

УДК 621.7.09:665.9

*А. Кітик^а, О. Кун^а, В. Павлік^б, М. Боча^б***ЕЛЕКТРОПОЛІРУВАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ МАНГАНУ У НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІЙ ЕВТЕКТИЧНІЙ СУМІШІ ETHALINE**^а ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна^б Інститут неорганічної хімії, Словацька Академія Наук, м. Братислава, Словацька Республіка

В даній роботі запропоновано використання новітнього екологічно безпечного розчинника Ethaline, що являє собою евтектичну суміш холін хлориду з етиленгліколем у молярному співвідношенні компонентів 1 до 2 відповідно, як високоефективного електроліту для полірування нержавіючої сталі з підвищеним вмістом Мангану. Показано, що процес анодного оброблення сталі у зазначеному електроліті сприяє збільшенню вмісту Хрому у поверхневому шарі сплаву та зменшенню вмісту Феруму за рахунок перебігу електрохімічної реакції $Fe^0 \rightarrow Fe^{2+} + 2e$. Встановлено, що процес електрополірування в Ethaline забезпечує вирівнювання поверхні нержавіючої сталі внаслідок розчинення неоднорідностей та дефектів. Зміна складу та зменшення ступеня шорсткості сталеві поверхні після електрополірування відбиваються на її фізико-механічних і корозійних властивостях. Продемонстровано, що потенціостатичне анодне оброблення нержавіючої сталі в Ethaline тривалістю 20 хв при 25°C дозволяє зменшити шорсткість поверхні металевих зразків на 30–55%, при цьому збільшити мікротвердість на 20–35% та покращити корозійний опір на 20–80% у порівнянні з неполірованою поверхнею. Виявлено, що максимальний ефект покращення зовнішнього вигляду поверхні нержавіючої сталі та її властивостей досягається при поліруванні в Ethaline при температурі 25°C і анодному потенціалі 2 В.

Ключові слова: нержавіюча сталь, електрополірування, евтектична суміш, годограф імпедансу, корозійна витривалість, коефіцієнт шорсткості, мікротвердість.

DOI: 10.32434/0321-4095-2019-127-6-92-98

Вступ

Нержавіюча сталь – дуже практичний матеріал та одночасно естетичний. Завдяки різноманітності марок і видів поверхонь вона в змозі задовольнити різні потреби в залежності від вимог, які ставляться перед матеріалом. Нержавіюча сталь використовується в усіх сферах діяльності людини, починаючи від важкого машинобудування і завершуючи електронікою та медициною. Нержавіюча сталь є незамінним матеріалом для виготовлення великого переліку медичних інструментів, засобів протезування та медичного обладнання. Очевидним є те, що вимоги до сталеві поверхні медичного призначення надзвичайно високі, тому біомедична нержавіюча сталь завжди проходить процедуру попереднього оброблення поверхні з метою покращення її зовнішнього вигляду та властивостей.

Добре відомо, що найефективнішим способом оброблення поверхні металів і сплавів є електрополірування (ЕП). ЕП забезпечує вирівнювання поверхні за рахунок розчинення мікронерівностей, дефектів, включень та забруднюючих елементів; для сплавів, як правило, відбувається зміна складу поверхневого шару та формування захисних металоксидних плівок, що сприяє додатковому покращенню властивостей поверхні: збільшенню мікротвердості, зносостійкості, корозійної витривалості, тощо [1].

Слід зауважити, що найрозповсюдженіші технології ЕП нержавіючої сталі базуються на використанні високих температур (≈ 60 – 85°C) і хімічно агресивних електролітів на основі концентрованих сумішей сульфатної та ортофосфатної кислот, іноді з додаванням Cr_2O_3 або гліцерину [2–7]. Такі електроліти, особливо з ураху-

ванням високих температур їх експлуатації, є небезпечними з точки зору впливу на здоров'я співробітників гальванічних ліній, стан промислового обладнання та навколишнє середовище. Зважаючи на це, для сучасної промисловості надзвичайно актуальною є задача пошуку високоєфективної та екологічнобезпечної альтернативи існуючим «класичним» технологіям ЕП нержавіючої сталі.

