

УДК 544.6+621.9.047.7

**ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ АНОДНОЇ ОБРОБКИ БІОМЕДИЧНОЇ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ AISI 304 В ETHALINE: ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ДОБАВОК ВОДИ****А.А. Кітик<sup>\*а</sup>, Н.Г. Банник<sup>\*б</sup>, О.В. Кун<sup>\*с</sup>**

*\* ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпро, просп. Гагаріна, 8, 49005*

a) ✉ [kitykanna7@gmail.com](mailto:kitykanna7@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-0559-7710>

b) ✉ [nbannik@i.ua](mailto:nbannik@i.ua),  <https://orcid.org/0000-0003-4504-8529>

c) ✉ [lolena34@gmail.com](mailto:lolena34@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-2423-0121>

Показано, що низькотемпературний евтектичний розчинник Ethaline є екологічнобезпечним та перспективним середовищем для електрополірування нержавіючої сталі AISI 304, яка широко застосовується для виготовлення різноманітних виробів медичного призначення. Отримані вольтамперограми зразків сталі AISI 304 у Ethaline дозволили обрати оптимальні умови для анодної обробки за різних температурних режимів (від 20 до 50°C) та з добавками до електроліту води (до 10 %). Виявлено, що ефективність Ethaline, як електроліту для анодної обробки, пов'язана, насамперед, з його унікальними фізико-хімічними властивостями: значною в'язкістю і при цьому порівняно високою, як для іонних рідин, електропровідністю. Висока густина розчинника Ethaline обумовлює повільність дифузії продуктів анодного розчинення сталі, за рахунок чого відбувається формування в'язкого приелектродного шару і досягається висока ефективність процесу полірування. Встановлено, що зі збільшенням температури та появою у електроліті Ethaline добавок води швидкість анодного розчинення сталі збільшується і це дозволяє використовувати більші густини анодного струму для електрополірування в гальваностатичному режимі або менші потенціали при потенціостатичному режимі.

**Ключові слова:** вольтамперограма, анодний струм, електрополірування, «сольова» пасивація, низькотемпературний евтектичний розчинник.

**Вступ**

Сучасна медицина використовує широкий спектр металів та сплавів для різноманітних виробів: протезів, імплантів, ортодонтичних виробів, медичного інструментарію та обладнання [1]. Для виготовлення медичних товарів використовують матеріали найвищого гатунку, тому і до металів та сплавів медичного призначення висуваються високі вимоги якості.

Добре відомо, що одним з найефективніших шляхів покращення зовнішнього вигляду та властивостей металів і сплавів є їх електрохімічна анодна обробка [2]. Під час такої обробки відбувається вирівнювання мікропрофелю металевої поверхні за рахунок розчинення неоднорідностей та дефектів. Зазвичай після анодної обробки поверхня металів та сплавів характеризується рівномірною блискучою поверхнею більш стійкою до корозії. Традиційні технології анодної обробки базуються на використанні у якості електролітів висококонцентрованих розчинів кислот (сульфатної, нітратної, хлоридної, флуоридної, ортофосфорної) з додаванням гліколів, іноді – хромового ангідриду [3-5]. Проте використання таких хімічно агресивних сумішей реагентів може бути недостатньо ефективним, а іноді і небезпечним, особливо коли мова йде про метали і сплави медичного призначення. Тому актуальним є питання пошуку екологічнобезпечних і ефективних альтернатив використанню традиційних електролітів анодної обробки металів і сплавів медичного призначення.

Останні роки значний інтерес у науковців викликають іонні рідини нового покоління – низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР). НЕР є не тільки представниками «зелених» систем, але й характеризуються цілою низкою дуже привабливих властивостей: хімічною, термічною, електрохімічною стійкістю; легкістю синтезу; доступністю компонентів; низьким тиском насиченої пари; порівняно високою, як для іонних рідин, електропровідністю. Все це робить НЕР перспективним середовищем для реалізації різноманітних хімічних і електрохімічних процесів [6-8]. Процес електрополірування або анодної обробки металів і сплавів не є винятком. У ряді робіт відомих світових наукових шкіл продемонстровано високу ефективність ви-

користання низькотемпературних евтектичних розчинників, зокрема евтектичної суміші Ethaline, для процесу електрополірування металів і сплавів [9-12].

