

УДК 621.357.7

*Д.О. Махота, Т.Є. Бутиріна, В.С. Проценко***ЕЛЕКТРОПОЛІРУВАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ ХРОМОНІКЕЛЕВОЇ СТАЛІ 12Х18Н10Т В НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКАХ****Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна**

Розглянуто основні закономірності анодного потенціостатичного оброблення сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т (аналог AISI 321) в низькотемпературних евтектичних розчинниках ethaline і reline, що є евтектичними сумішами холін хлориду з етиленгліколем і карбамідом, відповідно. На підставі даних циклічної вольтамперометрії було обрано два значення потенціалу анодного оброблення: 0,2 В і 1,0 В в ethaline та 2,0 В і 2,7 В в reline (відносно шкали Ag електрода порівняння). Тривалість оброблення становила 150 хвилин при температурі 25°C. Методами сканувальної електронної мікроскопії поверхні, вимірювання мікрошорсткості та візуального оцінювання встановлено, що у всіх випадках відбувається електрохімічне полірування сталі. Методом енерго-дисперсійного рентгенівського мікроаналізу показано, що при електрополіруванні сталі 12Х18Н10Т в ethaline і reline спостерігається вибіркове витравлювання заліза та певне накопичення вуглецю і кисню на поверхні. Виявлено, що електрополірована поверхня демонструє підвищену стійкість до корозійного руйнування в агресивному середовищі 3% NaCl. В окремих випадках електрополірування дозволило дещо підсилити електрокаталітичну активність поверхні сталі стосовно анодної реакції, сполученої з катодним виділенням водню у водному лужному середовищі.

Ключові слова: низькотемпературні евтектичні розчинники, нержавіюча хромонікелева сталь, електрополірування, корозійна стійкість, електрокаталітична активність.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-162-5-29-38**Вступ**

Хромонікелева сталь аустенітного класу 12Х18Н10Т (аналог AISI 321) є однією з найбільш розповсюджених типів нержавіючих сталей, що характеризується високою стійкістю до корозії, жароміцністю, жаростійкістю, високою механічною міцністю та легко оброблюється [1]. Ця сталь широко використовується у різних галузях індустрії, таких як харчова, хімічна, енергетична, нафтопереробна, медична та багато інших. Вироби з нержавіючих сталей часто піддають електрохімічному поліруванню, що покращує зовнішній вигляд поверхні, надає їй блиск, підвищує коро-

зивну стійкість [2–4].

Незважаючи на широке розповсюдження процесів електрополірування у промисловості, для них притаманна низка недоліків, серед яких один з найважливіших — використання достатньо концентрованих водних розчинів сильних мінеральних кислот (сірчаної, хромової, ортофосфornoї тощо), що пов'язане з очевидними екологічними ризиками і потенційною небезпекою для обслуговуючого персоналу та підвищеним корозійним руйнуванням обладнання. Останніми роками для розв'язання цієї проблеми було запропоновано замінювати традиційні водні електролі-

© Д.О. Махота, Т.Є. Бутиріна, В.С. Проценко, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Electropolishing of 12Cr18Ni10Ti chromium-nickel stainless steel in deep eutectic solvents

ти на системи, що базуються на новому поколінні низькотемпературних іонних рідин – deep eutectic solvents (DES) [5]. Особливості синтезу, властивостей і переваг цих систем вже достатньо детально описані у оглядовій літературі [6–8]. Втім, дослідження стосовно закономірностей електрохімічного полірування металів, включаючи різноманітні типи сталей, перебувають ще тільки на початковому етапі накопичення і узагальнення експериментальних даних [5,9–15]. Зважаючи на ці обставини, метою даної роботи було встановлення закономірностей анодного електрохімічного полірування сталі 12X18H10T в двох типових представниках низькотемпературних евтектичних розчинників: ethaline та reline (суміші холін хлориду з етиленгліколем і карбамідом, відповідно, де компоненти містяться у евтектичному співвідношенні).

Методика експерименту

Зразки сталі 12X18H10T для досліджень виготовляли у вигляді смужок товщиною 0,5 мм і шириною 10 мм. Робоча поверхня, що піддавалася електрохімічному обробленню, становила 1 см² (з однієї сторони смужки), неробочу поверхню ізолювали лаком.

Шляхом змішування холін хлориду з етиленгліколем або карбамідом і наступного тривалого ретельного перемішування рідкої суміші при температурі 70°C виготовляли розчинники ethaline та reline, відповідно. Молярне співвідношення компонентів дорівнювало холін хлорид:етиленгліколь або карбамід=1:2. Залишковий вміст води в низькотемпературних евтектичних розчинниках контролювали методом Фішера; вміст води не перевищував 1%.

Особливості морфології поверхні вивчали сканувальною електронною мікроскопією (SEM, Zeiss EVO 40XVP). Вмонтована у електронний мікроскоп приставка-аналізатор Oxford INCA Energy 350 дозволяла проводити визначення хімічного складу поверхні методом енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу.

Коефіцієнт шорсткості поверхні R_a вимірювали за допомогою устаткування Surface Roughness Tester SRT 6210.

Дослідження корозійно-електрохімічної та електрокаталітичної поведінки здійснювали методами лінійної і циклічної вольтамперометрії та хроноамперометрії, які реалізовували за допомогою потенціостату Gamry Reference 3000. Умови здійснення цих експериментів наведені нижче. При анодному обробленні сталі в DES проти-електродом була платина, а срібний дріт слугував електродом порівняння. При вивченні корозійно-

електрохімічних та електрокаталітичних властивостей у водних розчинах протиелектродом була платинова пластина, а електродом порівняння – насичений хлорсрібний.