«Зеленою» альтернативою кислотним електролітам полірування можуть стати іонні рідини нового покоління – низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР), що характеризуються екологічністю, доступністю компонентів, простотою синтезу та унікальною комбінацією високої в'язкості і відносно високої електропровідності, яка є дуже вигідною для процесу електрополірування. Уперше можливість використання НЕР для анодного оброблення нержавіючої сталі продемонстрували співробітники Лейстерського університету Рудер та Ебботт [8]. Однак дослідження цих авторів були невичерпними і стосувалися лише нікельвмісної нержавіючої сталі SS 316.

Уявлення про електрополірування нержавіючої сталі в НЕР розвинуті доповнені в рамках наданої роботи. Особливості анодного оброблення з використанням НЕР розкриті на прикладі евтектичної суміші Ethaline для полірування нержавіючої сталі з підвищеним вмістом Мангану. Манган, як і Нікель, є аустенітутворюючим елементом, проте він є значно дешевшим. Окрім того, Манган у складі, сталі сприяє її зміцненню. Нержавіюча сталь, до складу якої входить Манган, зазвичай використовується в умовах підвищеного тертя. Привабливою особливістю нержавіючої сталі з Манганом є її пластичність, легкість витяжки та зварювання, пам'ять до деформації. Чудові механічні та антикорозійні властивості на ряду з привабливою вартістю цього матеріалу роблять нержавіючу сталь з підвищеним вмістом Мангану перспективною сировиною для багатьох виробництв, у тому числі і для створення медичного обладнання та інструментарію. Зауважимо, що дослідження характеристик та особливостей застосування мангановмісної нержавіючої сталі тільки набирають оберти, про що свідчать недавні публікації у провідних наукових виданнях [9–11].

Роботи щодо електрохімічного оброблення поверхні сталі з Манганом та впливу цього оброблення на властивості у літературі не надані, тому дана тематика є актуальною та лягла в основу наданої роботи.

Методика експерименту

Низькотемпературну евтектичну суміш Ethaline готували змішуванням холін хлориду (ChCl) з етиленгліколем (Etgl) у молярному співвідношенні компонентів 1 до 2 відповідно, витримували протягом 2 год за температури 70°C до повної гомогенізації та зневоднення, після чого охолоджували та використовували для експериментів. Зберігали евтектичну рідину в екзикаторі для запобігання тривалого контакту з повітрям і абсорбції води, що притаманно дослідній системі [12].

Для здійснення всіх експериментів використовували зразки нержавіючої сталі, товщина яких складала 0,2 мм, а площа 4 см². Елементний склад використаної сталі наведено у таблиці 1. Попередня підготовка зразків включала: механічне оброблення поверхні шліфувальним папером до отримання коефіцієнта шорсткості $R_a=0,78\pm0,2$ мкм, кілька секундне травлення у розчині HCl (1:1), знежирення магnezієвою сумішшю, промивання дистильованою водою та висушування.

Циклічні вольтамперограми (ЦВА) та спектри імпедансу отримували з використанням потенціостата Gamry Potentiostat/Galvanostat Reference 3000 (виробництва США) та термостатованої триелектродної скляної електрохімічної комірки. Зразки нержавіючої сталі використовували у якості робочого електрода, вуглецевий електрод з високорозвиненою поверхнею слугував допоміжним електродом, а у якості електрода порівняння використовували Ag-дріт, який зазвичай є псевдо-електродом порівняння для неводних розчинників типу Ethaline [13–15]. Швидкість сканування потенціалу при отриманні ЦВА варіювали від 5 мВ/с до 100 мВ/с. Вимірювання електрохімічного імпедансу виконували за стаціонарного корозійного потенціалу (E_{corr}) у діапазоні частот 10^5 – 10^{-2} Гц, амплітуда коливань потенціалу становила 5 мВ. Обробленням годографів імпедансу виконували з програмним забезпеченням Gamry Echem Analyst методом Levenberg-Marquardt.

