

Наталя Імбірович¹, Олександр Повстяной²

¹Кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства
Луцький національний технічний університет (Луцьк, Україна)

E-mail: imbirovychnatalia@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8276-6349>

² Доктор технічних наук, професор, кафедра прикладної механіки та мехатроніки
Луцький національний технічний університет (Луцьк, Україна)

E-mail: povstjanoj@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1416-225X>

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ ТРИВКОСТІ ПОРИСТИХ ПРОНИКНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Відомо, що пористі проникливі матеріали під час фільтрування та очищення агресивних середовищ піддаються корозії, що призводить до виходу їх з ладу. Саме тому актуальним завданням є підвищення їх корозійну стійкість. Дана стаття присвячена дослідженню корозійної стійкості пористих проникних матеріалів з нанесеними на їх поверхню комбінованими захисними покриттями в розчинах кухонної солі та соляної кислоти. За допомогою поляризаційних кривих, знятих в потенціодинамічному режимі було встановлено, що потенціали корозії в розчині кухонної солі посуваються в позитивну сторону за умови нанесення на поверхню пористих проникних матеріалів комбінованого покриття, що свідчить про зниження корозійної активності поверхні. Струми корозії комбінованого захисного покриття для всіх досліджуваних систем понижуються на 3 порядки, а підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного знижує швидкість корозії покриву ще в п'ять разів.

Ключові слова: корозія, комбіноване покриття, пористі проникні матеріали, струм корозії, потенціал корозії, корозійне середовище.

Рис.:7. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку матеріалознавства супроводжується появою нових ідей створення та вдосконалення технології отримання пористих проникливих матеріалів (ППМ), які, перш за все, направлені на досягнення високих експлуатаційних характеристик та зниження їх собівартості.

Пористі проникливі матеріали під час експлуатації для очищення агресивних середовищ піддаються корозії. З метою вирішення цієї проблеми актуальним є нанесення комбінованого захисного покриття, що значно підвищить корозійну стійкість ППМ в умовах фільтрування та очищення агресивних середовищ [1, 2].

Постановка проблеми. Корозія ППМ завдає значної шкоди при застосуванні їх для очищення агресивних середовищ. Ця шкода визначається не стільки вартістю ППМ, а скільки витратами на захист від корозії, вартістю ремонтних робіт, а також збитками за рахунок тимчасового припинення нормального функціонування фільтрувального обладнання. Актуальність питань захисту від корозії ППМ із року в рік не зменшується, а навпаки, зростає.

З метою забезпечення своєчасного та надійного захисту ППМ від корозії необхідно більше уваги приділяти проведенню досліджень з оцінки небезпеки корозії і захисту від неї ППМ та підвищувати якість і надійність захисних покриттів, що наносяться на них.

На даний час розглядаються питання, пов'язані з процесом взаємодії поверхонь, що контактують у процесі їхнього взаємного переміщення. Створення і підбір триботехнічних матеріалів базуються на вирішенні взаємопов'язаних задач на основі вивчення механіки тертя і фізико-хімічних явищ, що відбуваються на поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контакт взаємодії твердих тіл спостерігається лише в окремих зонах, розміри і густина розміщення яких залежать від величини прикладеного навантаження, а також від напруженодеформованого стану контактів. Ці контакти залежать від геометричної форми мікронерівностей і механічних властивостей поверхневого шару.

Для нанесення корозійностійкого захисного електрометалізаційного покриття на деталях конструкційного призначення широко використовують метод вакуумно-дугового напилення та плазмоелектролітного оксидування (ПЕО), який є одним із найбільш сучасних і перспективних методів отримання на поверхні металів і сплавів захисних шарів, що мають комплекс важливих характеристик. Властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО.