Результати та обговорення

Електрохімічна поведінка сталі 12X18H10T в DES

Циклічні вольтамперні криві сталі 12X18H10T в розчинниках ethaline і reline (рис. 1) мають дещо складніший вигляд, ніж для інших марок нержавіючих сталей, раніше описаних у літературі [9–15], а саме: на цих кривих на прямому (анодному) скані потенціалу формуються не одна, а дві хвилі струму. У розчиннику ethaline ці хвилі добре виражені і відповідають потенціалам приблизно 0,0–0,2 В та 1,0–1,5 В, тоді як у розчиннику reline ці хвилі струму проявляються на вольтамперограмах не так яскраво і відповідають потенціалам приблизно 0,5–1,0 В і 2,0–2,5 В. На зворотному (катодному) скані також з'являються дві відповідні хвилі, перша з яких для обох розчинників відповідає анодному струму, а друга – катодному. Слід вказати, що максимальні зафіксовані густини струму анодного розчинення за інших однакових умов в досліджених інтервалах потенціалів є суттєво вищими (приблизно на порядок величини) в розчиннику ethaline, ніж в reline.

На даному етапі важко дати однозначну інтерпретацію такому достатньо складному вигляду вольтамперограм. Не виключено, що наявність кількох піків анодного струму пов'язана із розчиненням окремих компонентів даної сталі або ж формуванням пасивних шарів з різним хімічним і фазовим складом, товщиною та іншими параметрами при змінній електродного потенціалу. Що стосується суттєво вищих зафіксованих струмів розчинення сталі 12X18H10T у розчиннику ethaline у порівнянні з reline, то схоже явище вже неодноразово спостерігалось при анодному розчиненні різних металів і сплавів у розглянутих DES і пов'язувалося із відмінностями як у хімічному складі продуктів анодного розчинення в цих іонних рідинах, так і у суттєвих відмінностях їх фізико-хімічних властивостей, насамперед, в'язкості [16,17]. У даній роботі ми не ставили задачі детально з'ясувати механізм реакцій анодного розчинення сталі 12X18H10T в ethaline та reline, і зареєстровані вольтамперні криві (рис. 1) слугували, насамперед, для вибору кількох значень потенціалів анодного оброблення на деяких «характерних» ділянках отриманих вольтамперограм. Для здійснення подальших експериментів на підставі даних рис. 1 були обрані

наступні значення потенціалів для потенціостатичного оброблення нержавіючої сталі: для ethaline 0,2 В і 1,0 В; для reline 2,0 В і 2,7 В.

Рисунок 2 демонструє часові залежності густини анодного струму розчинення сталі 12Х18Н10Т в обох застосованих евтектичних розчинниках при обраних потенціалах анодного оброблення. Видно, що після початкового «стрибка» у перші моменти після накладання поляризації,

струм починає знижуватись і перестає сильно змінюватись у часі приблизно після 2000 с. Цікаво, що після такої квазістабілізації анодна густина струму як у випадку ethaline, так і reline має приблизно один і той же порядок величини. Всі подальші експерименти з анодного потенціостатичного оброблення нержавіючої сталі в обох евтектичних розчинниках за обраних величин потенціалу проводили протягом 9000 с (150 хв).

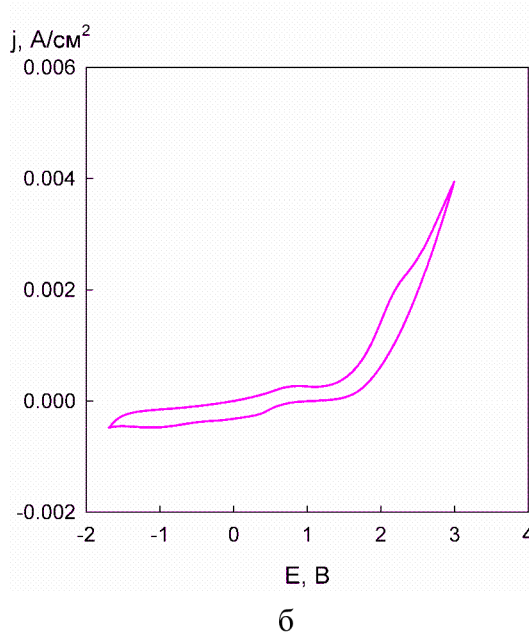
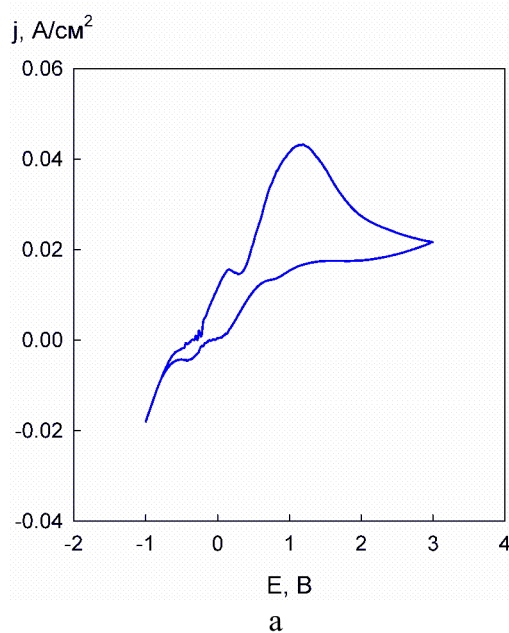


Рис. 1. Циклічні вольтамперограми сталі 12Х18Н10Т в розчинниках ethaline (а) і reline (б). Швидкість сканування потенціалу 200 мВ/с, температура 25°C. Потенціали виміряні і наведені у шкалі срібного електрода порівняння

