

УДК 621.357.7

*Д.О. Махота, Т.Є. Бутиріна, В.С. Проценко***ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ СПЛАВУ НІКЕЛЬ-ХРОМ В НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКАХ****Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна**

У даній роботі розглядається вплив анодного потенціостатичного оброблення сплаву нікель-хром в низькотемпературних евтектичних розчинниках ethaline та reline (суміші холін хлориду з етиленгліколем і карбамідом, відповідно, що мають евтектичний склад) на морфологію, хімічний склад поверхні, мікрошорсткість, корозійну стійкість та електрокаталітичну активність. Електрохімічне оброблення проводилося при двох довільно обраних потенціалах, що відповідають анодному розчиненню сплаву Ni–Cr у вказаних евтектичних іонних рідинах: 0,2 і 1,0 В для ethaline та 2,0 і 2,7 В для reline (відносно срібного електрода порівняння) при температурі 25°C і тривалості 150 хв. Показано, що анодне оброблення сприяє переважному розчиненню хромової компоненти сплаву. У результаті анодного оброблення спостерігається зменшення кількості дефектів на поверхні сплаву і зниження коефіцієнту мікрошорсткості R_a (від приблизно 0,46 мкм до 0,25–0,35 мкм), тобто відбувається електрохімічне полірування. Виявлено, що анодне модифікування поверхні ніхрому в низькотемпературних евтектичних розчинниках приводить до зростання корозійної стійкості та зниження електрокаталітичної активності стосовно реакцій виділення водню та кисню, а також електрохімічного окислення карбаміду у водному лужному розчині. Обговорені можливі причини спостережених ефектів.

Ключові слова: сплав нікель-хром, електрохімічна модифікація, електрополірування, корозійна стійкість, електрокаталітичні властивості, низькотемпературні евтектичні розчинники.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-161-4-103-111**Вступ**

Сплав ніхром (Ni–Cr), що, як правило, містить 55–80% Ni та 15–25% Cr (часто з добавками Fe і деяких інших металів), відомий завдяки своїй високій електро- та теплостійкості, значному питомому опору та корозійній стабільності. Через це його широко використовують у нагрівальних елементах, електропечах, а також у жаростійкому промисловому обладнанні, електроніці та медицині. Попри здатність до пасивування, поверхні з ніхрому не завжди мають достатню гладкість і морфологічну однорідність, що може призводити до локальних дефектів,

підвищеної шорсткості тощо. Саме тому вироби з ніхрому для забезпечення дзеркального блиску, максимального вирівнювання рельєфу і видалення мікронерівностей часто піддають механічному поліруванню.

Перспективною альтернативою трудомісткій процедурі механічного полірування може бути електрохімічне полірування [1,2]. Цей метод, на відміну від механічного чи хімічного шліфування, забезпечує вибіркове анодне розчинення виступів поверхні та зменшує шорсткість до нанометрового рівня, ефективно видаляючи мікродефекти.

© 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/>).

Electrochemical treatment of nickel-chromium alloy in deep eutectic solvents

Оскільки традиційні водні електроліти для полірування зазвичай базуються на висококонцентрованих розчинах кислот (сульфатної, хромової, ортофосфорної тощо), що викликає очевидні застереження стосовно потенційного забруднення навколишнього середовища, наразі інтенсивно розробляються екологічно чисті альтернативи на основі нового покоління іонних рідин — низькотемпературних евтектичних розчинників (deep eutectic solvent, DES) [3]. Нещодавні дослідження продемонстрували успішне застосування електрохімічних систем на основі DES до нікелю, кобальту, алюмінію, сталі та інших металів і сплавів, забезпечуючи утворення дзеркальних та рівних поверхонь [4–8]. Втім, систематичні дослідження електрохімічного полірування саме сплаву Ni-Cr у DES у наявній літературі не описані.

Тому метою даної роботи є встановлення основних закономірностей електрохімічного полірування сплаву ніхром в двох типових представниках DES: ethaline та reline, що є рідкими евтектичними сумішами холін хлориду з етиленгліколем і карбамідом, відповідно.

Методика експерименту

Зразки для оброблення виготовляли зі стрічки сплаву ніхром товщиною 0,5 мм. Методика приготування ethaline і reline та анодного потенціостатичного оброблення металеві поверхні в цих розчинниках, а також дослідження їх фізико-хімічних властивостей, хімічного складу і особливостей морфології поверхні детально описана у попередніх публікаціях [9–11].

Зазначимо, що корозійну поведінку сплаву до і після анодного оброблення в DES оцінювали методом лінійної вольтамперометрії у агресивному водному середовищі 3% NaCl, а електрокаталітичні властивості — методом циклічної вольтамперометрії у водних розчинах 1 М NaOH і 1 М NaOH+0,33 М $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Для всіх електрохімічних вимірювань використовували потенціостат Gamry Reference 3000. При дослідженні анодної поведінки сплаву ніхром в DES всі потенціали виміряні і наведені відносно срібного електрода порівняння, зануреного у відповідний евтектичний розчинник, а при вивченні корозійної та електрокаталітичної поведінки з використанням водних електролітів потенціали виміряні відносно водного насиченого хлорсрібного електрода порівняння.

