

С. Г. Дерібо, к. техн. н., доцент, І. М. Рищенко, д. техн. н., професор,
В. Б. Байрачний, к. техн. н., професор, Г. Г. Тульський, д. техн. н., професор

ТЕРМОХІМІЧНА АКТИВАЦІЯ ПОВЕРХНІ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: вуглеграфіт, вуглець, активація поверхні вуглецю, газодифузійний електрод, анодний процес, електродна перенапруга, водень, вольтамперометрія.

Вступ. Вуглеграфітові матеріали мають широкий спектр унікальних властивостей і використовуються в хімічних технологіях в найбільш критичних і перспективних апаратах хімічної і енергетичної галузей. Вуглеграфітові матеріали одержують з широкого асортименту природних і синтетичних сполук вуглецю шляхом піролізу. Керування властивостями вуглецевих матеріалів здійснюється шляхом вибору вуглецевої сировини і умов її обробки [1–7]. Значний інтерес представляє поруватий графіт, який використовується для виготовлення композиційних газодифузійних електродів у паливних елементах та деполяризації катодного процесу отримання пероксиду водню. Такий анод має добре розвинену реакційну поверхню, що дозволить підвищити продуктивність процесу електролізу.

Перспективним є застосування газодифузійного вуглеграфітового електроду для деполяризації анодного процесу у сульфатно кислотному циклі одержання водню. Сульфатно кислотний цикл є на сьогоднішній день найбільш перспективним у вирішенні проблем атомно-водневої енергетики. Використання, в єдиному комплексі, великотоннажного електрохімічного виробництва та електричної енергії без «карбонового сліду» дозволить вирішити проблему «провальних» та «пікових» навантажень. Крім того, він дозволить вирішити проблему утилізації сульфуру (IV) оксиду, як відходу великої кількості виробництв. [8–11]. Невирішеною задачею є велика перенапруга електродного процесу, яку можна знизити активацією поверхні вуглецевих матеріалів.

Методика експерименту. При дослідженні процесів на скловуглеці робочим електродом служив електрод із СВ 12 з площею робочої поверхні 1 см². Циклічні вольтамперні характеристики одержували розгорткою від рівноважного потенціалу в анодну область до потенціалів виділення кисню, потім змінювали полярність і поляризували електрод в катодну область до потенціалів виділення водню. Швидкість розгортки від 5 мВ·с⁻¹.

Як основу газодифузійного електроду використовувався поруватий графіт марки ПГ–50. Для збільшення каталітичної активності, а також питомої поверхні електроду в порах графітових електродів, осаджували поверхні електроду і в порах активний вуглець (АВ). Для осадження АВ зразки графіту ПГ–50 просочували під вакуумом 1,3–2,6 кПа в розчині, що містить 800...1000 кг м⁻³ полісахаридів, до припинення газовиділення. З зовнішньої поверхні заготовки знімали надлишок розчину фільтрувальним папером. Потім просочені електроди сушили до видалення вологи і нагрівали в печі до 600...700 К. При цій температурі, висаджені в порах графіту полісахариди перетворюються на вугілля. Обвуглювання вели до припинення газовиділення. Експериментально встановлено, що дворазове просочення графіту розчином полісахаридів з наступним

обвуглюванням дозволяє отримати поруваті електроди із вмістом активного вуглецю в порах графіту 82...85 % від початкової ваги електрода [8–11].

За другим варіантом активування вуглецю здійснювалося просоченням електродів з неактивованим вуглецем концентрованою нітратною кислотою протягом 10 хвилин з подальшим прожарюванням в атмосфері азоту при температурі 1100...1150 К тривалістю 0,5 год. У цьому випадку процес активації зводиться до взаємодії між нітратною кислотою розкладання з поверхнею вуглецю та видалення неактивних плівок вуглеводнів з утворенням великої кількості макропор. Кислота та її продукти розпаду, що утворюються у великій кількості за високої температури, є дуже сильними активаторами. Оскільки розчин кислоти при просочуванні проникає протягом усього глибини електрода, активування вуглецю відбувається у всьому обсязі пор, отримано поруваті електроди із вмістом активного вуглецю в порах графіту 84...90 % від початкової ваги електрода [9, 12, 13].

Вольтамперні вимірювання проводили на зразках із поруватого графіту марки ПГ-50, з активованою поверхнею. Аноди мали форму циліндра діаметром 20 мм та товщиною 5 мм. Вони вставлялися в спеціальний струмопідвід, що складається з струмопідвідної трубки з тримачем зразків [8, 12]. Електродні потенціали замірялися щодо ртутно-сульфатного електрода порівняння та перераховувалися за нормальним водневим електродом.