Плазмове електролітне оксидування (ПЕО) [3, 4], відоме як ANOF (Anodishen Oxidation unter Funkenentladung) у Німеччині [5, 6, 7], ASD (Anodic Spark Deposition) у США, Європі і Китаї [8, 9], МДО (мікродугового оксидування) в Україні, і РЕО (Plasma Electrolytic Oxidation) у Великобританії, Швейцарії [10, 11], розвивається в останні двадцять років як нова інтенсивна технологія анодної обробці металів. Процес здійснюється в умовах поверхневих іскрових розрядів у результаті електро-і плазмохімічних реакцій і застосовується як для очищення поверхні металевих, так і для нанесення різних покриттів, властивості яких визначаються складом електроліту і режимом електролізу. Будучи по суті технологією, подібної традиційного анодування, ПЕО не вимагає ні застосування глибокого охолодження, ні використання з'єднань VI-валентного хрому, що робить цей метод екологічно дуже привабливим [12]. Метод нанесення покриттів ПЕО застосовують у машинобудуванні, літакобудуванні, медицині, обробці хірургічного інструменту, а також для спеціальних скоб та штифтів для лікування різноманітних переломів; можливе також декоративне застосування, адже змінюючи умови обробки можна змінювати кольори деталі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Комбінація покриттів дає можливість підвищити твердість, зносо-, корозійну стійкість, пластичність, відпірність контактним, динамічним навантаженням та вібрації. Таким чином, завдяки хімічному і фазовому складу та структурі кераміки, оксидні покриття отримані на вентилях металлах методом плазмоелектролітного оксидування володіють високими функціональними властивостями. Багатофункціональність оксидокерамічних покриттів сприяє їх широкому застосуванню у багатьох галузях промисловості, причому асортимент оброблюваних деталей постійно збільшується. Проте, можливості методу досліджені ще не повністю. Продовжуються роботи з удосконалення самого процесу синтезу оксидокераміки, розробляються нові електроліти, створюються нові джерела живлення. Однак, суттєвим недоліком процесу ПЕО є обмеження металів, на які можуть бути нанесені покриття.

Розширення сфери застосування методу плазмоелектролітного оксидування для інших металів і сплавів можливе через застосування комплексної технології газотермічного напилення дротів чи порошків на основі алюмінію з наступним плазмоелектролітним оксидуванням. Крім того, застосування такої комплексної технології дозволяє відновлювати спрацьовані деталі і продовжити ресурс обладнання.

Тому **метою** є комплексне металографічне дослідження корозійної тривкості пористих проникних матеріалів, які виготовлені з порошку сталі ШХ15 + графіт з подальшим нанесення захисного покриття нового покоління.

Виклад основного матеріалу. У даному науковій роботі досліджувалися зразки, які виготовлені з порошку ШХ15 + графіт. Порошок перемішувався у змішувачі протягом чотирьох годин, після чого сталевий порошок пресували у прес-формі протягом однієї хвилини (Рис. 1).



Рис. 1. Спресовані зразки складу ШХ 15 + графіт

Потім заготовки поміщали в індукційну піч і спікали при температурі 1200°C. Поверхневий захист зразків від корозії проводився у два етапи: спочатку наносили електрометалізаційне покриття, потім проводили синтез методом ПЕО.

Електрометалізаційне покриття напилювали вакуумно-дугового способом. Суть такого методу нанесення покриття полягає 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 підготовану поверхню, деформуються під час удару, приварюються або прилипають до поверхні, формуючи покриття [13].

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 (Рис. 2).

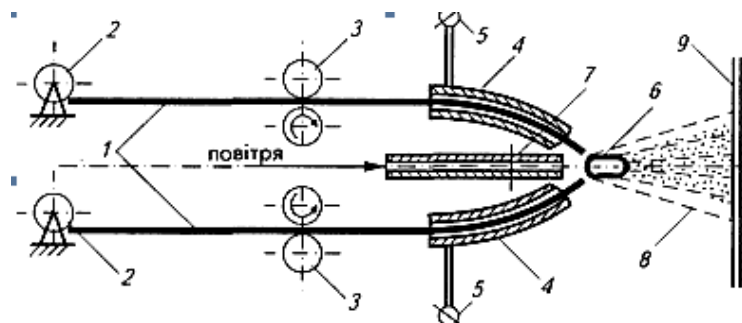


Рис. 2. Схема електрометалізатора:

1 – електродні дроти; 2 – касети; 3 – механізм подачі дроту; 4 – контактні наконечники; 5 – силові кабелі; 6 – електрична дуга; 7 – повітряне сопло; 8 – металоповітряна суміш; 9 – поверхня, на яку наносять покриття

Направлений до поверхні такий потік здатний формувати на ній покриття, що складається із zdeформованих після удару об поверхню краплин металевого розплаву з включеннями оксидів [14].