Беручи до уваги успішний досвід використання Ethaline, як електроліту для анодної обробки металів і сплавів, було сформульовано мету для даної роботи: встановити принципову можливість використання розчинника Ethaline для процесу електрополірування одного з найбільш розповсюджених та дешевих різновидів біомедичної сталі AISI 304; провести детальне вольтамперометричне дослідження електродних процесів, що відбуваються в системі сталь AISI 304 / Ethaline, та на основі отриманих даних запропонувати оптимальні умови для реалізації процесу електрополірування AISI 304 у Ethaline за різних робочих температур та за необхідності добавок до електроліту води.

### Методика експерименту

Низькотемпературний евтектичний розчинник Ethaline (суміш холін хлориду з етиленгліколем у молярному співвідношенні компонентів 1 до 2 відповідно) готували шляхом змішування компонентів за температури 70°C до утворення гомогенної безбарвної рідини.

Одержану евтектичну суміш у подальшому використовували для експериментів та для приготування серії розчинів з додатково введеною водою (1, 2, 5 та 10 об'ємних % води з урахуванням того, що об'ємний % розчинника Ethaline при цьому 99, 98, 95 та 90 відповідно). Усі розчини готували безпосередньо перед проведенням вольтамперних вимірювань, враховуючи гігроскопічність евтектичної суміші Ethaline.

Циклічні вольтамперограми отримували у термостатованій скляній триелектродній комірці з використанням потенціостату Potentiostat/Galvanostat Reference 3000 (виробництва США). У якості робочого електрода використовували пластини нержавіючої сталі AISI 304 площею 4 см<sup>2</sup> (склад AISI 304 наведено у табл. 1), графітовий електрод з високорозвиненою поверхнею служував допоміжним і у якості електрода порівняння використовували срібний дріт, яку зазвичай беруть у якості квазі-електрода порівняння у неводних розчинниках такого типу.

Для кожного експерименту використовували новий зразок AISI 304 попередньо протравлений у розчині HCl (1:1) та знежирений магnezієвою сумішшю.

Таблиця 1. Елементний склад зразків AISI 304.

Елемент	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	N	C	P
Мас. %	66.0÷71.0	18.0÷20.0	8.0÷11.0	≤2.0	≤0.75	≤0.11	≤0.08	≤0.04

Опір розчинника Ethaline без додатково введеної води та з при отриманні вольтамперограм компенсували автоматично за допомогою робочої програми потенціостату. Температуру сталою підтримували за допомогою термостату Flüssigkeits thermostatе Baureihe U/UN8 (виробництва Німеччина).

### Результати та їх обговорення

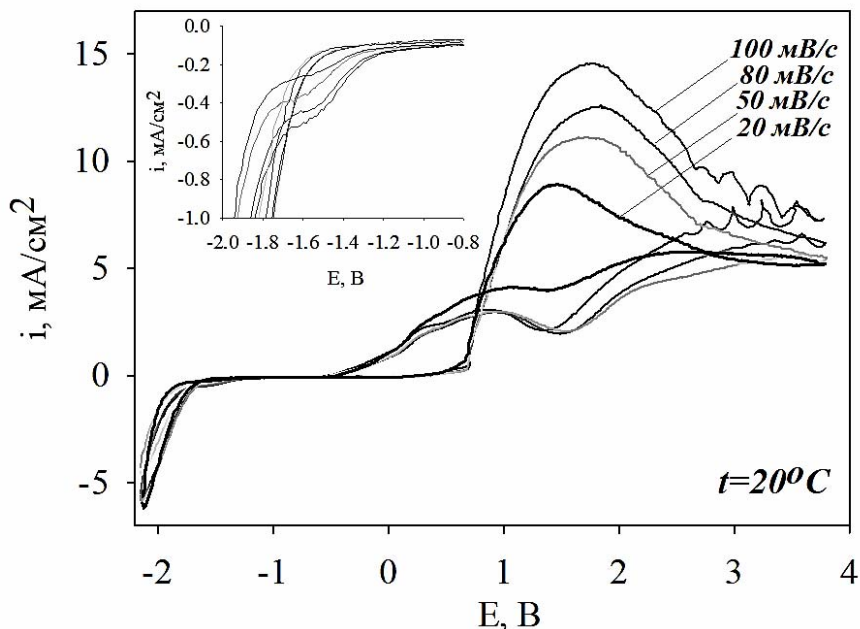
З метою обрання оптимальних умов реалізації процесу електрополірування нержавіючої сталі AISI 304 медичного призначення було проведено вольтамперометричне дослідження процесу анодної обробки зразків AISI 304 у низькотемпературній евтектичній суміші Ethaline. Циклічні вольтамперограми (ЦВА) AISI 304 в Ethaline, отримані за різних швидкостей сканування потенціалу, наведено на рис. 1.