Таблиця 1

Елементний склад зразків нержавіючої сталі

Елемент	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	C	Si
мас. %	72,27±0,12	12,17±0,08	10,19±0,09	1,52±0,03	0,60±0,05	0,25±0,05	0,32±0,02

Електрополірування сталевих зразків (тривалісткість оброблення 20 хв) здійснювали у потенціостатичному режимі з використанням тих же електрохімічної комірки та потенціостату. Всі електрохімічні експерименти виконували з автоматичною компенсацією IR складової.

Швидкість розчинення сталі визначали гравіметричним методом. Вимірювання коефіцієнту шорсткості R_a виконували з використанням приладу Surface Roughness Tester SRT 6210 (виробництва КНР). Мікротвердість зразків визначали за Віккерсом з використанням мікротвердоміра ПМТ-3. Вимірювання блиску виконували за допомогою блискоміра Gloss Meter YG 60S (виробництва КНР).

Результати та обговорення

ЦВА нержавіючої сталі отримані за різних швидкостей сканування потенціалу (v , мВ/с) у низькотемпературному евтектичному розчиннику Ethaline наведено на рис. 1. Розгортку потенціалу при отриманні ЦВА проводили від стаціонарного значення ($-0,195$ В) спочатку в анодний бік, а потім – у катодний з поверненням до стаціонарного потенціалу.

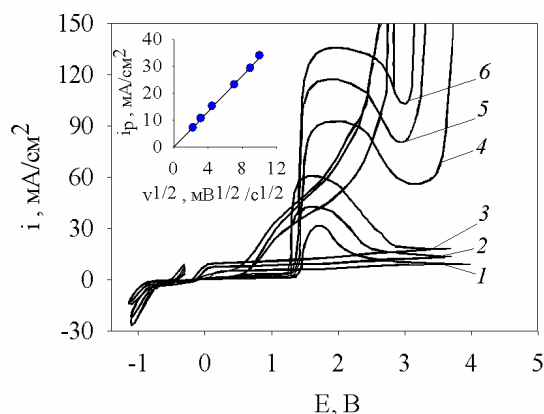


Рис. 1. Циклічні вольтамперограми нержавіючої сталі у Ethaline, отримані за різних швидкостей сканування потенціалу: 1 – 5 мВ/с, 2 – 10 мВ/с, 3 – 20 мВ/с, 4 – 50 мВ/с, 5 – 80 мВ/с, 6 – 100 мВ/с ($t=25^{\circ}\text{C}$)

Як видно з рис. 1, на анодних ділянках ЦВА присутні піки струму розчинення нержавіючої сталі. Відмітимо, що потенціали, які відповідають пікам струму, лише трохи зсуваються в бік більш позитивних значень при зростанні швидкості сканування потенціалу. А ось пасивна ділянка, що відбувається за піком розчинення, дуже відрізняється при зміні швидкості сканування: за низьких швидкостей розгортки потенціалу ($v=5-20$ мВ/с) пасивна ділянка достатньо

тривала, а при збільшенні швидкості (≥ 50 мВ/с) вона суттєво звужується. Звернемо особливу увагу на достатньо високі густини струмів на ЦВА для анодного процесу, що є особливістю цієї системи у порівнянні з водними кислими електролітами, де густини струму розчинення значно нижчі і обумовлені пасивацією поверхні сталевого електрода металооксидними плівками. Таким чином, можна зробити висновок, що для дослідної системи поява піка струму і пасивної ділянки обумовлені не «класичною» пасивацією поверхні електрода, а «сольовою» за рахунок формування в'язкого шару продуктів анодної реакції поблизу поверхні металевого зразка. Формування в'язкого шару продуктів анодної реакції є результатом їх сповільненої дифузії від поверхні електрода в об'єм електроліту за рахунок високої в'язкості Ethaline (48 сП за 25°C , в той час як для води це значення становить лише 0,89 сП за тієї ж температури). Врізка на рис. 1 демонструє лінійну залежність у координатах «струм піка–корінь квадратний швидкості сканування потенціалу», що підтверджує дифузійний характер піка густини струму.