При електрометалізаційному напиленні електродні дроти нагріваються і розплавляються за рахунок енергії анодної та катодної плям, які роташовані на їх торцях. В дузі виділяють три області проходження струму: стовп дуги, анодну та катодну плями. Розміри останніх малі і керувати ними важко, в той час як довжина стовпа дуги може бути значною і нею легко керувати, змінюючи напругу. Стабільне розпилення відповідає режиму горіння дуги без коротких замикань, коли між середньою швидкістю

переміщення фронту плавлення і швидкістю подачі електродів встановлюється динамічна рівновага. За такого режиму газовий потік видаляє з електродів та розпилює порції рідкого металу ще до їх зіткнення і короткого замикання. Далі розплавлений метал знову нагромаджується на торцях електродів і цикл повторюється.

Процес ПЕО проходить в електролітичній плазмі іскрового (мікродугового) розряду в електроліті на основі дистильованої води. Кисень, що утворюється внаслідок дисоціації води, частково вступає в реакцію з металом і на його поверхні утворює оксид. Процес формування покриття проходить в електричному полі, яке є джерелом енергії для плазмохімічних реакцій на робочому електроді.

Стимулювати цей процес можуть також електрони, що виділяються внаслідок електрохімічних реакцій на аноді. У пробійному каналі сильно зростає температура, проходить дисоціація та іонізація електроліту і формується плазмовий згусток, в якому реалізуються плазмохімічні реакції синтезу оксиду.

Метод ПЕО дозволяє створювати на деталях і елементах конструкцій зносо- і корозійностійкі оксидокерамічні діелектричні покриття товщиною до 200 мкм і твердістю до 20 ГПа.

Після запропонованої поверхневої обробки отримали зразок, загальний вигляд якого представлено на рис. 3.



Рис. 3. Зразок ППМ з комбінованим покриттям

Корозійні властивості сплавів та їх покриттів вивчали за поляризаційними кривими, знятими в потенціодинамічному режимі на потенціостатах ПИ-50 та IPC-PRO+ПК IBM PC за стандартною трьохелектродною схемою з хлорсрібним електродом порівняння і допоміжним платиновим (Рис. 4.). На електроді виділяли робочу ділянку, площа якої становила $S=1 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, решта поверхні ізолювали епоксидним лаком.



Рис. 4. Загальний вид обладнання IPC-PRO

Будуючи поляризаційні криві, поверхню сплавів до -2 В катодно активували. Після катодної поляризації відразу ж проводили неперервну потенціодинамічну поляризацію зі швидкістю зміни потенціалу 5 мВ/с. Корозійними середовищами були 10% NaCl та 10% HCl. Для характеристики корозійної стійкості визначали струми та потенціали корозії. Реєстрацію поляризаційних кривих проводили після встановлення стаціонарного потенціалу. Струми та потенціали корозії визначали графічним методом. Крім того, зразки обстежували за допомогою мікроскопа МІМ-10 з комп'ютерною фіксацією поверхні.

Під час експлуатації анодованих сплавів у корозійному середовищі на окремих ділянках покриття у ППМ формуються вузькі канали з підвищеною іонною провідністю. Такі ділянки стають осередками локальних корозійних пошкоджень ППМ [15]. Активні аніони (наприклад, хлору і води) в цих місцях проникають через анодну плівку і взаємодіють із сплавом.

Плазмоелектролітичні покриття є інертні. Однак за наявності в них пор, що є каналами іскрових розрядів, також можливе корозійне руйнування металу чи сплаву. Все це знижує функціональні властивості покриття та скорочує термін експлуатації сплаву. У зв'язку з цим досліджено корозійну тривкість плазмове-електрохімічних ОКП на цирконієвому та титанових сплавах у різних корозійно-агресивних середовищах і визначено їх струми корозії, за якими судили про швидкість корозії у ППМ.

Відомо, що висока корозійна тривкість досягається утворенням тонкої захисної плівки оксидів. Однак, у тяжких умовах експлуатації та за наявності особливо агресивних середовищ (у їх числі і використані в роботі) ці плівки, внаслідок малої товщини та невисокої твердості, не забезпечують високих антикорозійних властивостей.

Струми корозії покриттів I_{cor} , за якими судили про швидкість корозії матеріалу, понижуються для всіх досліджуваних систем, а вищий ефект від створення ОКП проявляється в більш агресивних середовищах.

Аналіз одержаних поляризаційних кривих показує, що формування ОКП відбивається на електрохімічних параметрах корозії ППМ, тобто значення струмів корозії зменшуються. Ця зміна пояснюється меншим розчиненням компонентів сплаву.

Потенціал корозії корозійно нетривкого ППМ за дії розчину 10% HCl має від'ємне значення -370 мВ, а струм корозії – 80 мА/м².