Результати та обговорення

Закономірності анодного оброблення сплаву ніхром в DES

На рис. 1 наведені циклічні вольтамперні криві, що характеризують анодну поведінку сплаву Ni-Cr в ethaline і reline. В обох випадках на кривих наявні характерні піки активного розчинення, після проходження яких спостерігається сольова пасивація, обумовлена, напевне, блокуванням електродної поверхні за рахунок утворення фазового шару продуктів розчинення [9,10]. Характерною особливістю є те, що за однакових рівних умов максимально досяжні струми анодного розчинення ніхрому в ethaline приблизно на порядок вищі, ніж в reline. Така ж відмінність спостерігалася раніше при вольтампе-

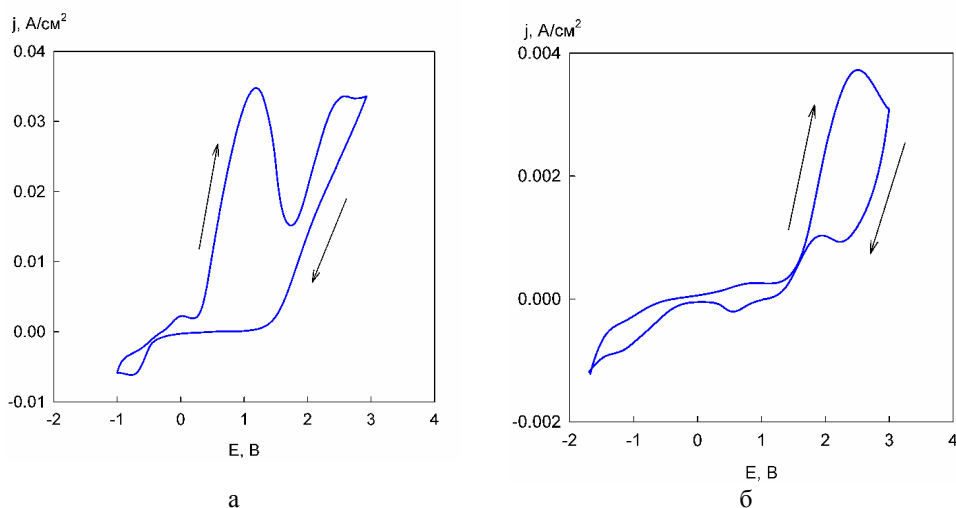


Рис. 1. Циклічні вольтамперні криві сплаву ніхром в ethaline (а) і reline (б). Швидкість сканування потенціалу 200 мВ/с, температура 25°C. Стрілки вказують напрямок розгортання потенціалу — спочатку у бік зростання потенціалу, а потім у бік зниження. Потенціали виміряні і наведені у шкалі срібного електрода порівняння, зануреного у відповідний DES

рометричному дослідженні розчинення «чистого» нікелю [11]. Цей ефект може бути пов'язаний із суттєво вищою в'язкістю *reline* у порівнянні з *ethaline* і відповідними транспортними обмеженнями швидкості електрохімічного процесу розчинення в умовах накладання на електрод достатньо швидкої розгортки потенціалу.

Для подальших експериментів були обрані по два значення потенціалів для потенціостатичного оброблення сплаву нікель-хром: 0,2 В і 1,0 В в *ethaline* та 2,0 В і 2,7 В в *reline*.

Хроноамперограми розчинення сплаву нікель-хром в DES за обраних величин потенціалів (рис. 2) показують, що після увімкнення поляризації струм різко зростає, а потім починає знижуватись. Після кількох сотень секунд у випадку *ethaline* та приблизно тисячі секунд у випадку *reline* густина струму стає майже сталою, тобто досягається квазістаціонарний режим анодного оброблення.

Всі подальші експерименти проводили при тривалості анодного оброблення поверхні сплавів 150 хвилин (тобто 9000 секунд).