Добре відомо, що найкращий результат електрополірування металів та сплавів досягається тоді, коли анодний процес відбувається в умовах сповільненої дифузії. З цієї точки зору електроліт Ethaline є надзвичайно перспективним середовищем для високоефективного анодного оброблення. Для електрополірування обраних зразків сталі з підвищеним вмістом Мангану було використано потенціали 1; 1,5; 2; 3,5 В. Експерименти потенціостатичної анодної обробки зразків було доповнено гравіметричними дослідями (визначали зміну маси зразків), разом з тим фіксували струм розчинення нержавіючої сталі, а також масу нерозчинних продуктів (часточки марганцю, що відокремлювали фільтруванням електроліту після зйомки ЦВА). Виконаний експеримент і розрахунки за законом Фарадея дозволили встановити залежність лінійної швидкості розчинення сталі (v , нм/с) від потенціалу (рис. 2), а також показати, що анодний струм розчинення на ЦВА відповідає електродному процесу (1), який відбувається зі 100% виходом за струмом. Таким чином, під час електрополірування нержавіючої сталі відбувається електрохімічне розчинення заліза і незначне зменшення концентрації Мангану на поверхні зразків за рахунок неелектрохімічного процесу.



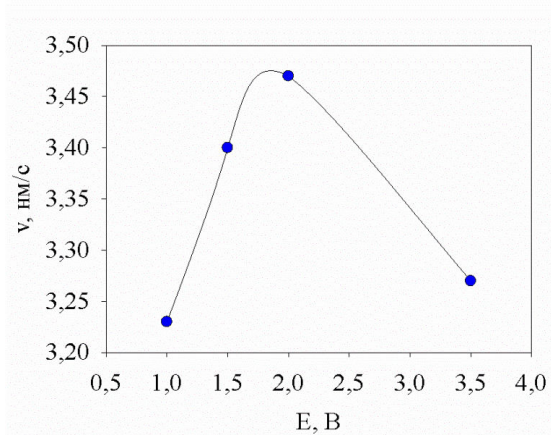


Рис. 2. Залежність лінійної швидкості розчинення нержавіючої сталі від потенціалу електрополірування у Ethaline ($t=25^{\circ}\text{C}$)

Зміна складу поверхні нержавіючої сталі після полірування викликає зміни її фізико-механічних характеристик. На рис. 3 зображено вплив потенціалу електрополірування на мікротвердість поверхні зразків нержавіючої сталі після анодного оброблення.

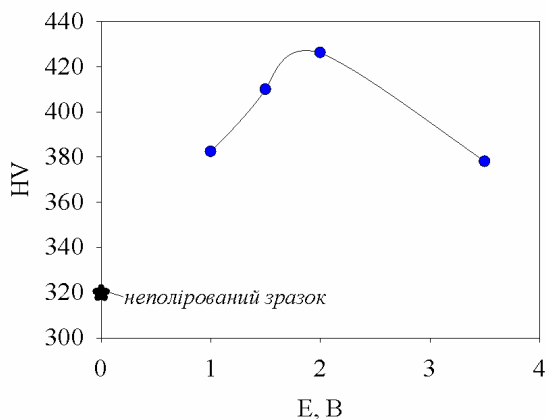


Рис. 3. Вплив потенціалу полірування нержавіючої сталі в Ethaline на мікротвердість поверхні після анодної обробки ($t=25^{\circ}\text{C}$)

Як видно з рис. 3, електрополірування нержавіючої сталі у електроліті Ethaline за будь-яких обраних потенціалів приводить до помітного збільшення мікротвердості поверхні зразків у порівнянні з неполірованою поверхнею. Зазначимо, що максимальний ефект збільшення мікротвердості спостерігається при використанні потенціалу полірування 2 В.