Розгортку потенціалу при отриманні ЦВА проводили з різними швидкостями (20÷100 мВ/с) від стаціонарного значення (-0.5 В) в анодну ділянку до потенціалу 4 В, а потім у катодну до потенціалу -2.2 В.

Як видно з рис. 1, при потенціалах електропозитивніших за 0.75 В починається активне розчинення сталевих зразків, про що свідчить стрімке зростання анодного струму. При потенціалах 1.5÷2 В на анодних ділянках ЦВА спостерігається помітний максимум струму. При потенціалах  $E \geq 2$  В анодний струм зменшується.

Добре відомо, що при анодному розчиненні нержавіючої сталі у першу чергу відбувається електрохімічна реакція  $Fe^0 - 2e^- = Fe^{2+}$  [13]. Таким чином, приелектродний шар збагачується продуктами розчинення, а беручи до уваги високу в'язкість розчинника Ethaline, можна припусти-

ти, що зниження струму на анодній ділянці ЦВА викликано проявом, так званої, «сольової» пасивації за рахунок формування надзвичайно в'язкого шару з дуже повільною дифузією продуктів електрохімічної реакції в об'єм розчинника. Про «дифузійну» природу граничного струму свідчить і сам характер залежності струму піку від швидкості сканування потенціалу.



**Рисунок 1.** ЦВА AISI 304 в Ethaline, отримані за різних швидкостей сканування потенціалу ( $v=20\div 100$  мВ/с,  $t=20^\circ\text{C}$ )

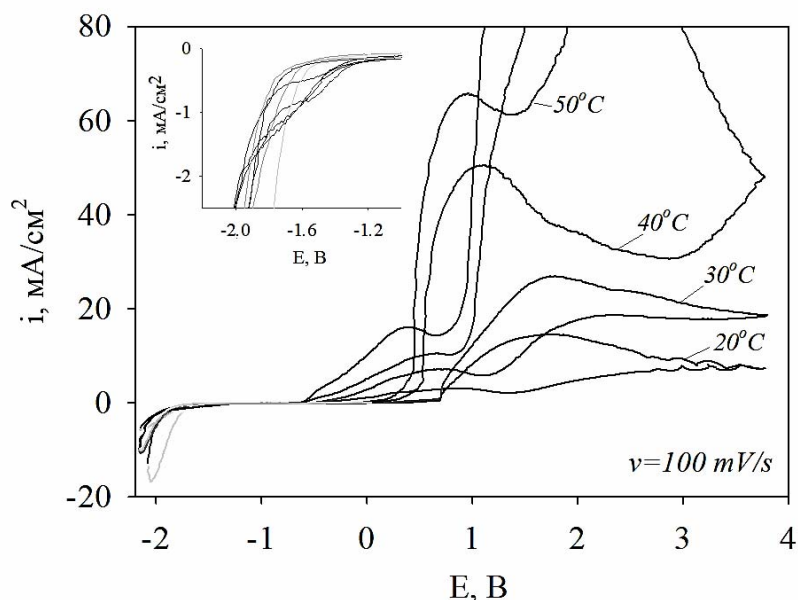
Зазначимо, що поверхневий шар сплаву AISI 304 у наслідок розчинення заліза збагачується хромом та нікелем, які при взаємодії з киснем здатні утворювати на поверхні сплаву AISI 304 захисні оксидні плівки, що можуть забезпечувати у майбутньому значну корозійну витривалість електрополірованої сталеві поверхні. Зауважимо і той факт, що прямий та зворотній хід ЦВА на анодній ділянці помітно відрізняються, що також свідчить про суттєву зміну природи поверхні електроду. Логічним є різниця струмів розчинення сплаву AISI 304 (прямий хід ЦВА) і поверхні сплаву збагаченої окремими компонентами (хром, нікель) та можливо їх оксидами (зворотній хід кривої).