Цікаво відзначити, що квазістаціонарні значення анодного струму для *ethaline* (рис. 2а) мають порядок близько 10^{-6} А/см², тоді як для *reline* квазістаціонарні значення анодного струму (рис. 2б) суттєво вищі: порядку 10^{-3} А/см². Така тенденція повністю протилежна спостереженій у випадку накладання відносно швидкої розгортки потенціалу (рис. 1), де, як вже зазначалося вище, анодні струми для системи з розчинником *ethaline*, навпаки, вищі, ніж з розчинником *reline*. Пояснення такому, на перший погляд, неочікуваному ефекту може бути пов'язане з принципово різними умовами оброблення металеві поверхні

та відповідною еволюцією приелектродного шару та стану поверхні електрода у цих двох серіях експерименту. Скоріш за все, різке падіння і подальша стабілізація струму на хроноамперограмах обумовлена, насамперед, формуванням сольової фазової плівки з продуктів анодного розчинення сплаву (так звана сольова пасивація [9–11]), склад, в'язкість та інші характеристики якої суттєво відрізняються для двох використаних у роботі евтектичних розчинників, що і визначає відповідні відмінності у струмах за умов оброблення в потенціостатичному режимі та в режимі накладання швидкої розгортки потенціалу. Не виключено також, що відмінності у квазістаціонарних струмах при потенціостатичному електролізі обумовлені змінами у хімічному стані поверхні сплаву в ході його анодного розчинення (див. нижче).

SEM і EDX дослідження та вимірювання мікроморфоструктури

Вплив анодного оброблення сплаву Ni-Cr в *ethaline* та *reline* на морфологічні особливості поверхні вивчали методом сканувальної електронної мікроскопії (scanning electron microscopy, SEM). Типові SEM-зображення показані на рис. 3. Видно, що необроблена поверхня сплаву містить певну кількість дефектів, що виникають при промисловому виробленні стрічки. Оброблення ніхрому в *ethaline* приводить до формування мікропрофіля, що нагадує поверхню після селективного витравлення окремих кристалітів. Мікропрофіль поверхні сплаву після анодного оброблення в *reline* має дещо інший вигляд, для якого характерна наявність невеликих піттингів. Так чи інакше, після анодного оброблення ніхрому у використаних DES поверхня хоча і не стає ідеально рівномірною, але кількість глибоких западин і

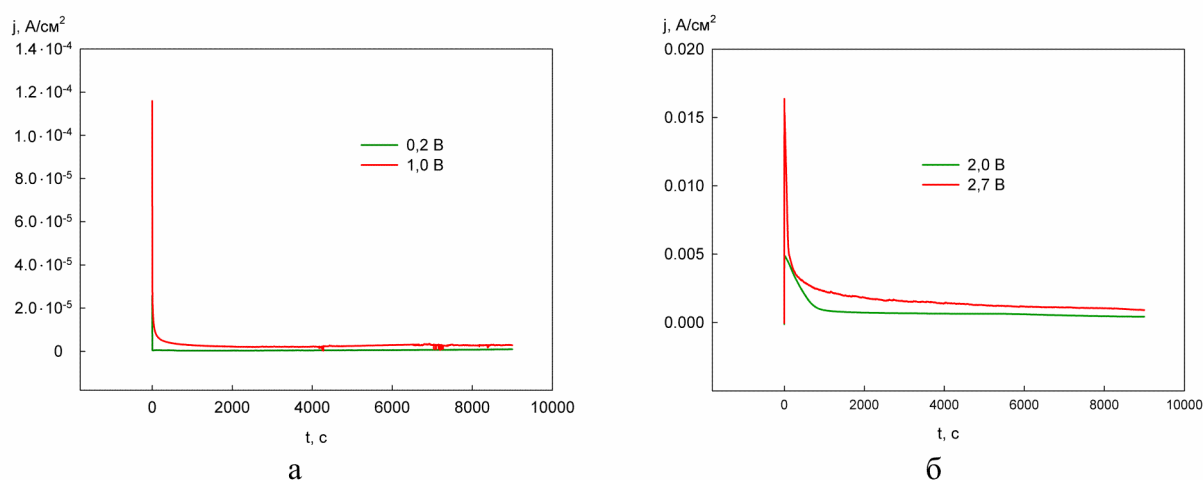


Рис. 2. Хроноамперограми сплаву нікель-хром в *ethaline* (а) і *reline* (б) при потенціалах, вказаних на рисунку. Температура 25°C

виступів на ній зменшується.

Цей висновок підтверджується безпосереднім вимірюванням параметра мікрошорсткості R_a (табл. 1): спостерігається його зменшення, що особливо помітно при використанні евтектичного розчинника reline (наприклад, після оброблення при потенціалі 2,7 В коефіцієнт мікрошорсткості зменшується на 46%).

Результати вимірювання коефіцієнта мікрошорсткості і спостережені зміни у паттернах по-

верхневої морфології добре узгоджуються із візуальними спостереженнями: після анодного оброблення в DES поверхня сплаву стає блискучою, що особливо проявляється при використанні розчинника reline.