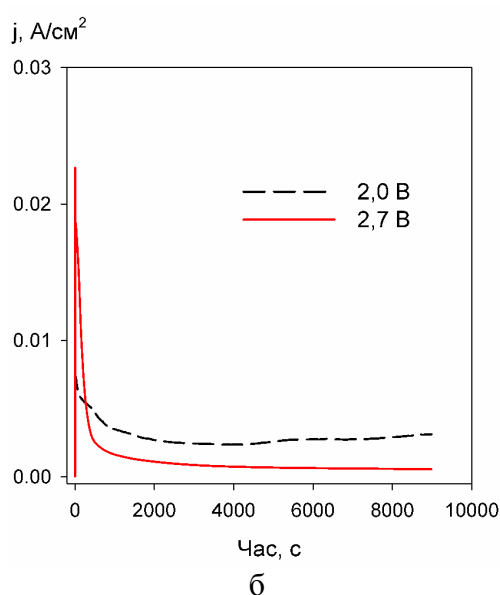
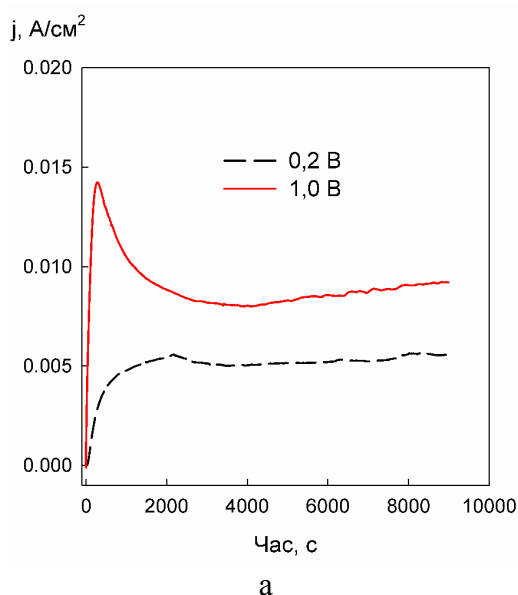


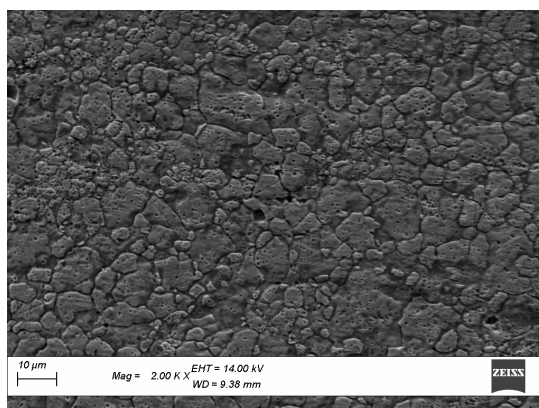
Рис. 2. Хроноамперограми сталі 12Х18Н10Т в розчинниках ethaline (а) і reline (б) при потенціалах, вказаних на рисунку. Температура 25°C

Вплив анодного оброблення в DES на морфологію і хімічний склад поверхні та мікрошорсткість нержавіючої сталі

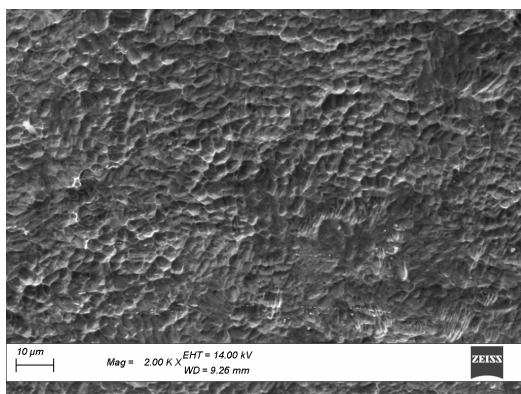
Морфологія поверхні нержавіючої сталі до анодного оброблення в DES за даними сканувальної електронної мікроскопії (рис. 3а) характеризується вираженою неоднорідністю рельєфу: на фоні відносно гладких ділянок спостерігаються

численні локальні виступи і нодулярні утворення. Поверхня має відносно високу щільність крайових топографічних переходів (різкі зміни інтенсивності на зображенні), що свідчить про грубу текстуру з великою кількістю кромок і меж між окремими утвореннями.

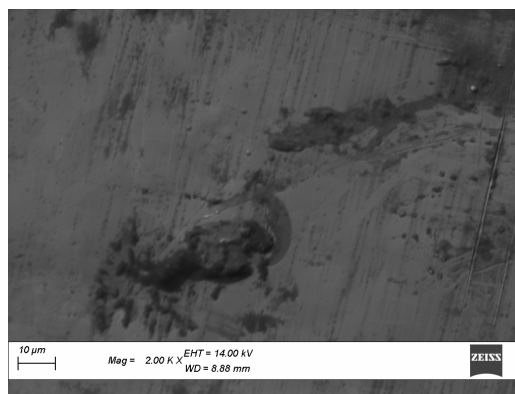
Після електрохімічного оброблення в DES морфологія поверхні нержавіючої сталі характе-



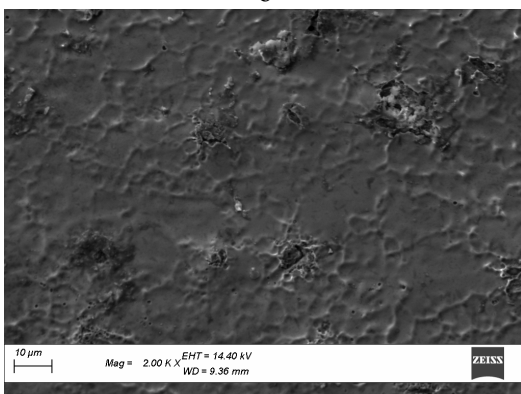
а



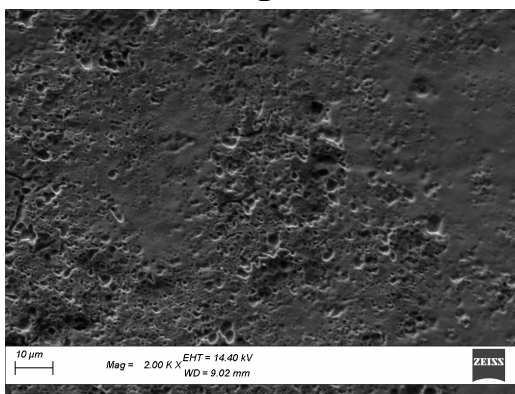
б



в



г



д

Рис. 3. Мікрофотографії SEM поверхні нержавіючої сталі 12X18H10T: а – без анодного оброблення; б – після оброблення в ethaline при 0,2 В; в – після оброблення в ethaline при 1,0 В; г – після оброблення в reline при 2,0 В; д – після оброблення в reline при 2,7 В

ризується переважно згладженими ділянками з великою кількістю дрібних локальних яскравих елементів/агрегатів, що рівномірно розподілені по полірованій площині (рис. 3б–д). При цьому контраст локальних елементів на мікрофотографіях залишається відчутним, що вказує на наявність численних дрібних топографічних нерівностей (міні-виступи, мікропори).