Відмітимо, що за тривалого часу використання для електрохімічної обробки AISI 304 розчинник Ethaline набуває зеленого кольору, що притаманно комплексним сполукам саме  $\text{Fe}^{2+}$ . Швидкого переходу зеленого забарвлення у жовте не відбувається, що свідчить про відсутність або уповільненість реакції переходу  $\text{Fe}^{2+}-1e^-=\text{Fe}^{3+}$ . Нагадаємо, що основними компонентами розчинника є етиленгліколь та хлорид холіну, обидва компоненти можуть забезпечувати стабільність  $\text{Fe}^{2+}$  за рахунок формування комплексів типу  $[\text{FeEtgl}_4]^{2+}$  та  $[\text{FeCl}_4]^{2-}$  відповідно. Однак, як повідомляється у [14] розчини комплексів  $\text{Fe}^{2+}$  з етиленгліколем мають світло жовте забарвлення, а не насичено зелене, як у розглядаємому випадку. Тому цілком обґрунтовано можна припустити, що в умовах високої концентрації  $\text{Cl}^-$  аніонів, яка має місце у Ethaline, відбувається все-таки формування хлорид вмісних комплексів типу  $[\text{FeCl}_4]^{2-}$ . Не слід також нехтувати можливістю формування гідроксо-комплексів (рН Ethaline після електрополірування  $\sim 8\div 9$ ), аквакомплексів за рахунок абсорбції води з повітря під час електролізу (розчинника Ethaline є гігроскопічним [14]), або змішаних гідроксо-хлоридних, аквагідроксо-хлоридних комплексів. Більш детальний та обґрунтований аналіз складу комплексів, що містяться у електроліті після полірування буде представлено нами у рамках наступної роботи.

При розгортці потенціалу у катодну ділянку (до -2.2 В) на ЦВА спостерігається хвиля струму при  $E \approx -1.6$  В (врізка рис. 1), що відповідає електровідновленню  $\text{Fe}^{2+}$  до металічного заліза. Подальше збільшення струму при  $E \geq -1.6$  В пов'язано з електровідновленням донорів протону, які у великій кількості наявні в електроліті.

Підкреслимо, що зі збільшенням швидкості сканування потенціалу піки струму розчинення заліза та хвилі струму його електровідновлення не тільки змінюються за висотою, але й зсуваються за потенціалом, що притаманно незворотнім електрохімічним процесам.

Оцінити вплив температури на ЦВА зразків AISI 304 у Ethaline можна з використанням рис. 2.



**Рисунок 2.** Вплив температури на хід ЦВА AISI 304 в Ethaline ( $v=100$  мВ/с,  $t=20\div 50^\circ\text{C}$ )

З рис. 2 видно, що підвищення температури викликає значні зміни у ході ЦВА. Анодні піки струму розчинення зсуваються у ділянку більш електронегативних потенціалів та збільшуються за висотою. Таким чином, процес розчинення [13] починається раніше та перебігає значно інтенсивніше. Помітне також і збільшення струму відновлення електроактивних часточок  $\text{Fe}^{2+}$  зі збільшенням температури.

Слід зауважити, що зі збільшенням температури «пасивна» ділянка струму, що йде за піком струму розчинення, скорочується і за високої температури ( $50^\circ\text{C}$ ) практично відсутня. Такі зміни в ЦВА зі збільшенням температури добре узгоджуються з гіпотезою щодо «сольової» пасивації. Як добре відомо, збільшення температури завжди зменшує «сольову» пасивацію за рахунок зменшення в'язкості розчинника та відповідно прискорення процесів дифузії, а також за рахунок збільшення розчинності малорозчинних за низької температури продуктів електрохімічної реакції.