Під час формування на ППМ ОКП струм корозії зменшується на $1...2$ порядки залежно від складу електроліту, в якому синтезували покриття. Так покриття, синтезовані в менш концентрованому електроліті, який містить луг та рідке скло має найменшу корозійну тривкість з тих, які синтезували в більш концентрованих електролітах і має значення $1,2 \cdot 10^{-3}$ А/м². З подальшим збільшенням концентрації електроліту струми корозії i_{cor} ОКП понижуються (Рис. 5.).

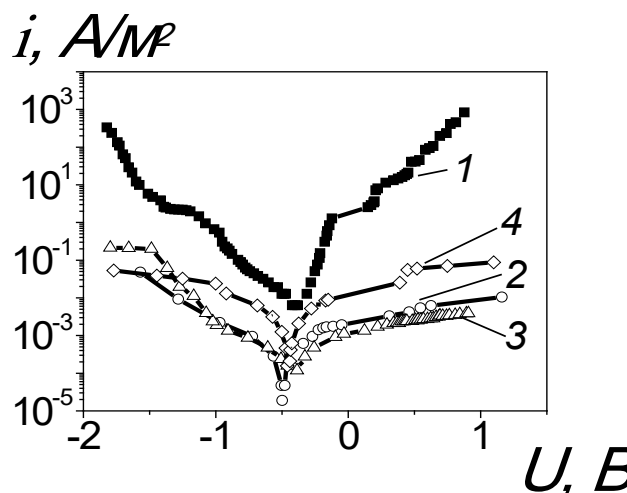


Рис. 5. Поляризаційні криві ППМ (1) та його ОКП (2, 3) в розчині 10% HCl (див. табл.1)

Таблиця 1. Потенціал та струм корозії ППМ та покриву на ньому за різних режимів окисдування

	Корозійне середовище	Склад електроліту, г/л				I_a/I_c А/дм ²	τ , хв	U_{cor} , В	i_{cor} , А/м ²
		КОН	р.с.	CrO ₃	H ₂ O ₂				
1	10%NaCl	-	-	-	-	-	-	0,48	0,82
2		10	15	-	-	20/20	20	0,41	9,09·10 ⁻⁴
3		10	15	-	-	20/30	40	0,24	1,63·10 ⁻⁴
4		10	15	0,1	-	20/30	40	0,26	6,20·10 ⁻⁴
1	10%HCl	-	-	-	-	-	-	0,37	8,07·10 ⁻²
2		10	15	-	10	20/20	30	0,41	0,21·10 ⁻⁴
3		10	15	-	-	20/20	30	0,50	1,39·10 ⁻⁴
4		3	2	-	-	20/20	20	0,45	12,07·10 ⁻⁴

Покриття, яке отримане в електроліті складу 10 г/л КОН + 15 г/л р.с., має значення струму корозії 1,39·10⁻⁴ А/м², а при введенні в електроліт 10 г/л Н₂О₂ понижує i_{cor} до значення 1,21·10⁻⁴ А/м².

Такий результат, очевидно, пов'язаний із поєднанням високої твердості та товщини покриву на ППМ [16-18].

У більш агресивному середовищі кухонної солі значення струму та потенціалу корозії незахищеного ППМ рівне відповідно 0,82 А/м² та -0,48 В. Так як покриття, отриманий в електроліті малої концентрації, у менш агресивному середовищі соляної кислоти погано себе проявив, то в подальших експериментах було недоцільно досліджувати такий покриття.

За аналізом даних встановлено, що струми корозії ОКП для всіх досліджуваних систем понижуються на 3 порядки. Покриття, синтезований в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. має значення струму корозії 9,09·10⁻⁴ А/м². Однак підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного понизило швидкість корозії покриву ще в п'ять разів.

Додавання до такого електроліту 0,1 г/л CrO₃ значення струму корозії ненабагато підвищило (Рис. 6., крива 4).