Згладжування мікрорельєфу поверхні після потенціостатичного оброблення в ethaline і reline знаходить підтвердження в результатах визначення величини мікрошорсткості R_a (табл. 1). Видно, що значення R_a зменшується. Найсуттєвіше вирівнювання мікропрофілю спостерігається при обробленні в ethaline при 1,0 В, що добре корелює із вельми рівномірною картиною мікрорельєфу рис. 3в. Таким чином, анодне потенціостатичне оброблення сталі 12Х18Н10Т в низькотемпературних евтектичних розчинниках ethaline і reline за обраних значень потенціалу приводить до електрополірування, що підтверджується також і візуальними спостереженнями (поверхня стає блискучою).

Для встановлення характеру впливу анодного оброблення сталі 12Х18Н10Т у досліджених DES на хімічний склад поверхні були здійснені дослідження методом енерго-дисперсійного рентгенівського мікроаналізу (EDX) (рис. 4), а дані про визначений кількісний вміст окремих елементів зведено у табл. 2. Слід зазначити, що окрім таких елементів, як Fe, Cr, Ni, C і O, результати визначення яких на поверхні надано у таблиці, на поверхні також виявлена присутність Si, P, S, Ti, Mn, Mo. Однак вміст цих елементів на поверхні менше 1 мас.%, тобто нижче відносної похибки методу EDX. Тому дані про вміст цих елементів у табл. 2 не наводяться, а сумарний вміст вказаних елементів, очевидно, є дещо меншим за 100%.

Таблиця 1
Вплив анодного оброблення сталі 12Х18Н10Т в розчинниках ethaline та reline на коефіцієнт мікрошорсткості поверхні

Евтектичний розчинник	Потенціал анодного оброблення, В	R_a , мкм
– (без анодного оброблення)	–	0,50
ethaline	0,2	0,34
	1,0	0,26
reline	2,0	0,31
	2,7	0,29

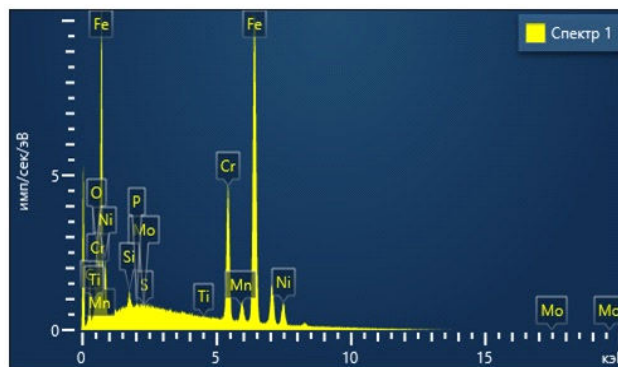


Рис. 4. Типовий спектр EDX поверхні зразків нержавіючої сталі 12Х18Н10Т (до анодного оброблення)

З отриманих даних випливає, що після анодного оброблення нержавіючої сталі в DES відбувається зниження поверхневої концентрації заліза, також дещо знижується вміст нікелю. При цьому поверхнева концентрація хрому практично не змінюється. Таким чином, при електрохімічному поліруванні проходить певне селективне розчинення Fe та Ni. На поверхні спостерігається також зростання концентрації кисню та з'являється у помітній кількості вуглець. Це може бути пов'язане з міцною адсорбцією компонентів евтектичного розчинника на полірованій поверхні та утворенням більш щільних окисних пасивуючих шарів. Цікаво, що в жодному експерименті не вдалося зафіксувати присутності азоту (потенційним джерелом якого міг би бути холінкатион), а наявність хлору на поверхні (очевидно у формі хлориду) у слідових кількостях відмічалася тільки в окремих експериментах.

Вплив електрохімічного полірування на корозійну стійкість нержавіючої сталі

Зміни у морфології поверхні та селективне травлення окремих компонентів у результатів анодного оброблення нержавіючої сталі в евтектичних розчинниках може вплинути на її корозійну стійкість [5], що має неабияке значення при практичному застосуванні. Для оцінювання корозійної поведінки був використаний метод лінійної вольтамперометрії у агресивному середовищі 3% NaCl (рис. 5а). Видно, що анодне оброблення сталі в обох типах використаних DES приводить до підвищення перенапруги виділення водню та помітного зниження густини струмів, що відповідають пітингоутворенню. Оскільки поблизу корозійного потенціалу сталь знаходиться у пасивному стані, внаслідок чого на поляризаційній кривій, побудованій у напівлогарифмічних координатах, тут немає чітко вираженої лінійної ділянки (рис. 5б), то тут складно безпо-

середньо визначити швидкість корозії шляхом екстраполяції тафелівської ділянки анодного розчинення на корозійний потенціал. Тому для оцінювання корозійної поведінки було проведено порівняння густин струму анодного розчинення, що відповідають певному фіксованому потенціалу на ділянці пасивного стану. У табл. 3 наведені визначені за даними рис. 5 густини струму пасивного розчинення при потенціалі $-0,1$ В. Як випливає з отриманих результатів, анодне потенціостатичне оброблення сталі приводить до зниження струму пасивного розчинення, що означає утворення більш щільної пасивуючої плівки з покращеними захисними властивостями. Наявне, електрополірування нержавіючої сталі в DES приводить до формування рівномірної мікроструктури поверхні металу з меншою кількістю дефектів, на яких, насамперед, розвиваються корозійні процеси, включаючи пітинг. Також вагомим чинником зростання корозійної стійкості є

селективне витравлення заліза і формування на поверхні плівки адсорбованих органічних сполук.