Аналізуючи отриману температурну залежність, можна зробити наступний висновок: збільшуючи температуру електроліту при анодній обробці AISI 304, дійсно, вдається досягти значного прискорення процесу електрополірування, що дає змогу реалізовувати процес електрополірування з використанням більших густин анодного струму.

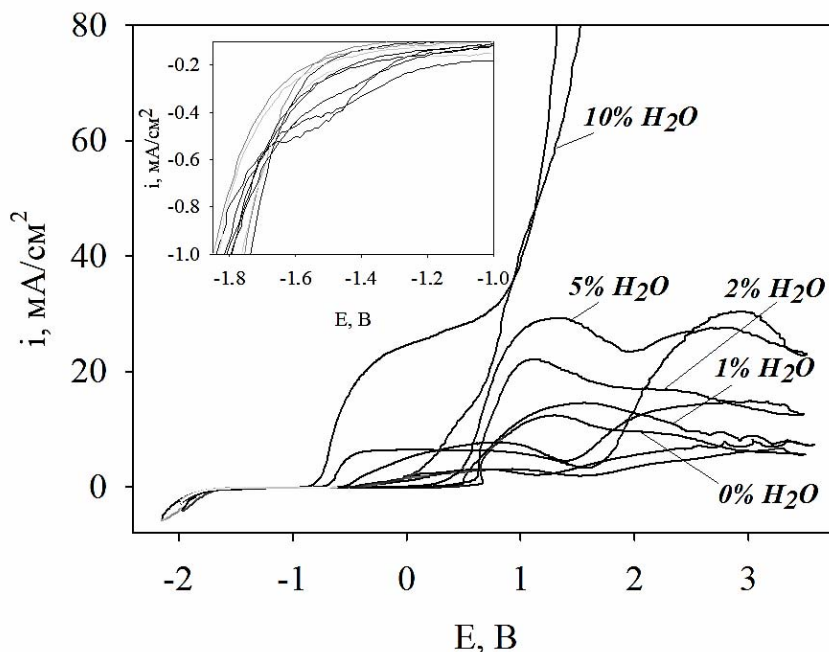
Таким чином, за температур  $20\div 30^\circ\text{C}$  електрополірування AISI 304 у Ethaline рекомендовано реалізовувати у потенціостатичному режимі за потенціалів  $\geq 1$  В та у гальваностатичному режимі за густин струму  $5\div 20$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ ; за більш високих температур –  $40\div 50^\circ\text{C}$  можна використовувати потенціали  $\geq 0.5$  В, а густини анодного струму –  $30\div 65$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

Розглядаючи Ethaline, як електроліт для анодної обробки AISI 304, не слід забувати про його гігроскопічність [15]. Як було показано раніше, евтектична суміш Ethaline за тривалого контакту з повітрям абсорбує з нього помітну кількість води. Тому значний інтерес викликає вплив домішок води на хід ЦВА AISI 304 в Ethaline.

ЦВА AISI 304 в розчиннику Ethaline, що містив різну кількість доданої води, наведено на рис. 3.

Поява води та збільшення її кількості в Ethaline помітно впливає на хід ЦВА. Як видно з рис. 3, зі збільшенням вмісту води у розчиннику пік струму розчинення зсувається за потенціалом

лом вліво та збільшується за висотою. Таким чином, поява води та збільшення її кількості у розчиннику викликають прискорення процесу розчинення.