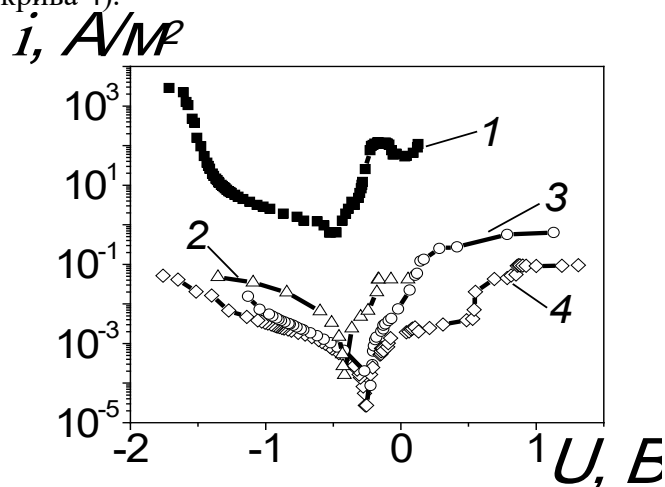
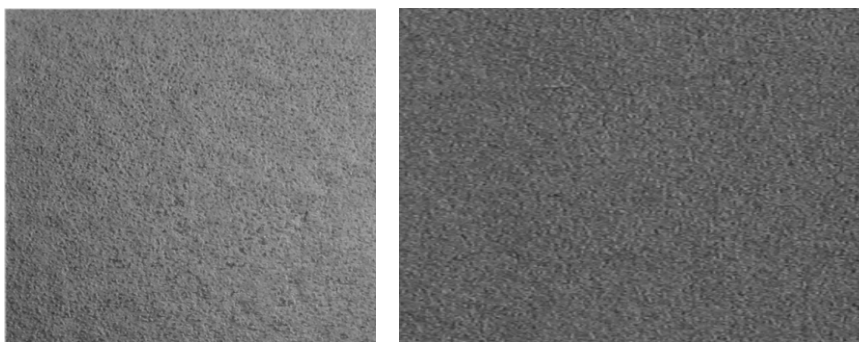


Рис. 6. Поляризаційні криві ППМ (1) та його оксидокерамічного покриву (2, 3, 4) в розчині 10%NaCl (див табл. 1)

Потенціали корозії в розчині кухонної солі посуваються в позитивну сторону за синтезу всіх ОКП, що теж свідчить про зниження корозійної активності поверхні.

На рис. 7 зображено покрив ППМ після корозії в агресивних середовищах за анодної поляризації. ППМ в агресивних середовищах зазнає корозію. Однак, покрив, навіть з оцінки зовнішнього вигляду, не кородує. На даному рисунку представлено фотографію ОКП після корозії в високо агресивному середовищі 10% NaCl. В розчині соляної кислоти загальний вигляд покриття не змінюється, а більш детально дослідити його властивості можна за допомогою поляризаційних кривих.



*Рис. 7. Загальний вигляд оксидокерамічного покриття на ППМ після корозії в середовищах:
а – 10%NaCl; б – 10%HCl.*

Отже, кращу корозійну тривкість мають покриття, синтезовані в електролітах більшої концентрації [19]. Ведення в електроліт перекису водню підвищує опір корозії, а оксиду хрому набагато його знижує. Найбільшої корозійної тривкості можна досягти, синтезувавши покрив в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла за більших густин струмів.

Висновки. За аналізом даних встановлено, що струми корозії ОКП для всіх досліджуваних систем знижуються на 3 порядки. Покриття, синтезоване в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. має значення струму корозії $9,09 \cdot 10^{-4}$ А/м². Однак, підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного понизило швидкість корозії покриття ще в п'ять разів.

Додавання до такого електроліту 0,1 г/л CrO₃ значення струму корозії ненабагато підвищує. Потенціали корозії в розчині кухонної солі посуваються в позитивну сторону за синтезу всіх ОКП, що теж свідчить про зниження корозійної активності поверхні.

Отже, кращу корозійну тривкість мають покриття для ППМ, які синтезовані в електролітах більшої концентрації, тобто антикорозійний ефект покриттів збільшується з ростом агресивності корозійного середовища. Ведення в електроліт перекису водню підвищує опір корозії, а оксиду хрому набагато його знижує.

Експериментально встановлено, що зменшення концентрації електроліту від 10 г/л КОН та 15 г/л р.с. та 10 г/л H₂O₂ до 10 г/л луку та 15 г/л рідкого скла знижує струм корозії покриття в 5 разів.

Виявлено, що за вищих співвідношень струмів анодного до катодного струми корозії покриттів знижуються в 6 разів, а найбільшої корозійної тривкості можна досягти, синтезувавши покрив в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла за більших густин струмів.