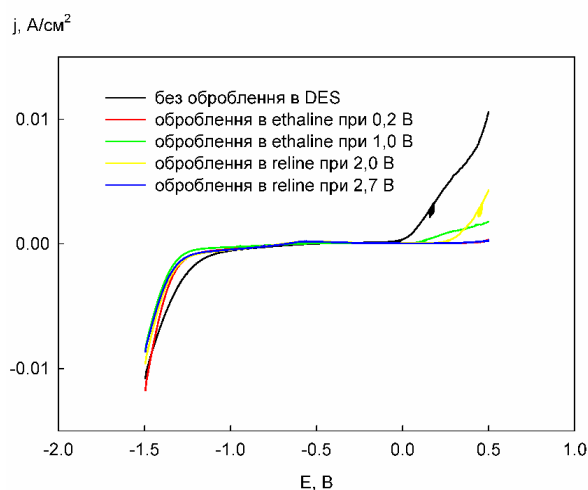
Вплив електрохімічного полірування на електрокаталітичну активність нержавіючої сталі

Як відомо [18], нержавіючі сталі (включаючи AISI 321) є перспективними електрокаталітичними матеріалами для організації катодного і анодного процесів при електролізі водних лужних розчинів для генерації «зеленого» водню. Тому було цікавим встановити характер впливу електрополірування сталі на кінетику електровідділення водню і кисню у лужному розчині, а також анодного окислення карбаміду, яке є перспективною альтернативою реакції виділення кисню, сприяючи зниженню енерговитрат на електроліз [19,20]. Відповідні циклічні вольтамперні криві, отримані у водних розчинах 1 М NaOH і 1 М NaOH + $0,33$ М $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ на сталі 12X18H10T до та після її потенціостатичного оброблення в DES, наведені на рис. 6 і 7.

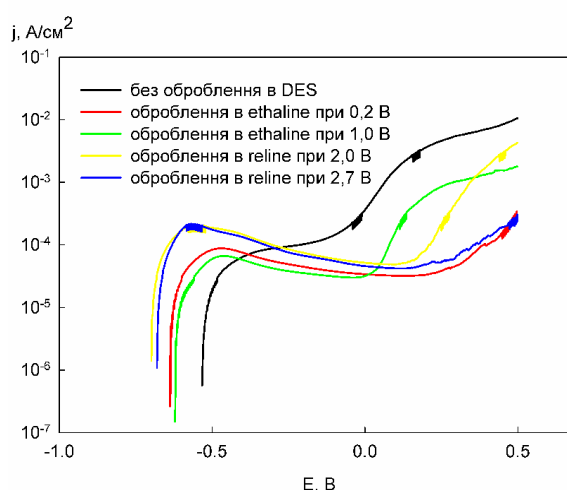
Таблиця 2

Вплив анодного оброблення нержавіючої сталі 12X18H10T в розчинниках ethaline та reline на хімічний склад поверхні, визначений методом EDX

Використаний евтектичний розчинник	Потенціал анодного оброблення, В	Вміст елементів, мас.%				
		C	O	Cr	Fe	Ni
— (без анодного оброблення)	—	—	1,14	16,62	71,49	9,32
ethaline	0,2	8,78	2,64	16,16	61,67	8,16
	1,0	4,66	2,68	16,69	65,39	8,70
reline	2,0	7,67	1,60	16,21	63,47	8,48
	2,7	6,49	2,47	16,08	63,98	8,69



а



б

Рис. 5. а — Вольтамперні криві анодного розчинення необробленого і анодно обробленого в DES (див. підписи на рисунку) сталі 12X18H10T у водному розчині 3% NaCl (швидкість розгортки потенціалу 10 мВ/с, температура 25°C); б — анодні ділянки відповідних вольтамперних кривих у напівлогарифмічних координатах

На циклічних вольтамперограмах (рис. 6) у розчині 1 М NaOH катодна хвиля відповідає реакції виділення водню, а анодна — реакції виділення кисню. Видно, що на електрополірованій поверхні сталі перенапряга виділення водню несуттєво зростає, а от перенапряга виділення кисню дещо знижується при обробленні в ethaline при 0,2 В та в reline при обох реалізованих значеннях потенціалів (2,0 і 2,7 В) і дещо зростає при обробленні в ethaline при 1,0 В.

На циклічних вольтамперограмах (рис. 7), заереєстрованих в розчині 1 М NaOH+0,33 М CO(NH₂)₂, не з'являються характерні хвилі струму при ~0,4–0,5 В, що типові для електрокаталітичного окислення карбаміду на нікелі та нікельвмісних

матеріалах [16,17,19]. Таким чином, дана нержавіюча сталь не проявляє вибіркової електрокаталітичну активність стосовно реакції окислення карбаміду, напевне, унаслідок формування на поверхні специфічної пасивуючої плівки, на якій протікає, головним чином тільки виділення кисню. Втім, не можна виключити, що анодне окислення карбаміду накладається у даному випадку на реакцію виділення кисню. Електрополірування сталі дещо змінює перенапряга анодного процесу. Для зручності порівняння у табл. 4 зведені густини анодного струму при довільно обраному потенціалі +1,0 В, безпосередньо зчитані з поляризаційних кривих рис. 6 і 7 для прямого (анодного) скану вольтамперної кривої.

З отриманих даних видно, що електрополірування досліджуваної сталі у низькотемпературних евтектичних розчинниках впливає на густину струму виділення кисню, що напевне визначається відповідними змінами у хімічному складі поверхні та структурно-топографічними чинниками. У деяких випадках спостерігається певне зростання густини струму.