**Рисунок 3.** Вплив добавок води на хід ЦВА AISI 304 в Ethaline ( $v=100$  мВ/с,  $t=20^{\circ}\text{C}$ )

Відмітимо, що за вмісту води 10 % «пасивна» ділянка на ЦВА повністю відсутня. Таким чином «сольова» пасивація за такої концентрації води в електроліті не відбувається. Зауважимо, що процес електрополірування AISI 304 у суміші Ethaline з додаванням води можна реалізувати, використовуючи більші густини анодного струму у порівнянні з неводним розчинником, якщо процес йде у гальваностатичному режимі, або менші потенціали, якщо режим потенціостатичний. Рекомендовані умови електрополірування AISI 304 для електроліту, що містить до 5 % води – потенціали  $\geq 0.5$  В, густини струму – від 5 до 30  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ; для електроліту з вмістом води 10 % –  $E \geq 0$  В, густини струму від 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

Слід враховувати, що поява води у електроліті Ethaline значно впливає на його фізико-хімічні властивості [16]. З появою води та збільшенням її кількості відбувається збільшення електропровідності, зменшення в'язкості розчинника, що позначиться на коефіцієнтах дифузії електроактивних форм; відбувається зміна перенапруги виділення водню в катодному процесі та виділення кисню в анодному; також відбувається збільшення корозійної активності електроліту. До того ж поява значної кількості води сприяє пітінгоутворенню на поверхні сталевих зразків, що є звичайним у водних розчинах з високим вмістом аніонів  $\text{Cl}^-$ . Тому зауважимо, що з метою запобігання збільшення корозійної активності електроліту та утворення пітінгу на поверхні металевих зразків для електрохімічного полірування AISI 304 у розчиннику Ethaline не рекомендовано використовувати добавки води, які перевищують 10 % та густини анодного струму вищі за 100  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

### Висновки

Вольтамперметричне дослідження особливостей електрохімічної обробки нержавіючої сталі AISI 304 у низькотемпературній евтектичній суміші Ethaline показало, що цей розчинник може бути перспективною альтернативою використанню традиційних хімічно агресивних електролітів полірування сталі.

Показано, що процес анодної обробки AISI 304 у електроліті Ethaline можна реалізувати як за кімнатної температури ( $t=20^{\circ}\text{C}$ ), так і використовуючи нагрів ( $t=30\div 50^{\circ}\text{C}$ ). За температур  $20\div 30^{\circ}\text{C}$  електрополірування AISI 304 у Ethaline рекомендовано реалізувати у потенціостатичному режимі за потенціалів  $\geq 1$  В та у гальваностатичному режимі за густин анодного струму

$5 \pm 20$  мА/см<sup>2</sup>; за більш високих температур –  $40 \pm 50$ °С можна використовувати потенціали  $\geq 0.5$  В, а густини струму –  $30 \pm 65$  мА/см<sup>2</sup>.

Встановлено, що електроліт Ethaline можна використовувати для електрополірування AISI 304 також із добавками води. Поява у складі низькотемпературного евтектичного розчинника Ethaline води дозволяє реалізовувати процес анодної обробки нержавіючої сталі, використовуючи більші густини анодного струму та менші потенціали. Рекомендовані умови електрополірування AISI 304 для електроліту, що містить до 5 % води – потенціали  $\geq 0.5$  В, густини струму – від 5 до 30 мА/см<sup>2</sup>; для електроліту з вмістом води 10 % –  $E \geq 0$  В, густини струму від 20 мА/см<sup>2</sup>. Використовувати добавки до Ethaline води, які перевищують 10 %, не рекомендується, тому що за таких концентрацій води відбувається пітінгоутворення на поверхню AISI 304, а також помітне збільшення корозійної активності розчинника.