Анодне модифікування поверхні в DES, окрім впливу на мікропрофіль поверхні, в принципі, може впливати і на хімічний склад поверхневих шарів. У табл. 2 наведені результати вимірювання хімічного складу методом енерго-дисперсійно-

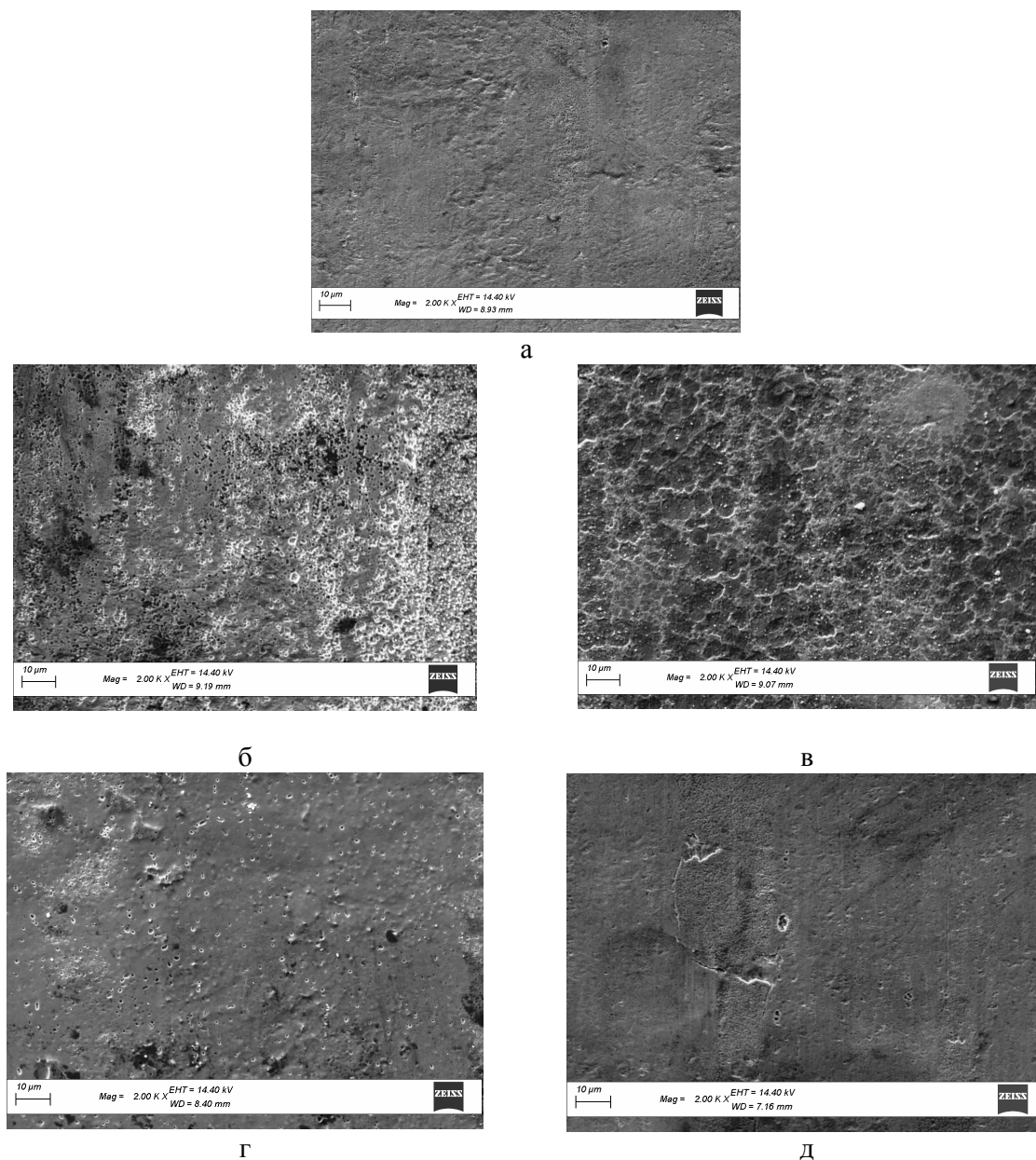


Рис. 3. SEM-зображення поверхні сплаву нікель-хром: а – електрохімічно не обробленого; б – обробленого в ethaline при потенціалі 0,2 В; в – обробленого в ethaline при потенціалі 1,0 В; г – обробленого в reline при потенціалі 2,0 В; д – обробленого в reline при потенціалі 2,7 В

го рентгенівського мікроаналізу (energy-dispersive X-ray analysis, EDX) для зразків, зображення поверхні яких показано на рис. 3. З отриманих результатів випливає, що у результаті потенціостатичного анодного оброблення сплаву Ni-Cr в DES його поверхня збагачується хромом. Враховуючи, що енерго-дисперсійний рентгенівський мікроаналіз визначає інтегрований хімічний склад покриття на глибині від поверхні до кількох десятків і навіть до кількох цілих мікрометрів, можна припустити, що збагачення хромом тонкого поверхневого моноатомного шару, який і визначає корозійно-електрохімічні і електрокаталітичні властивості, може бути навіть більш суттєвим, ніж це ідентифікується результатами EDX-аналізу. Таким чином, при анодному обробленні ніхрому в ethaline і reline відбувається переважне (селективне) розчинення хромового компоненту.