Пояснити збільшення мікротвердості поверхні нержавіючої сталі після полірування мож-

на наступним чином: по-перше, процес анодного оброблення супроводжується розчиненням заліза і, таким чином, відбувається збагачення поверхні зразків хромом, який є більш твердим; по-друге, електрополірування сприяє розчиненню неоднорідностей та дефектів поверхні, що забезпечує її вирівнювання (рис. 4) та покращення механічних характеристик і корозійної витривалості.

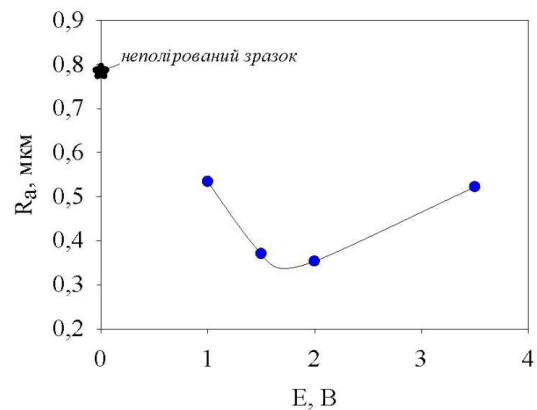


Рис. 4. Залежність ступеня шорсткості поверхні (R_a) зразків нержавіючої сталі від потенціалу електрополірування у Ethaline ($t=25^{\circ}\text{C}$)

Здійснені імпедансометричні дослідження корозійної витривалості дослідних зразків у розчині 10% NaCl (рис. 5,а) підтвердили той факт, що процес електрополірування нержавіючої сталі у Ethaline сприяє збільшенню корозійного опору зразків хімічно агресивному середовищу.

Еквівалентна електрична схема заміщення, яку використовували для моделювання системи сталевий зразок/розчин NaCl, наведена на рис. 5,б. Основними елементами цієї схеми є опір електроліту (R_{sol}), опір корозійному процесу (R_{corr}) та елемент сталої фази (CPE), який дозволяє визначити ємнісну складову (Y) та ступінь неоднорідності поверхні нержавіючої сталі (n). Як показали розрахунки (табл. 2), після електрополірування у Ethaline сталева поверхня характеризується зменшенням неоднорідності і ємності та збільшенням опору корозійному процесу. Відмітимо, що залежність параметра n від потенціалу полірування узгоджується із залежністю R_a від потенціалу.

Висновки

Низькотемпературний евтектичний розчинник Ethaline є екологічно безпечним та високо-ефективним електролітом полірування нержавіючої сталі. Використання цього електроліту для