Список використаних джерел

1. Студент, М. М. Корозійна стійкість плазмово-електролітичних шарів на сплавах і покриттях системи Al–Cu–Mg для різних режимів термічної обробки / М. М. Студент, В. М. Посувайло, Х. Г. Веселівська // *Матеріалознавство*. – 2018. – №53. – С. 789-795.
2. Шацький, І. П. Оптимізація міцності двошарового покриття для конкретних умов локального навантаження / І. П. Шацький, Л. Ю. Ропяк, М. В. Маковійчук // *Сила матеріалознавства*. – 2016. – № 48. – С. 726-730.
3. Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys / F. C. Walsh, C. T. J. Low, R. J. K. Wood, K. T. Stevens, J. Archer, A. R. Poeton & A. Ry-der // *Transactions of the IMF*. – 2009. – Vol.87, №3. – P. 122-135.
4. Electrodeposition of diamond-like carbon films on titanium alloy using organic liquids: Corrosion and wear resistance / T. Falcade, T. E. Shmitzhaus, O. G. Reis, A. L. Marin Vargas, R. Hübler, I. L. Mülle, C.-I. F. Malfatti // *Applied Surface Scienc.* – 2012. - Vol.263. – P. 18-24.
5. Области застосування шарів ANOF і композитів / П. Курц, В. Крісман, Н. Шнейдер // *Дослідження та технології кристалів*. – 1986. – №12. – С. 1603-1609.
6. Properties of oxide ceramic coatings on magnesium and titanium alloys which are synthesized in electrolyte plasma / Imbirovich N., Klavkov M.D., Posuvayilo V.M., Povstyanoy O. Yu. // *Powder Metall.* – 2015. – Vol.1, № 2. – P. 54-60.
7. Kaluđerović, M. R. Titanium dental implant surfaces obtained by anodic spark deposition – From the past to the future / M. R. Kaluđerović, J. P. Schreckenbach, H.-L. Graf // *Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 16. – P. 1429-1441.
8. Anodic Spark Deposition treatments to increase reliability of Ti6Al4V modular prostheses / B. D. Curto1, M. V. Diamanti1, P. D. Pria, F. Sbaiz, A. Cigada // *Applied Biomaterials & Biomechanics*. – 2009. – Vol. 7. – P. 153-159.
9. Spark channel propagation in a mi-crobubble liquid / V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin et al. // *Plasma Physics*. – 2016. – Vol. 42. – P.1074-1077.
10. Plasma Electrolytic Ox-igation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications / S. Sikdar, P. V. Menezes, R. Maccione, T. Jacob, P. L. Menezes // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11. – № 6. – P. 1375-1400.
11. Mohedano, M. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings / M. Mohedano, B. Mingo // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11. – P. 111-120.
12. Gibbs en-ergy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base / V. M. Posuvailo, M. D. Klavkiv, M. M. Student, Y. Y. Sirak, H. V. Pokhmurska // *Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 181. – P. 1-10.
13. Студент, М. М. Багатофункціональні електродугові покриття / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький – Львів : Простір-М, 2018. – 389 с.
14. Мікроструктура та абразивно-зносостійкість вібраційно-наплавленого металу сердечників базової системи Fe–Cr–B / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент та ін. // *Mater Sci.* – 2016. – Vol. 52. – P. 365-370.
15. Rud V. D. Technologies, structure, properties of porous permeable materials / V. D. Rud, O. Yu. Povstianoi, O. V. Zabolotnyi, L. S. Bohinskyi. – Lutsk : Lutsk NTU, 2015. – 325 p.
16. Modeling of Processes for Creation New Porous Permeable Materials with Adjustable Properties / O. Povstyanoy, O. Zabolotnyi, V. Rud, A. Kuzmov, H. Herasymchuk // [Advances in Design, Simulation and Manufacturing](#). – 2019. Vol. II. – P. 456-465.
17. Metallographic analysis and processing of images of microstructure of nozzles for sandblasting which are made by powder metallurgy / O. Povstyanoy, V. Sychuk, A. Makmyllan, V. Rud, O. Zabolotnyy // *Powder metallurgy*. – 2015. – Vol. 3, № 4. – P. 234-240.
18. Assessment of the quality of alternative fuels for gasoline engines / V. Tkachuk, O. Rechun, N. Merezhko, T. Bozhydnarik, T. Karavaiev // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. – 2019. – Vol. II. – P. 871-881.
19. Optimization of the Properties of Multilayer Porous Permeable Materials / O. Povstyanoy, V. D. Rud, N. Y. Imbirovych, T. N. [Halchuk](#), T. I. [Chetverzhuk](#), M. V. [Smal](#), A.V. [Dziubynskiy](#) // *Mater Sci.* – 2021. – Vol. 56. – № 4. – P. 530-535.