Таблиця 1
Вплив анодного оброблення сплаву нікель-хром в DES на коефіцієнт мікрошорсткості

Тип DES	Потенціал анодного оброблення, В	R _a , мкм
— (без анодного оброблення)	—	0,46
ethaline	0,2	0,35
	1,0	0,32
reline	2,0	0,26
	2,7	0,25

Таблиця 2
Вплив анодного оброблення сплаву нікель-хром в DES на вміст нікелю і хрому у поверхневому шарі за даними EDX-аналізу*

Тип DES	Потенціал анодного оброблення, В	Вміст елементів, мас. %	
		Cr	Ni
— (без анодного оброблення)	—	25,14	70,00
ethaline	0,2	24,47	69,56
	1,0	23,22	72,61
reline	2,0	22,42	68,93
	2,7	20,14	76,87

Примітка: * — Вміст інших елементів на поверхні (переважно кисню за рахунок часткового окислення і пасивації) — до суми 100%.

Вплив анодного оброблення на корозійну стійкість

Традиційно вважається, що електрохімічне полірування, зменшуючи кількість мікроефектів на поверхні і сприяючи утворенню більш рівномірних металевих шарів, приводить до підвищення корозійної стійкості металів і сплавів [1]. Зокрема, показано, що електрополірування в DES також має наслідком зниження швидкості корозійного руйнування цілої низки металів і сплавів [3]. Для встановлення характеру впливу електрополірування в ethaline і reline на корозійну стабільність сплаву нікель-хром були отримані поляризаційні криві анодного розчинення необроблених і анодно оброблених в DES зразків у агресивному середовищі 3% водного розчину NaCl за умов природної аерації (рис. 4). Видно, що на цих кривих спостерігаються квазіперіодичні осциляції струму, що часто має місце при анодному розчиненні металів за умов наявності пасивної плівки на поверхні [12]. На ділянці пасивного стану анодне оброблення сплаву приводить до зростання густини струму пасивації, напевне, через збіднення поверхневого шару хромом, для якого, як відомо, характерні дуже низькі густини струму у пасивному стані [13]. Втім, на ділянці транспасивного розчинення (>0,4 В) анодне оброблення сплаву Ni-Cr в ethaline і reline приводить до зниження густини струму розчинення сплаву.

Для оцінювання швидкості корозійного руйнування ніхрому в розчині 3% NaCl анодні ділянки поляризаційних кривих поблизу ста-

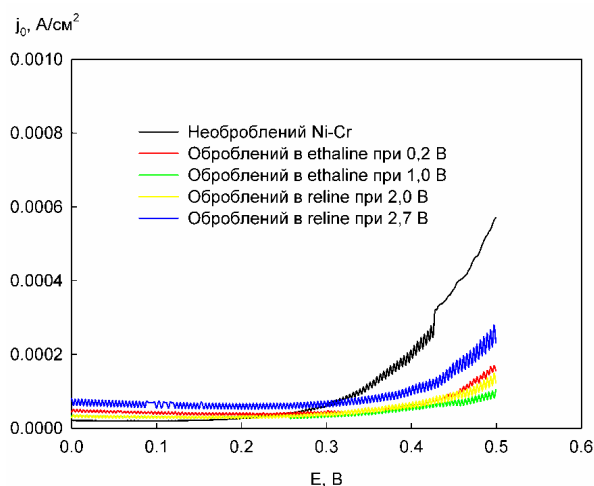


Рис. 4. Вольтамперні криві анодного розчинення необробленого і анодно обробленого в DES (див. підписи на рисунку) сплаву нікель-хром у водному 3%-вому розчині NaCl (швидкість сканування потенціалу 10 мВ/с, температура 25°C)

ціонарного потенціалу були побудовані у тафелівських координатах і екстрапольовані на виміряні значення стаціонарного потенціалу. Визначені таким чином густини струму корозії сплаву наведені у табл. 3.

З отриманих результатів випливає, що анодне оброблення ніхрому в DES приводить до зниження густини струму корозії, тобто до підвищення корозійної стійкості. Збільшення потенціалу анодного оброблення сприяє зниженню густини струму корозії. Анодна модифікація поверхні в *reline* більшою мірою знижує швидкість корозії у порівнянні з модифікацією поверхні в *ethaline* (за обраних у роботі потенціалів оброблення).