### Література

1. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. **2015**, 87, 1-57.
2. G. Yang, B. Wang, K. Tawfiq, H. Wei, S. Zhou, G. Chen. Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surface Engineering*. **2016**, 33 (2), 1-18.
3. Singh V.B., Arvindt U. Electrodeposition of AISI 304 stainless steel in concentrated acids leading to electropolishing. *Indian Journal of Chemical Technology*. **1995**, 2, 211-216.
4. Jeyashree G., Subramanian A., Vasudevan T., Mohan S., Venkatachalam R. Electropolishing of stainless steel. *Bulletin of Electrochemistry*. **2000**, 16 (9), 388-391.
5. Nazneen F., Galvin P., Arrigan D.W.M., Thompson M., Benvenuto P., Herzog G. Electropolishing of medical-grade stainless steel in preparation for surface nano-texturing. *Journal of Solid State Electrochemistry*. **2012**, 16 (4), 1389-1397.
6. Smith E.L. Deep eutectic solvents (DESs) and the metal finishing industry: where are they now? *Transactions of the IMF. The International Journal of Surface Engineering and Coatings*. **2013**, 91 (5), 241-248.
7. Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical reviews*. **2014**, 114 (21), 11060-11082.
8. Paiva A., Craveiro R., Aroso I., Martins M., Reis R.L., Duarte A.R.C. Natural deep eutectic solvents – solvents for the 21st century. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. **2014**, 2 (5), 1063-1071.
9. Abbott A.P., Ryder K.S., König U. Electrofinishing of metals using eutectic based ionic liquids. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. **2008**, 86 (4), 196-204.
10. Abbott A.P., Dsouza N., Withey P., Ryder, K.S. Electrolytic processing of superalloy aerospace castings using choline chloride-based ionic liquids. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. **2012**, 90 (1), 9-14.
11. Abbott A.P., Frisch G., Hartley J., Karim W.O., Ryder K.S. Anodic dissolution of metals in ionic liquids. *Progress in Natural Science: Materials International*. **2015**, 25 (6), 595-602.
12. Loftis J.D., Abdel-Fattah T.M. Nanoscale electropolishing of high-purity silver with a deep eutectic solvent. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **2016**, 511, 113-119.
13. 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**, 51 (21), 4420-4425.
14. Gomer R., Tyson G.N. Some glycol complexes of the light transition metals. *Journal of the American Chemical Society*. **1944**, 66 (8), 1331-1333.
15. Craveiro R., Aroso I., Flammia V., Carvalho T., Viciosa M.T., Dionísio M., Barreiros S., Reis R.L., Duarte A.R.C., Paiva A. Properties and thermal behavior of natural deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*. **2016**, 215, 716-722.
16. Кітик А.А., Рубльова Є.Д., Васильєва О.О., Банник Н.Г., Бурмістров К.С. Фізико-хімічні властивості та корозійна активність низькотемпературних евтектичних сумішей Ethaline та Reline по відношенню до низьковуглецевої сталі. *Вопр. хімії и хім. технології*. **2016**, 5-6, 4-10.



## References

1. Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. **2015**, *87*, 1-57.
2. G. Yang, B. Wang, K. Tawfiq, H. Wei, S. Zhou, G. Chen. Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surface Engineering*. **2016**, *33* (2), 1-18.
3. Singh V.B., Arvindt U. Electrodeposition of AISI 304 stainless steel in concentrated acids leading to electropolishing. *Indian Journal of Chemical Technology*. **1995**, *2*, 211-216.
4. Jeyashree G., Subramanian A., Vasudevan T., Mohan S., Venkatachalam R. Electropolishing of stainless steel. *Bulletin of Electrochemistry*. **2000**, *16* (9), 388-391.
5. Nazneen F., Galvin P., Arrigan D.W.M., Thompson M., Benvenuto P., Herzog G. Electropolishing of medical-grade stainless steel in preparation for surface nano-texturing. *Journal of Solid State Electrochemistry*. **2012**, *16* (4), 1389-1397.
6. Smith E.L. Deep eutectic solvents (DESs) and the metal finishing industry: where are they now? *Transactions of the IMF. The International Journal of Surface Engineering and Coatings*. **2013**, *91* (5), 241-248.
7. Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical reviews*. **2014**, *114* (21), 11060-11082.
8. Paiva A., Craveiro R., Aroso I., Martins M., Reis R.L., Duarte A.R.C. Natural deep eutectic solvents – solvents for the 21st century. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. **2014**, *2* (5), 1063-1071.
9. Abbott A.P., Ryder K.S., König U. Electrofinishing of metals using eutectic based ionic liquids. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. **2008**, *86* (4), 196-204.
10. Abbott A.P., Dsouza N., Withey P., Ryder, K.S. Electrolytic processing of superalloy aerospace castings using choline chloride-based ionic liquids. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. **2012**, *90* (1), 9-14.
11. Abbott A.P., Frisch G., Hartley J., Karim W.O., Ryder K.S. Anodic dissolution of metals in ionic liquids. *Progress in Natural Science: Materials International*. **2015**, *25* (6), 595-602.
12. Loftis J.D., Abdel-Fattah T.M. Nanoscale electropolishing of high-purity silver with a deep eutectic solvent. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **2016**, *511*, 113-119.
13. 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**, *51* (21), 4420-4425.
14. Gomer R., Tyson G.N. Some glycol complexes of the light transition metals. *Journal of the American Chemical Society*. **1944**, *66* (8), 1331-1333.
15. Craveiro R., Aroso I., Flammia V., Carvalho T., Viciosa M.T., Dionísio M., Barreiros S., Reis R.L., Duarte A.R.C., Paiva A. Properties and thermal behavior of natural deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*. **2016**, *215*, 716-722.
16. Kityk A.A., Rublova Y.D., Vasil'eva E.A., Bannyk N.G. Physicochemical properties and corrosion activity of deep eutectic solvents Ethaline and Reline towards mild steel. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*. **2016**, *5-6*, 4-10 [in Ukrainian].