References

1. Student, M.M., Posuvailo, V.M., Veselivska, Kh.H. (2018). Corrosion resistance of plasma-electrolytic layers on alloys and coatings of the Al–Cu–Mg system for different modes of heat treatment. *Materials Science*, 53, 789–795. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0137>
2. Shatskyi, I.P., Ropiak, L.Iu., Makoviichuk, M.V. (2016). Optimizing the strength of a two-layer coating for specific conditions of local load. *Power of Materials Science*, 48, 726–730. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9817-5>
3. F. C. Walsh, C. T. J. Low, R. J. K. Wood, K. T. Stevens, J. Archer, A. R. Poeton & A. Ryder (2009) Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys. *Transactions of the IMF*, 87(3), 122-135, DOI: 10.1179/174591908X372482
4. Falcade, T., Shmitzhaus, T.E., Reis, O.G., Vargas, A.L.M., Hübler, R., Mülle, I. L., Malfatti, C.F. (2012). Electrodeposition of diamond-like carbon films on titanium alloy using organic liquids: Corrosion and wear resistance. *Applied Surface Scienc*, 263, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2012.08.052>
5. Kurz, P., Krysmann, W., Schneider, H.G. (1986). Application Fields of ANOF Layers and Composites. *Crystal Research and Technology*, 12(12), 1603–1609. doi: 10.1002/crat.2170211224
6. Imbirovich, N., Klappkov, M.D., Posuvayilo, V.M., Povstyanoy, O.Yu. (2015). Properties of oxide ceramic coatings on magnesium and titanium alloys which are synthesized in electrolyte plasma. *Powder Metall*, 1(2), 54-60. doi: [10.1007/s11106-015-9678-7](https://doi.org/10.1007/s11106-015-9678-7)
7. Kaluderović, M.R., Schreckenbach, J.P., Graf, H.-L. (2016). Titanium dental implant surfaces obtained by anodic spark deposition – From the past to the future. *Materials Science and Engineering*, 16, 1429-1441. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.068>
8. Curto, B.D., Diamanti, M.V., Pria, P.D., Sbaiz, F., Cigada, A. (2009). Anodic Spark Deposition treatments to increase reliability of Ti6Al4V modular prostheses. *Applied Biomaterials & Biomechanics*, 7, 153-159. DOI: 10.1007/S11999-016-4973-2
9. Panov, V.A., Vasilyak, L.M., Vetchinin, S.P. et al. (2016). Spark channel propagation in a microbubble liquid. *Plasma Physics*, 42, 1074–1077. DOI: 10.1134/S1063780X16110064
10. Sikdar, S., Menezes, P.V., Maccione, R., Jacob, T., Menezes, P.L. (2021). Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications. *Nanomaterials*, 11(6), 1375-1400. DOI: 10.3390/nano11061375
11. Mohedano, M., Mingo, B. (2021). Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings. *Coatings*, 11, 111-120. DOI: 10.3390/coatings11010111
12. Posuvailo, V.M., Klappkiv, M.D., Student, M.M., Sirak, Y.Y., Pokhmurska, H.V. (2017). Gibbs energy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base. *Materials Science and Engineering*, 181, 1-10. doi: 10.1088/1757-899X/181/1/012045
13. Student, M.M., Pokhmurska, H.V., Hvozdetzkyi, V.M. (2018). *Bahatofunktsionalni elektroduhovi pokryttia*. Lviv: Prostir-M.
14. Voitovych, A.A., Pokhmurska, H.V., Student, M.M., et al. (2016). Microstructure and abrasion-wear resistance of the vibration-deposited metal of cores of the Fe–Cr–B basic system. *Materials Science*, 52, 365–370. doi: [10.1007/s11003-016-9965-6](https://doi.org/10.1007/s11003-016-9965-6)
15. Rud, V.D., Povstianoi, O.Yu., Zabolotnyi, O.V., Bohinskyi, L.S. (2016). *Technologies, structure, properties of porous permeable materials*. Lutsk: NTU.
16. Povstyanoy, O., Zabolotnyi, O., Rud, V., Kuzmov, A., Herasymchuk, H. (2019). Modeling of Processes for Creation New Porous Permeable Materials with Adjustable Properties. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing, II*, 456–465. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_46.
17. Povstyanoy, O., Sychuk, V., Makmyllan, A., Rud, V., Zabolotnyy, O. (2015). Metallographic analysis and processing of images of microstructure of nozzles for sandblasting which are made by powder metallurgy. *Powder metallurgy*, 3(4), 234-240. doi: [10.1007/s11106-015-9705-8](https://doi.org/10.1007/s11106-015-9705-8)
18. Tkachuk V., Rechun O., Merezhko N., Bozhydarnik T., Karavaiev T. (2019). Assessment of the quality of alternative fuels for gasoline engines *Advances in Design, Simulation and Manufacturing, II*, 871-881. doi: [10.1007/978-3-030-22365-6_87](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_87)
19. Povstyanoy, O., Rud, V.D., Imbirovych, N.Y., [Halchuk](#), T.N., [Chetverzhuk](#), T.I., [Smal](#) M.V., [Dziubynskyi](#) A.V. (2021). Optimization of the Properties of Multilayer Porous Permeable Materials. *Mater Sci*, 56(4), 530-535 (2021). doi: [10.1007/s11003-021-00460-2](https://doi.org/10.1007/s11003-021-00460-2)