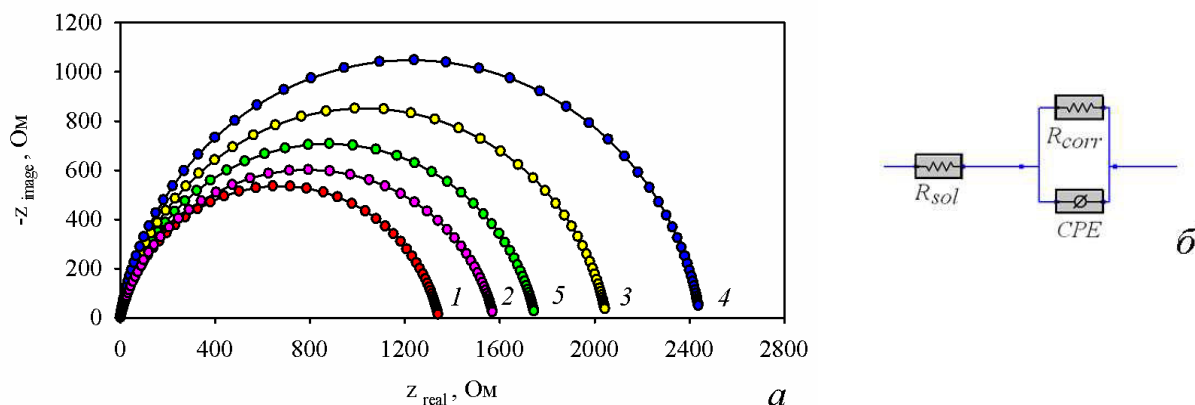


Рис. 5. Годографи імпедансу Найквіста (а) і еквівалентна електрична схема (б) для нержавіючої сталі у 10%-вому розчині NaCl до (1) та після електрополірування за різних потенціалів у Ethaline: 2 – 1 В, 3 – 1,5 В, 4 – 2 В, 5 – 3,5 В ($t=25^{\circ}\text{C}$)

Таблиця 2

Параметри еквівалентної електричної схеми, що моделює корозійну поведінку нержавіючої сталі у 10%-вому розчині NaCl (до та після електрополірування у Ethaline)

Потенціал електрополірування, В	Параметр			
	R_{sol} , Ом	Y , Ом $^{-1}$ с n см $^{-2}$	n	R_{corr} , Ом см $^{-2}$
– (неполірований зразок)	1,5±0,5	23,14	0,843	335,75
1,0		22,62	0,869	395,00
1,5		22,34	0,883	512,50
2,0		21,76	0,912	611,25
3,5		22,14	0,893	438,00

анодного оброблення сталеві поверхні навіть за невисокої температури (25°C) дозволяє отримати суттєве покращення не тільки зовнішнього вигляду металевих зразків, але й досягти помітного покращення властивостей (зменшення ступеня шорсткості, збільшення мікротвердості та корозійної витривалості).

Здійснені дослідження показали, що перевагою анодного оброблення нержавіючої сталі у електроліті Ethaline у порівнянні, наприклад, з механічним обробленням є не тільки суттєве вирівнювання поверхні, але й зменшення вмісту заліза та збільшення вмісту хрому на поверхні сплаву. Зазначимо, що така зміна кількісного складу поверхневого шару сплаву позитивно впливає на властивості поверхні.

Встановлено, що максимальний ефект електрополірування нержавіючої сталі у Ethaline досягається з використанням потенціалу анодного оброблення 2 В при температурі 25°C (максимальне зниження шорсткості та збільшення твердості і корозійної витривалості).

Подяка

Представлена робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України в рам-

ках держбюджетної молодіжної НДР «Високоєфективна анодна обробка біорезистентних сплавів медичного призначення з використанням екологічних іонних рідин нового покоління» (номер державної реєстрації 0119U002001); а також за підтримки Національної стипендіальної програми Словацької Республіки. Окрему вдячність за обговорення результатів автори публікації висловлюють проф. Данилову Ф.Й. та проф. Проценку В.С.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Han W., Fang F. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2019. – Vol.139. – P.1-23.
2. Lee S.-J., Lai J.-J. The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel // *J. Mater. Process. Technol.* – 2003. – Vol.140. – P.206-210.
3. Lin C.-C., Hu C.-C., Lee T.-C. Electropolishing of 304 stainless steel: Interactive effects of glycerol content, bath temperature, and current density on surface roughness and morphology // *Surf. Coat. Technol.* – 2009. – Vol.204. – P.448-454.

4. *Electropolishing* of CuZn brasses and 316L stainless steels: Influence of alloy composition or preparation process (ALM vs. standard method) / C. Rotty, A. Mandroyan, M.-L. Doche, J.Y. Hihn // *Surf. Coat. Technol.* – 2016. – Vol.307. – P.125-135.