Висновки

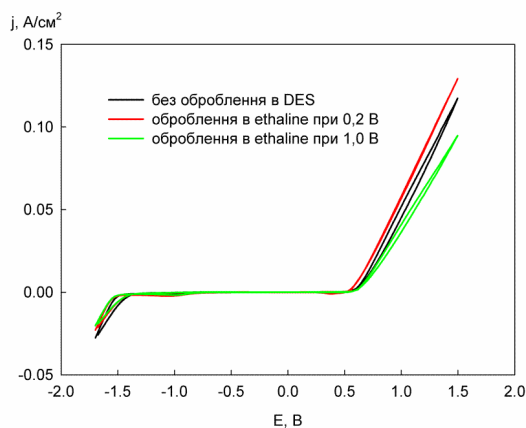
Вперше встановлено характер впливу анодного потенціостатичного оброблення сталі 12X18H10T в низькотемпературних евтектичних розчинниках ethaline та reline на мікропрофіль, хімічний склад, мікрошорсткість поверхні, а також на швидкість корозійного руйнування та електрокаталітичну поведінку.

Виявлено, що анодне оброблення сталі 12X18H10T приводить до її електрохімічного полірування. Електрохімічно полірована в низько-

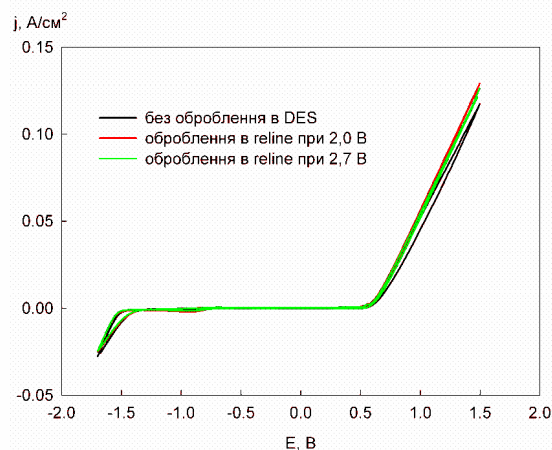
Таблиця 3

Величини густини струму анодного розчинення сталі 12X18H10T у 3% NaCl при потенціалі –0,1 В без оброблення і після оброблення в евтектичних розчинниках ethaline та reline

Евтектичний розчинник	Потенціал анодного оброблення, В	Густина струму анодного розчинення сталі 3% NaCl при E=–0,1 В
– (без анодного оброблення)	–	$1,44 \cdot 10^{-4}$
ethaline	0,2	$3,76 \cdot 10^{-5}$
	1,0	$3,12 \cdot 10^{-5}$
reline	2,0	$5,98 \cdot 10^{-5}$
	2,7	$5,52 \cdot 10^{-5}$



а



б

Рис. 6. Циклічні вольтамперні криві зразків сталі 12X18H10T, що необроблені і анодно оброблений в ethaline (а) і reline (б), у водному розчині 1 М NaOH. Швидкість сканування потенціалу 10 мВ/с, температура 25°C

температурних евтектичних розчинниках сталь проявляє підвищену корозійну стійкість у агресивному середовищі 3% NaCl, однак не було встановлено помітних позитивних змін стосовно її електрокаталітичної активності у реакції виділення водню в лужному середовищі. У сполученому анодному процесі в деяких випадках зафіксовано певне зростання анодної густини струму.

Подяки

Автори висловлюють подяку МОН України за фінансування даної роботи в рамках проекту «Фундаментальні аспекти електрохімічних процесів створення і функціонування електрокаталізаторів для «зеленої» водневої енергетики», номер держреєстрації 0124U000563).

Автори щиро вдячні д.т.н. Корнію С.А.

(Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України, м. Львів) за допомогу у здійсненні SEM та EDX досліджень.

Автори висловлюють подяку к.х.н. Кожурі О.В. (Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро) за люб'язне надання зразків сталі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Research progress on the relationship between microstructure and properties of AISI 321 stainless steel* / Huang Z., Zhang J., Ma Z., Yuan S., Yang H. // *Appl. Sci.* – 2024. – Vol.14. – Art. No. 10196.

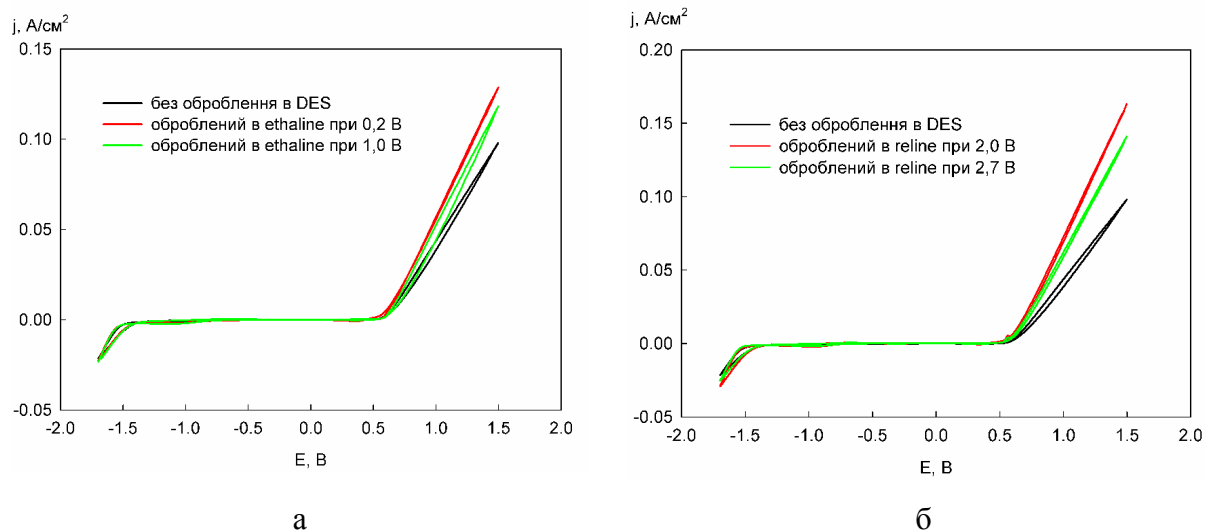


Рис. 7. Циклічні вольтамперні криві зразків сталі 12X18H10T, що необроблені і анодно оброблений в ethaline (а) і reline (б), у водному розчині 1 М NaOH+0,33 М CO(NH₂)₂. Швидкість сканування потенціалу 10 мВ/с, температура 25°C

