings on magnesium substrate* / L. Zhang, S. Yang, X. Lv, and X. Jie // *J. Thermal Spray Technol.* – 2019. – **28**. – P. 1212–1224. DOI: 10.1007/s11666-019-00887-9
14. *The role of hydrogen in the formation of oxide-ceramic layers on aluminum alloys during their plasma-electrolytic oxidation* / V. Hutsaylyuk, M. Student, V. Posuvailo, O. Student, V. Hvozdet-s'kyi, P. Maruschak, and V. Zakiev // *J. Mat. Res. Techn.* – 2021. – **14**. – P. 1682–1696. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.082>
15. *Abrasive wear resistance and tribological characteristics of impulse hard anodized layers on aluminum alloy 1011 in tribocontact with steel and ceramics in various lubricants* / M. Student, I. Pohrelyuk, J. Padgurskas, V. Hvozdet-s'kyi, K. Zadorozhna, H. Veselivska, O. Student, and O. Tkachuk // *Coatings*. – 2023. – **13**(11). – Article number: 1883. <https://doi.org/10.3390/coatings13111883>
16. *Friction behavior of electric-spark coatings under the conditions of boundary lubrication* / V. M. Holubets, V. M. Dovhunyk, M. I. Pashechko, S. A. Kornii, and Y. S. Shpulyar // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 1. – P. 43–49. DOI: 10.1007/s11003-020-00395-0
17. *Corrosion resistance and protective properties of chromium coatings electrodeposited from an electrolyte based on deep eutectic solvent* / V. S. Protsenko, L. S. Bobrova, S. A. Korniy, A. A. Kityk, and F. I. Danilov // *Functional Materials*. – 2018. – **25**, № 3. – P. 539–545. DOI: 10.15407/fm25.03.539
18. *The bond strength of Al+Al₂O₃ cermet coatings deposited by low-pressure cold spraying* / M. Winnicki, A. Małachowska, T. Piwowarczyk, M. Rutkowska-Gorczyca, and A. Ambroziak // *Surf. and Coatings Technol.* – 2016. – **16**. – P. 743–752. DOI: 10.1016/j.acme.2016.04.014
19. *Study influence factors of the spraying process on the properties of electric arc spraying coatings* / M. Ageev, E. Solovuch, V. Lopata, O. Burlachenko, and N. Vihilianska // *Problems of Tribology*. – 2021. – **26**, № 1/99. – P. 74–83. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-99-1-74-83>
20. *Study of morphology and corrosion behavior of aluminum coatings on steel substrates under simulated acid rain conditions* / B. Li, L. Fan, Y. Wen, J. H. He, J. F. Su, S. Y. Zhou, S. F. Liu, and Z. Q. Zhang // *Metals*. – 2023. – **13**(3). – Article number: 613. <https://doi.org/10.3390/met13030613>
21. *Effect of sealing treatment on corrosion resistance of arc-sprayed Zn and Zn85–Al15 coatings* / B. Li, Z. Liu, J. He, J. Bai, H. Jiang, Y. Tian, Z. Zhang, and S. Liu // *Coatings*. – 2023. – **13**(6). – Article number: 1063. <https://doi.org/10.3390/coatings13061063>

22. *Microstructure and flight behaviors of droplet and its solidification in twin-wire arc sprayed Ni–Al composite coating* / J. X. Wang, Y. D. Wang, J. S. Liu, L. Y. Zhang, L. M. Gao, G. H. Zheng, H. X. Shen, and J. F. Sun // *Mat. Res.* – 2018. – 21(3). – Article number: e20170394. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0394
23. *Microstructure and tribocorrosion behavior of Al₂O₃/Al composite coatings: Role of Al₂O₃ addition* / J. Cheng, Y. Ge, B. Wang, L. Zhang, X. Hu, S. Hong, X. Liang, and X. Zhang // *J. Thermal Spray Technol.* – 2020. – 29. – P. 1741–1751. DOI: 10.1007/s11666-020-01062-1
24. *Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions* / M. Student, V. Hvozdet'skyi, T. Stupnyts'kyi, O. Student, P. Marushchak, O. Prentkovskis, and P. Skačkauskas // *Coatings.* – 2022. – 12(7). – Article number: 925. <https://doi.org/10.3390/coatings12070925>
25. *Механічні властивості та корозійна стійкість електродугових покриттів з порошкових дрітків* / В. М. Гвоздецький, М. М. Студент, І. М. Погрелюк, О. З. Студент, Х. Р. Задорожна // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2024. – 60, № 1. – С. 98–104.
26. *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, and V. M. Hvozdet'skyi // *Materials Science.* – 2016. – 52, № 2. – P. 165–172. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8>
27. *A review on the wear, corrosion and high-temperature resistant properties of wire arc-sprayed Fe-based coatings* / J. N. Ndumia, M. Kang, B. V. Gbenontin, J. Lin, and S. M. Nyambura // *Nanomaterials.* – 2021. – 11. – Article number: 2527. <https://doi.org/10.3390/nano11102527>
28. *Prediction of thermal spray coatings performance in marine environments by combination of laboratory and field tests* / R. Grinon-Echaniz, S. Paul, R. Thornton, P. Refait, M. Jeannin, and A. Rodriguez // *Coatings.* – 2021. – 11(3). – Article number: 320. <https://doi.org/10.3390/coatings11030320>
29. *Arc-sprayed Fe-based coatings from cored wires for wear and corrosion protection in power engineering* / Yu. Korobov, M. Filippov, A. Makarov, I. Malygina, N. Soboleva, D. Fantozzi, M. Andrea, H. Koivuluoto, and P. Vuoristo // *Coatings.* – 2018. – 8(2). – Article number: 71. DOI: 10.3390/coatings8020071
30. *Wilden J., Jahn S., and Reich S. Production of high quality anti-corrosion and wear-resistant wire arc sprayed coatings* // *Thermal Spray 2008: Thermal Spray Crossing the Borders on CD-ROM* / Ed.: E. Lugscheider; DVS-German Welding Society: Maastricht, The Netherlands, 2008. – P. 1521–1522. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2008p1521>
31. *Newbery P., Grant P. S., and Neiser R. A. The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying* // *Surf. Coat. Technol.* – 2005. – 195(1). – P. 91–101. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.12.035
32. *The influence of design parameters for electric arc equipment on the factors of spray process and properties of coatings* / M. Ageev, S. Dovzhuk, V. Nikolaychuk, and T. Khrypko // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences.* – 2019. – 1(32). – P. 114–122. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).114-122](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).114-122)
33. *Effect of spraying parameters on surface roughness, deposition efficiency, and microstructure of electric arc sprayed brass coating* / Z. U. Arif, M. Shah, E. U. Rehman, and A. Tariq // *Int. J. Adv. and Appl. Sci.* – 2020. – 7(7). – P. 25–39. DOI: 10.21833/ijaas.2020.07.004
34. *Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers – A review* / K. Szymański, A. Hernas, G. Moskal, and H. Myalska // *Surf. Coat. Technol.* – 2015. – 268. – P. 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.046>
35. *The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires* / M. Student, V. Gvozdet'skyi, O. Student, O. Prentkovskis, P. Marushchak, O. Olenyuk, and L. Titova // *J. Mech. Eng. – Strojnícky Časopis.* – 2019. – 69(4). – P. 133–146. <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0048>

Одержано 05.02.2024