Отримано 21.07.2023

UDK 620.197.2:677.631.2

Nataliya Imbirovych¹, Oleksandr Povstianoi²¹PhD, associate professor, Department of Materials Science
Lutsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)**E-mail:** imbirovychnatalia@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8276-6349>²DSn, professor, Department of applied mechanics and mechatronics
Lutsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)**E-mail:** povstjanoj@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1416-225X>

INVESTIGATION OF CORROSION RESISTANCE OF POROUS PERMEABLE MATERIALS WITH PROTECTIVE COATINGS OF THE NEW GENERATION

Porous permeable materials (PPM) are subject to corrosion during operation for cleaning aggressive environments. In order to solve this problem, it is urgent to apply a combined protective coating, which will significantly increase the corrosion resistance of PPM in the conditions of filtering and cleaning aggressive environments.

In order to ensure timely and reliable protection of PPM from corrosion, it is necessary to pay more attention to conducting studies on the assessment of the danger of corrosion and protection from it of PPM and to increase the quality and reliability of the protective coatings applied to them.

Plasma electrolytic oxidation (PEO), known as ANOF (Anodishen Oxidation unter Funkenentladung) in Germany, ASD (Anodic Spark Deposition) in the USA, Europe and China, MDO (micro-arc oxidation) in Ukraine, and REO (Plasma Electrolytic Oxidation) in Great Britain. In Switzerland, it has been developing in the last twenty years as a new intensive technology of anodic treatment of metals. The process is carried out under the conditions of surface spark discharges as a result of electro- and plasma-chemical reactions and is used both for cleaning the metal surface and for applying various coatings, the properties of which are determined by the composition of the electrolyte and the mode of electrolysis.

In this scientific work, samples made from BBS15 + graphite powder were studied. Then the blanks were placed in an induction furnace and sintered at a temperature of 1200 °C. The surface protection of the samples against corrosion was carried out in two stages: first, an electro-metallization coating was applied, then the synthesis was carried out by the PEO method.

During formation on the PPM OKP, the corrosion current decreases by 1...2 orders of magnitude depending on the composition of the electrolyte in which the coating was synthesized. Thus, the coating synthesized in a low-concentration electrolyte containing alkali and liquid glass has the lowest corrosion resistance of those synthesized in more concentrated electrolytes.

Coatings for PPM, which are synthesized in electrolytes of higher concentration, have better corrosion resistance, that is, the anti-corrosion effect of the coatings increases with the growth of the aggressiveness of the corrosive environment. The introduction of hydrogen peroxide into the electrolyte increases corrosion resistance, and chromium oxide significantly lowers it.

With the help of polarization curves taken in the potentiodynamic mode, it was established that the corrosion potentials in the table salt solution shift in the positive direction if porous permeable materials of the combined coating are applied to the surface, which indicates a decrease in the corrosion activity of the surface. Corrosion currents of the combined protective coating for all studied systems are reduced by 3 orders of magnitude, and an increase in the ratio of cathodic to anodic current density reduces the corrosion rate of the coating by another five times.

Key words: corrosion, combined coating, porous permeable materials, corrosion current, corrosion potential, corrosive environment.

Fig.: 7. References: 19.