Таблиця 4

Величини густини струму анодного виділення кисню на сталі 12X18H10T у розчинах 1 М NaOH та 1 М NaOH+0,33 М CO(NH₂)₂ при потенціалі +0,1 В без оброблення та після оброблення в евтектичних розчинниках ethaline та reline

Евтектичний розчинник	Потенціал анодного оброблення, В	Густина струму анодного виділення кисню при E=+1,0 В	
		1 М NaOH	1 М NaOH+0,33 М CO(NH ₂) ₂
— (без анодного оброблення)	—	0,052	0,044
ethaline	0,2	0,058	0,058
	1,0	0,041	0,053
reline	2,0	0,055	0,073
	2,7	0,053	0,060

2. *Lyczkowska-Widlak E., Lochynski P., Nawrat G.* Electrochemical polishing of austenitic stainless steels // *Materials*. – 2020. – Vol.13. – Art. No. 2557.
3. *Landolt D., Chauvy P.F., Zinger O.* Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: fundamental aspects and new developments // *Electrochim. Acta*. – 2003. – Vol.48. – P.3185-3201.
4. *Han W., Fang F.* Fundamental aspects and recent developments in electropolishing // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2019. – Vol.139. – P.1-23.
5. *Kityk A., Pavlik V., Hnatko M.* Green electropolishing using choline chloride-based deep eutectic solvents: a review // *J. Mol. Liq.* – 2023. – Vol.392. – Art. No. 123519.
6. *Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications* / Hansen B.B., Spittle S., Chen B., Poe D., Zhang Y., Klein J.M., et al. // *Chem. Rev.* – 2021. – Vol.121. – P.1232-1285.
7. *Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications* / Zhang Q., Vigier K.D.O., Royer S., Jerome F. // *Chem. Soc. Rev.* – 2012. – Vol.41. – P.7108-7146.
8. *Abbott A.P.* Deep eutectic solvents and their application in electrochemistry // *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.* – 2022. – Vol.36. – Art. No. 100649.
9. *Electrochemical surface treatment of manganese stainless steel using several types of deep eutectic solvents* / Kityk A., Hnatko M., Pavlik V., Boca M. // *Mater. Res. Bull.* – 2021. – Vol.141. – Art. No. 111348.
10. *Electropolishing of Re-melted SLM stainless steel 316L parts using deep eutectic solvents: 3x3 full factorial design* / Alrbaey K., Wimpenny D.I., Al-Barzinjy A.A., Moroz A. // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2016. – Vol.25. – P.2836-2846.
11. *Electropolishing of stainless steels in a choline chloride based ionic liquid: an electrochemical study with surface characterisation using SEM and atomic force microscopy* / Abbott A., Capper G., McKenzie K.J., Glidle A., Ryder K.S. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2006. – Vol.8. – P.4214-4221.
12. *Voltammetric and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid* / Abbott A.P., Capper G., McKenzie K.J., Ryder K.S. // *Electrochim. Acta*. – 2006. – Vol.51. – P.4420-4425.
13. *Effect of preliminary electropolishing on corrosion resistance of mild steel in a deep eutectic solvent Ethaline* / Kityk A.A., Rublova Y.D., Bannyk N.G., Protsenko V.S., Danilov F.I. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2018. – No. 4. – P.14-18.
14. *Electropolishing of stainless steel with a high content of manganese in the deep eutectic mixture Ethaline* / Kityk A., Kun O., Pavlik V., Boca M. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2019. – No. 6. – P.92-98.
15. *Effect of electropolishing of metals and alloys in a deep eutectic solvent on their corrosion characteristics* / Kityk A.A., Protsenko V.S., Danilov F.I., Pavlik V., Boca M. // *Mater. Sci.* – 2021. – Vol. 56. – P.629-633.
16. *Anodic surface treatment of nickel in eutectic ionic liquids based on choline chloride for electrochemical polishing and enhancement of electrocatalytic activity in hydrogen evolution reaction* / Protsenko V.S., Makhota D.O., Butyrina T.E., Korniy S.A., Danilov F.I. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2024. – No. 1. – P.89-98.
17. *Makhota D.O., Butyrina T.E., Protsenko V.S.* Electrochemical treatment of nickel-chromium alloy in deep eutectic solvents // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2025. – No. 4. – P.103-111.
18. *Barauskiene I., Laukaitis G., Valatka E.* Stainless steel as an electrocatalyst for overall water splitting under alkaline and neutral conditions // *J. Electroanal. Chem.* – 2023. – Vol.950. – Art. No. 117880.
19. *Recent progress in non-noble metal-based electrocatalysts for urea-assisted electrochemical hydrogen production* / Paygozar S., Aghdam A.S.R., Hassanzadeh E., Andaveh R., Darband G.B. // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol.48. – P.7219-7259.
20. *Protsenko V.S.* Thermodynamic aspects of urea oxidation reaction in the context of hydrogen production by electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol.48. – P.24207-24211.