Вплив анодного оброблення на електрокаталітичну активність сплаву

Відомо [14], сплав нікель-хром є потенційним електрокаталітичним матеріалом

Таблиця 3
Вплив анодного оброблення сплаву нікель-хром в DES на густину струму корозії в розчині 3% NaCl

Тип DES	Потенціал анодного оброблення, В	Густина струму корозії, А/см ²
— (без анодного оброблення)	—	$5,01 \cdot 10^{-6}$
ethaline	0,2	$1,69 \cdot 10^{-6}$
	1,0	$1,90 \cdot 10^{-6}$
reline	2,0	$9,12 \cdot 10^{-7}$
	2,7	$3,02 \cdot 10^{-6}$

для реакції виділення водню у лужному середовищі. З огляду на цю обставину була охарактеризована електрокаталітична поведінка зразків ніхром, анодно оброблених в DES. Для цього були отримані циклічні вольтамперні криві, що характеризують електрокаталітичну поведінку у розчині 1 М NaOH (рис. 5) та 1 М NaOH+0,33 М CO(NH₂)₂ (рис. 6). Додавання карбаміду до лужного розчину обумовлене потенційною можливістю зниження анодного потенціалу при електролізі за рахунок заміни реакції виділення кисню на альтернативну їй реакцію окислення карбаміду [15].

Дані, наведені на рис. 5, вказують на те, що анодне оброблення сплаву нікель-хром в DES (як в *ethaline*, так і *reline*) веде до зростання перенапруги виділення як водню, так і кисню, оскільки відповідні ділянки циклічних вольтамперних кривих зсуваються при цьому у бік більш негативних і більш позитивних потенціалів, відповідно. Таке зниження електрокаталітичної активності може бути пов'язане з тим, що при анодному обробленні в DES відбувається зменшення поверхневої концентрації каталітично активних центрів. Ще одним можливим поясненням спостереженого ефекту може бути утворення при розчиненні хромового компонента сплаву відповідних оксоаніонів, в яких хром у ступені окислення +6 є надзвичайно сильним окисником, і він має можливість частково окислювати електрохімічно активні центри на поверхні металу, виступаючи свого роду каталітичною отрутою. Однак, така гіпотеза, очевидно потребує більш детального опрацювання і підтвердження. Втім, на користь такого припущення свідчить той факт,

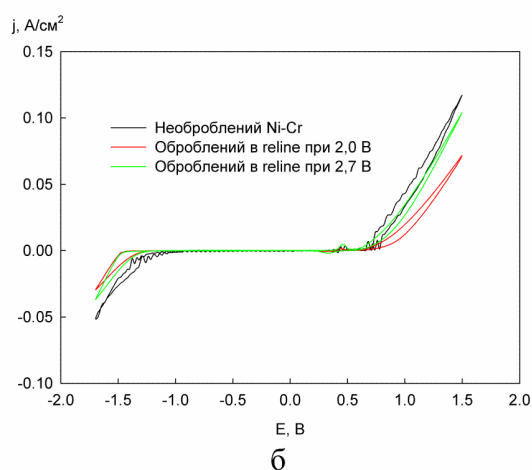
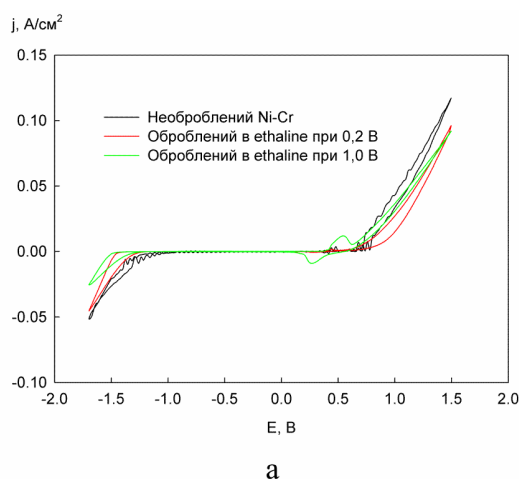


Рис. 5. Циклічні вольтамперні криві сплаву нікель-хром, що необроблений і анодно оброблений в *ethaline* (а) і *reline* (б), у водному розчині 1 М NaOH (швидкість сканування потенціалу 10 мВ/с, температура 25°C).

Потенціали оброблення вказані на рисунку

що після анодного оброблення в DES знижується не тільки електрокаталітична активність стосовно реакцій виділення водню і кисню, але і стосовно реакції окислення карбаміду, оскільки струми на відповідній ділянці вольтамперної кривої (в інтервалі потенціалів 0,5–1,0 В) сильно знижуються (рис. 6).

Таким чином, анодне оброблення сплаву нікель-хром в ethaline і reline, як типових представників DES, приводить до зниження електрокаталітичної активності поверхні у реакціях виділення водню, кисню, окислення карбаміду у лужному водному середовищі, а також до зниження швидкості корозійного розчинення сплаву у водному розчині хлориду натрію.

Висновки

Уперше виявлено вплив анодного потенціостатичного оброблення сплаву ніхром в низькотемпературних евтектичних розчинниках (ethaline і reline) на морфологію поверхні, її хімічний склад, мікрошорсткість, корозійну стійкість та електрокаталітичну активність.