Надіслано до редакції 02 квітня 2019 р.

А.А. Кітик, Н.Г. Банник, О.В. Кун. Вольтамперометрическое исследование особенностей анодной обработки биомедицинской нержавеющей стали AISI 304 в ethaline: влияние температуры и добавок воды.

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», Днепр, просп. Гагарина, 8, 49005

Показано, что низкотемпературный эвтектический растворитель Ethaline является экологически безопасной и высокоэффективной средой для электрополирования нержавеющей стали AISI 304, которая широко используется для изготовления различных товаров медицинского назначения. Полученные вольт-амперограммы образцов стали AISI 304 в Ethaline позволили определить оптимальные условия для анодной обработки при различных температурных режимах (от 20 до 50°C) и с добавками к электролиту воды (до 10 %). Установлено, что эффективность Ethaline, как электролита для анодной обработки, связана в

первую очередь с его уникальными физико-химическими свойствами: значительной вязкостью и при этом сравнительно высокой, как для ионных жидкостей, электропроводностью. Высокая вязкость растворителя Ethaline обуславливает замедленность диффузии продуктов анодного растворения стали, за счет чего достигается формирование вязкого приэлектродного слоя и достигается высокая эффективность процесса полировки. Установлено, что с увеличением температуры и появлением в электролите Ethaline добавок воды скорость анодного растворения стали увеличивается и это позволяет использовать большие плотности анодного тока для электрополировки в гальваностатическом режиме или меньшие потенциалы при потенциостатическом режиме.

**Ключевые слова:** вольтамперограмма, анодный ток, электрополирование, «солевая» пассивация, низкотемпературный эвтектический растворитель.

A.A. Kityk, N.G. Bannyk, O.V. Kun. Voltampermetric investigation of peculiarities of anodic processing of biomedical stainless steel AISI 304 in ethaline: temperature and additional water influence.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Gagarina ave., 8, 49005

It is shown that deep eutectic solvent Ethaline is an environmentally friendly and highly efficient medium for electropolishing of AISI 304 stainless steel that is widely used for medical products. The obtained voltammograms allow choosing optimal conditions for anodic treatment of AISI 304 steel samples in Ethaline at different temperature conditions (from 20 to 50°C) and with water additives (up to 10 %). It is established that high efficiency of Ethaline as an electrolyte for anodic treatment is primarily associated with its unique physicochemical properties: significant viscosity and, at the same time, relatively high, as for ionic liquids, electrical conductivity. The high viscosity of the Ethaline solvent causes slow diffusion of the products of anodic dissolution of steel, which achieve the formation of a viscous electrode layer and provide a high efficiency of the polishing process. It has been shown that with an increase in electrolyte temperature and water content in Ethaline the anodic dissolution rate of steel increases and this allows the use of high anode current densities for electropolishing in galvanostatic mode or lower potentials in the potentiostatic mode.

**Keywords:** voltammogram, anodic current, electropolishing, «salt» passivation, deep eutectic solvent.

Kharkiv University Bulletin. Chemical Series. Issue 32 (55), 2019