Надійшла до редакції 14.05.2025

ELECTROPOLISHING OF 12CR18NI10TI CHROMIUM-NICKEL STAINLESS STEEL IN DEEP EUTECTIC SOLVENTS

D.O. Makhota, T.E. Butyrina, V.S. Protsenko *
Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, Ukraine

* e-mail: Vprotsenko7@gmail.com

The main features of anodic potentiostatic treatment of austenitic stainless steel grade 12Cr18Ni10Ti (AISI 321 equivalent) in deep eutectic solvents ethaline and reline, which are eutectic mixtures of choline chloride with ethylene glycol and urea, respectively, have been studied. Based on cyclic voltammetry data, two anodic treatment potentials were selected: 0.2 V and 1.0 V in ethaline, and 2.0 V and 2.7 V in reline (vs. Ag quasi-reference electrode). The treatment duration was 150 minutes at a temperature of 25°C. Scanning electron microscopy, surface micro-roughness measurements, and visual inspection confirmed that electropolishing of the steel occurred in all cases. Energy-dispersive X-ray microanalysis showed that electropolishing of 12Cr18Ni10Ti steel in ethaline and reline is accompanied by selective iron dissolution and some surface enrichment with carbon and oxygen. It was found that the electropolished surface exhibits enhanced resistance to corrosion damage in an aggressive 3% NaCl environment. In some cases, electropolishing slightly enhanced the electrocatalytic activity of the steel surface toward the anodic reaction coupled with cathodic hydrogen evolution in an aqueous alkaline medium.

Keywords: deep eutectic solvents; stainless chromium-nickel steel; electropolishing; corrosion resistance; electrocatalytic activity.

REFERENCES

1. Huang Z, Zhang J, Ma Z, Yuan S, Yang H. Research progress on the relationship between microstructure and properties of AISI 321 stainless steel. *Appl Sci*. 2024; 14: 10196. doi: 10.3390/app142210196.
2. Lyczkowska-Widlak E, Lochynski P, Nawrat G. Electrochemical polishing of austenitic stainless steels. *Materials*. 2020; 13: 2557. doi: 10.3390/ma13112557.
3. Landolt D, Chauvy PF, Zinger O. Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: fundamental aspects and new developments. *Electrochim Acta*. 2003; 48: 3185-3201. doi: 10.1016/S0013-4686(03)00368-2.
4. Han W, Fang F. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *Int J Mach Tools Manuf*. 2019; 139: 1-23. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.01.001.
5. Kityk A, Pavlik V, Hnatko M. Green electropolishing using choline chloride-based deep eutectic solvents: a review. *J Mol Liq*. 2023; 392: 123519. doi: 10.1016/j.molliq.2023.123519.
6. Hansen BB, Spittle S, Chen B, Poe D, Zhang Y, Klein JM, et al. Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications. *Chem Rev*. 2021; 121: 1232-1285. doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00385.
7. Zhang Q, Vigier KDO, Royer S, Jerome F. Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chem Soc Rev*. 2012; 41: 7108-7146. doi: 10.1039/c2cs35178a.
8. Abbott AP. Deep eutectic solvents and their application in electrochemistry. *Curr Opin Green Sustainable Chem*. 2022; 36: 100649. doi: 10.1016/j.cogsc.2022.100649.
9. Kityk A, Hnatko M, Pavlik V, Boca M. Electrochemical surface treatment of manganese stainless steel using several types of deep eutectic solvents. *Mater Res Bull*. 2021; 141: 111348. doi: 10.1016/j.materresbull.2021.111348.
10. Alrbaey K, Wimpenny DI, Al-Barzinjy AA, Moroz A. Electropolishing of Re-melted SLM stainless steel 316L parts using deep eutectic solvents: 3x3 full factorial design. *J Mater Eng Perform*. 2016; 25: 2836-2846. doi: 10.1007/s11665-016-2140-2.
11. Abbott A, Capper G, McKenzie KJ, Glidle A, Ryder KS. Electropolishing of stainless steels in a choline chloride based ionic liquid: an electrochemical study with surface characterisation using SEM and atomic force microscopy. *Phys Chem Chem Phys*. 2006; 8: 4214-4221. doi: 10.1039/b607763n.
12. Abbott AP, Capper G, McKenzie KJ, Ryder KS. Voltammetric and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid. *Electrochim Acta*. 2006; 51: 4420-4425. doi: 10.1016/j.electacta.2005.12.030.
13. Kityk AA, Rublova YD, Bannyk NG, Protsenko VS, Danilov FI. Effect of preliminary electropolishing on corrosion resistance of mild steel in a deep eutectic solvent Ethaline. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2018; (4): 14-18.
14. Kityk A, Kun O, Pavlik V, Boca M. Electropolishing of stainless steel with a high content of manganese in the deep eutectic mixture Ethaline. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2019; (6): 92-98. doi: 10.32434/0321-4095-2019-127-6-92-98.
15. Kityk AA, Protsenko VS, Danilov FI, Pavlik V, Boca M. Effect of electropolishing of metals and alloys in a deep eutectic solvent on their corrosion characteristics. *Mater Sci*. 2021; 56: 629-633. doi: 10.1007/s11003-021-00474-w.
16. Protsenko VS, Makhota DO, Butyrina TE, Korniy SA, Danilov FI. Anodic surface treatment of nickel in eutectic ionic liquids based on choline chloride for electrochemical polishing and enhancement of electrocatalytic activity in hydrogen evolution reaction. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024; (1): 89-98. doi: 10.32434/0321-4095-2024-152-1-89-98.
17. Makhota DO, Butyrina TE, Protsenko VS. Electrochemical treatment of nickel-chromium alloy in deep eutectic solvents. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2025; (4): 103-111. doi: 10.32434/0321-4095-2025-161-4-103-111.
18. Barauskiene I, Laukaitis G, Valatka E. Stainless steel as an electrocatalyst for overall water splitting under alkaline and neutral conditions. *J Electroanal Chem*. 2023; 950: 117880. doi: 10.1016/j.jelechem.2023.117880.
19. Paygozar S, Aghdam ASR, Hassanizadeh E, Andaveh R, Darband GB. Recent progress in non-noble metal-based electrocatalysts for urea-assisted electrochemical hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy*. 2023; 48: 7219-7259. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.087.
20. Protsenko VS. Thermodynamic aspects of urea oxidation reaction in the context of hydrogen production by electrolysis. *Int J Hydrogen Energy*. 2023; 48: 24207-24211. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.295.