Показано, що в результаті оброблення в DES за певних обраних електродних потенціалів поверхня згладжується і знижується мікрошорсткість, а поверхня візуально стає блискучою, тобто відбувається електрохімічне полірування сплаву.

Анодне оброблення сприяє селективному розчиненню хромового компонента сплаву. Висловлено припущення, що продукти розчинення хрому у формі Cr(VI) можуть частково

окислювати поверхню сплаву, виконуючи таким чином функцію своєрідної каталітичної отрути, що приводить до зростання корозійної стійкості сплаву (тобто зниження швидкості самодовільного розчинення в агресивному середовищі) та зниження електрокаталітичної активності в процесах виділення водню, кисню та анодного окислення карбаміду у водному лужному середовищі.

Подяка

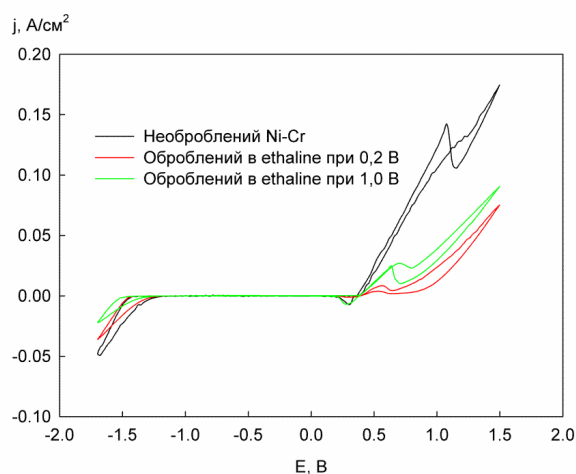
Автори щиро вдячні д.т.н. Корнію С.А. (Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України, м. Львів) за допомогу у проведенні SEM та EDX досліджень.

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

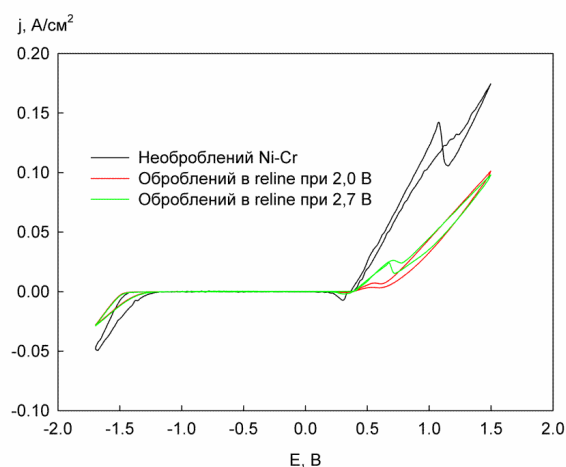
Автори висловлюють вдячність МОН України за фінансування даної роботи в рамках проекту «Фундаментальні аспекти електрохімічних процесів створення і функціонування електрокаталізаторів для «зеленої» водневої енергетики», номер держреєстрації 0124U000563).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.



а



б

Рис. 6. Циклічні вольтамперні криві сплаву нікель-хром, що необроблений 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). Потенціали оброблення вказані на рисунку

2. Han W., Fang F. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2019. – Vol.139. – P.1-23.
3. 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.
4. *Electropolishing* of Re-melted SLM stainless steel 316L parts using deep eutectic solvents: 3×3 full factorial design / Alrbaey K., Wimpenny D.I., Al-Barzinjy A.A., Moroz A. // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2016. – Vol.25. – P.2836-2846.
5. *Electropolishing* of nickel and cobalt in deep eutectic solvents / Karim W.O., Abbott A.P., Cihangir S., Ryder K.S. // *Trans. Inst. Met. Finish.* – 2018. – Vol.96. – P.200-205.
6. *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.
7. *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.
8. *Design* of Ti-6Al-4V alloy surface properties by galvanostatic electrochemical treatment in a deep eutectic solvent Ethaline / Kityk A., Protsenko V., Danilov F., Bobrova L., Hnatko M., Pavlik V., et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2022. – Vol.429. – Art. No. 127936.
9. *Anodic* treatment of Ni-Cu alloy in a deep eutectic solvent to improve electrocatalytic activity in the hydrogen evolution reaction / Protsenko V.S., Butyrina T.E., Makhota D.O., Korniy S.A., Danilov F.I. // *Port. Electrochim. Acta.* – 2023. – Vol.41. – P.29-45.
10. *Modification* of surface morphology and surface properties of copper-nickel alloy by anodic treatment in a deep eutectic solvent (ethaline) / Protsenko V., Butyrina T., Makhota D., Korniy S., Danilov F. // *Arch. Metall. Mater.* – 2023. – Vol.68. – No. 2. – P.477-482.
11. *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.
12. *Organ L., Kiss I.Z., Hudson J.L.* Bursting oscillations during metal electrodisolution: experiments and model // *J. Phys. Chem. B.* – 2003. – Vol.107. – P.6648-6659.
13. *A closer* look at the passivity and transpassive dissolution of chromium using atomic spectroelectrochemistry / Choudhary S., Zhang S., Thomas S., Birbilis N. // *ECS Adv.* – 2022. – Vol.1. – Art. No. 011501.
14. *Novel* Ni-Cr-based alloys as hydrogen fuel sources through alkaline water electrolytes / Nady H., El-Rabiei M.M., Samy M., Deyab M.A., Abd El-Hafez Gh M. // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2021. – Vol.46. – P.34749-34766.