5. *The effects* of parametric changes in electropolishing process on surface properties of 316L stainless steel / Z. Rahman, K.M. Deen, L. Cano, W. Haider // *Appl. Surf. Sci.* – 2017. – Vol.410. – P.432-444.

6. *Impact* of electrolyte concentration on surface gloss in electropolished stainless steel / Beamud E.M., Nunez P.J., Garcia-Plaza E., Rodriguez D., Gonzalez A., Garcia J. // *Proced. Manuf.* – 2017. – Vol.13. – P.663-670.

7. *Obtaining* tailored surface characteristics by combining shot peening and electropolishing on 316L stainless steel / Lopez-Ruiz P., Garcia-Blanco M.B., Vara G., Fernandez-Pariente I., Guagliano M., Bagherifard S. // *Appl. Surf. Sci.* – 2019. – Vol.492. – P.1-7.

8. *Voltammetric* and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid / A.P. Abbott, G. Capper, K.J. McKenzie, K.S. Ryder // *Electrochim. Acta.* – 2006. – Vol.51. – P.4420-4425.

9. *Possibility* of Mn substitution of Ni through evaluation of mechanical properties and corrosion resistance in superaustenitic stainless steel weld metal / C. Lee, Y. Lee, C. Lee, S. Hong // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2018. – Vol.733. – P.16-23.

10. *Yang Y., Qian H., Su Y.* Effect of Mn addition on deformation behaviour of 23% Cr low nickel duplex stainless steel // *Mater. Charact.* – 2018. – Vol.145. – P.606-618.

11. *Rasouli D., Kermanpur A., Najafizadeh A.* Developing high-strength, ductile Ni-free Fe–Cr–Mn–C–N stainless steels by interstitial-alloying and thermomechanical processing // *J. Mater. Res. Technol.* – 2019. – Vol.8. – P.2846-2853.

12. *The influence* of various factors on corrosion of mild steel in deep eutectic solvents / Rublova Y.D., Kityk A.A., Bannyk N.G., Protsenko V.S., Danilov F.I. // *Mater. Today Proceed.* – 2019. – Vol.6. – P.232-236.

13. *Kinetics* and mechanism of corrosion of mild steel in new types of ionic liquids / Kityk A.A., Rublova Y.D., Kelm A., Malyshev V.V., Bannyk N.G., Flis-Kabulska I. // *J. Electroanal. Chem.* – 2018. – Vol.823. – P.234-244.

14. *Electropolishing* of aluminium in a deep eutectic solvent / Kityk A.A., Protsenko V.S., Danilov F.I., Kun O.V., Korniy S.A. // *Surf. Coat. Technol.* – 2019. – Vol.375. – P.143-149.

15. *Electrodeposition* of Ni–TiO₂ composite coatings using electrolyte based on a deep eutectic solvent / Danilov F.I., Kityk A.A., Shaiderov D.A., Bogdanov D.A., Korniy S.A., Protsenko V.S. // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* – 2019. – Vol.55. – P.138-149.

Надійшла до редакції 14.09.2019

ELECTROPOLISHING OF STAINLESS STEEL WITH A HIGH CONTENT OF MANGANESE IN THE DEEP EUTECTIC MIXTURE ETHALINE

A. Kityk ^{a, *}, O. Kun ^a, V. Pavlik ^b, M. Boča ^b

^a Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

^b Institute of Inorganic Chemistry, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia

* e-mail: kitykanna7@gmail.com

In the present work, we consider the use of a novel environmentally friendly solvent Ethaline, which is a eutectic mixture of choline chloride with ethylene glycol in a molar ratio of components of 1:2 respectively, as a highly efficient electrolyte for electropolishing of stainless steel with high manganese content. It is shown that the process of anodic treatment of steel in the electrolyte based on Ethaline allows both increasing the content of chromium in a surface layer of the alloy and decreasing the content of iron due to the electrochemical reaction $Fe^0 \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$. It is found that the electropolishing process in Ethaline ensures smoothing the surface of stainless steel by dissolving heterogeneities and defects. A change in the composition of the steel surface and a decrease of the roughness after electropolishing affect physical-mechanical and corrosion properties. It is demonstrated that a 20-minute potentiostatic anodic treatment of stainless steel in Ethaline at 25°C reduces the surface roughness of metal samples by 30–55%, while the microhardness is increased by 20–35% and corrosion resistance is improved by 20–80% as compared with the unpolished surface. It is shown that the maximum effect of the improvement of the surface appearance of stainless steel and its properties is achieved when electropolishing is conducted in Ethaline at 25°C at an anode potential of 2 V.

Keywords: stainless steel; electropolishing; eutectic mixture; impedance spectra; corrosion resistance; roughness coefficient; microhardness.

REFERENCES

1. Han W., Fang F. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, vol. 139, pp. 1-23.

2. Lee S.J., Lai J.J. The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 140, pp. 206-210.

3. Lin C.C., Hu C.C., Lee T.C. Electropolishing of 304 stainless steel: interactive effects of glycerol content, bath temperature, and current density on surface roughness and morphology. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 204, pp. 448-454.

4. Rotty C., Mandroyan A., Doche M.L., Hihn J.Y. Electropolishing of CuZn brasses and 316L stainless steels: influence of alloy composition or preparation process (ALM vs. standard method). *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 307, pp. 125-135.

5. Rahman Z., Deen K.M., Cano L., Haider W. The effects of parametric changes in electropolishing process on surface properties of 316L stainless steel. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 410, pp. 432-444.

6. Beamud E.M., Nunez P.J., Garcia-Plaza E., Rodriguez D., Gonzalez A., Garcia J. Impact of electrolyte concentration on surface gloss in electropolished stainless steel. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 663-670.

7. Lopez-Ruiz P., Garcia-Blanco M.B., Vara G., Fernandez-Pariente I., Guagliano M., Bagherifard S. Obtaining tailored surface characteristics by combining shot peening and electropolishing on 316L stainless steel. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 492, pp. 1-7.

8. Abbott A.P., Capper G., McKenzie K.J., Ryder K.S. Voltammetric and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid. *Electrochimica Acta*, 2006, vol. 51, pp. 4420-4425.

9. Lee C., Lee Y., Lee C., Hong S. Possibility of Mn substitution of Ni through evaluation of mechanical properties and corrosion resistance in superaustenitic stainless steel weld metal. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 733, pp. 16-23.

10. Yang Y., Qian H., Su Y. Effect of Mn addition on deformation behaviour of 23% Cr low nickel duplex stainless steel. *Materials Characterization*, 2018, vol. 145, pp. 606-618.

11. Rasouli D., Kermanpur A., Najafizadeh A. Developing high-strength, ductile Ni-free Fe-Cr-Mn-C-N stainless steels by interstitial-alloying and thermomechanical processing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8, pp. 2846-2853.

12. Rublova Y.D., Kityk A.A., Bannyk N.G., Protsenko V.S., Danilov F.I. The influence of various factors on corrosion of mild steel in deep eutectic solvents. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 6, pp. 232-236.

13. Kityk A.A., Rublova Y.D., Kelm A., Malyshev V.V., Bannyk N.G., Flis-Kabulska I. Kinetics and mechanism of corrosion of mild steel in new types of ionic liquids. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, vol. 823, pp. 234-244.

14. Kityk A.A., Protsenko V.S., Danilov F.I., Kun O.V., Korniy S.A. Electropolishing of aluminium in a deep eutectic solvent. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 375, pp. 143-149.

15. Danilov F.I., Kityk A.A., Shaiderov D.A., Bogdanov D.A., Korniy S.A., Protsenko V.S. Electrodeposition of Ni-TiO₂ composite coatings using electrolyte based on a deep eutectic solvent. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2019, vol. 55, pp. 138-149.