15. *Recent* progress in non-noble metal-based electrocatalysts for urea-assisted electrochemical hydrogen production / Paygozar S., Aghdam A.S.R., Hassanizadeh E., Andaveh R., Darband G.B. // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2023. – Vol.48. – P.7219-7259.

Надійшла до редакції 03.03.2025

ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF NICKEL-CHROMIUM ALLOY 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

This study investigates the effect of anodic potentiostatic treatment of a nickel-chromium alloy in deep eutectic solvents ethaline and reline (eutectic mixtures of choline chloride with ethylene glycol and urea, respectively) on surface morphology, chemical composition, microroughness, corrosion resistance, and electrocatalytic activity. The electrochemical treatment was performed at two arbitrarily selected potentials corresponding to the anodic dissolution of the nickel-chromium alloy in the specified deep eutectic solvents: 0.2 V and 1.0 V for ethaline, and 2.0 V and 2.7 V for reline (versus a silver reference electrode), at a temperature of 25°C for 150 minutes. It was shown that anodic treatment promotes preferential dissolution of the chromium component of the alloy. As a result of the treatment, a reduction in surface defects and a decrease in the microroughness parameter R_a (from approximately 0.46 μm to 0.25–0.35 μm) were observed, indicating the occurrence of electrochemical polishing. It was found that anodic surface modification of nichrome in deep eutectic solvents leads to an increase in corrosion resistance and a decrease in electrocatalytic activity toward the hydrogen evolution reaction, the oxygen evolution reaction, and the urea oxidation reaction in an aqueous alkaline solution. Possible reasons for the observed effects are discussed.

Keywords: nickel-chromium alloy; electrochemical modification; electropolishing; corrosion resistance; electrocatalytic properties; deep eutectic solvents.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Alrbaey K, Wimpenny DI, Al-Barzinjy AA, Moroz A. Electropolishing of Re-melted SLM stainless steel 316L parts using deep eutectic solvents: 3×3 full factorial design. *J Mater Eng Perform.* 2016; 25: 2836-2846. doi: 10.1007/s11665-016-2140-2.

5. Karim WO, Abbott AP, Cihangir S, Ryder KS. Electropolishing of nickel and cobalt in deep eutectic solvents. *Trans Inst Met Finish*. 2018; 96: 200-205. doi: 10.1080/00202967.2018.1470400.
6. 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.
7. Kityk AA, Protsenko VS, Danilov FI, Kun OV, Korniy SA. Electropolishing of aluminium in a deep eutectic solvent. *Surf Coat Technol*. 2019; 375: 143-149. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.018.
8. Kityk A, Protsenko V, Danilov F, Bobrova L, Hnatko M, Pavlik V, et al. Design of Ti-6Al-4V alloy surface properties by galvanostatic electrochemical treatment in a deep eutectic solvent Ethaline. *Surf Coat Technol*. 2022; 429: 127936. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127936.
9. Protsenko VS, Butyrina TE, Makhota DO, Korniy SA, Danilov F.I. Anodic treatment of Ni-Cu alloy in a deep eutectic solvent to improve electrocatalytic activity in the hydrogen evolution reaction. *Port Electrochim Acta*. 2023; 41: 29-45. doi: 10.4152/pea.2023410103.
10. Protsenko V, Butyrina T, Makhota D, Korniy S, Danilov F. Modification of surface morphology and surface properties of copper-nickel alloy by anodic treatment in a deep eutectic solvent (ethaline). *Arch Metall Mater*. 2023; 68: 477-482. doi: 10.24425/amm.2023.142425.
11. 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.
12. Organ L, Kiss IZ, Hudson JL. Bursting oscillations during metal electrodisolution: experiments and model. *J Phys Chem B*. 2003; 107: 6648-6659. doi: 10.1021/jp034831d.
13. Choudhary S, Zhang S, Thomas S, Birbilis N. A closer look at the passivity and transpassive dissolution of chromium using atomic spectroelectrochemistry. *ECS Adv*. 2022; 1: 011501. doi: 10.1149/2754-2734/ac5576.
14. Nady H, El-Rabiei MM, Samy M, Deyab MA, Abd El-Hafez GM. Novel Ni-Cr-based alloys as hydrogen fuel sources through alkaline water electrolytes. *Int J Hydrogen Energy*. 2021; 46: 34749-34766. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.056.
15. 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.