Результати експерименту та їх обговорення. При високих анодних потенціалах генеруються активні частинки радикального типу, хемосорбовані на електроді. Ці первинні електрохімічно активні частинки визначають механізм, кінетику і природу кінцевих продуктів при окисленні водних розчинів сірчаної кислоти. Паралельне дослідження кінетики анодного процесу і хімічного балансу всіх продуктів, що утворюються в широкому інтервалі фізико-хімічних параметрів дозволив встановити зв'язок між будовою подвійного шару, характером анодно хемосорбованих первинних частинок і складом активованого покриття. Це дозволить запропонувати способи гальмування побічних та інтенсифікації цільових процесів при електролізі водних розчинів сірчаної кислоти.

Для встановлення ролі каталітично активних форм вуглецю в процесі окислення SO_2 отримані циклічні вольтамперні залежності на скловуглеці СВ 12 в 1 моль·дм⁻³ сульфатної кислоти без і з добавкою сульфуру (IV) оксиду в кількості 0,24 моль·дм⁻³ (рис. 1). СВ 12 обраний як вуглецевмісний матеріал з низьким ступенем розвиненості поверхні, реальна площа поверхні якого близька до геометрично вимірної.

У розчині сульфатної кислоти, без додавання сульфуру (IV) оксиду, на скловуглеці спостерігаються два анодні піки з максимумами близько 0,7 В і 1,6 В. Підйом струму при зміщенні потенціалу від рівноважного значення в анодну сторону починається приблизно при 0,3 В і обумовлений появою на поверхні СВ 12 адсорбованого кисню або кисневмісних сполук вуглецю. Циклування до потенціалу 1,9 В дає другий анодний пік (пов'язаний з виділенням кисню), а максимум відповідного катодного піку зрушується в негативну сторону. Зрушення катодних піків у негативну сторону свідчить про збільшення зв'язку кисню з вуглецем у сфері великих анодних потенціалів.

При додаванні сульфуру (IV) оксиду зростання анодного струму починається також при потенціалі 0,3 В. Зіставлення циклічних залежностей для електролітів без і з подачею SO_2 дає підставу припустити, що в області потенціалів 0,3...0,6 В в обох розчинах протікає один і той же процес "посадки" кисню. Різке зростання анодного струму збігається з потенціалом максимуму першого піку на СВ 12 в електроліті без SO_2 . Мак-

симальна анодна густина струму першого піку приблизно в 10 разів більша в електроліті з SO₂.

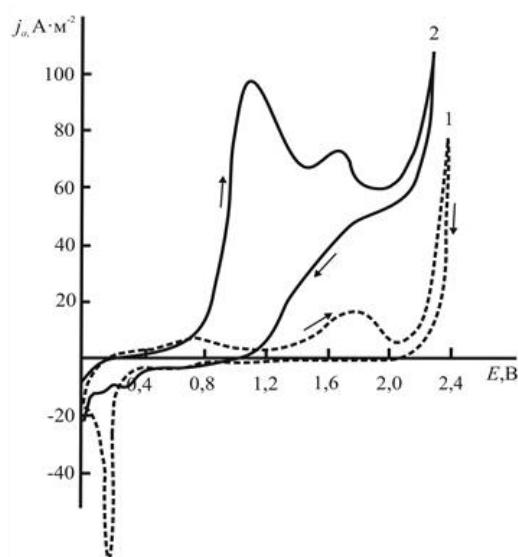
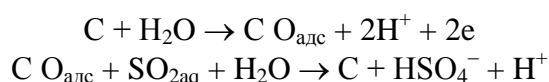


Рисунок 1 – Потенціодинамічні залежності ($V = 10 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$), одержані на скловуглеці СВ 12 в 1 моль·дм⁻³ H₂SO₄ без додавання (1) і з додаванням 0,12 моль·дм⁻³ SO₂ (2) при циклуванні в області потенціалів 0,0...2,4 В

Отримані експериментальні дані свідчать, що на поверхні скловуглецю протікає процес окислення сульфуру (IV) оксиду. Процес окислення відбувається при потенціалах утворення на поверхні графіту слабо зв'язаного кисню. Тому є підстави припустити, що окислення сульфуру (IV) оксиду на графіті протікає через слабо зв'язаний кисень на поверхні електроду:



Анодний процес з деполяризацією SO₂ на скловуглеці протікає зі швидкостями, порівнянними з густиною струму на платині, не покритій шарами оксидів і значно перевищує густину струму на окисдованій платині [12]. Тому перспективним є використання пористого графіту з каталітичними покриттями активними формами вуглецю для розробки газодифузійного електроду.

Зважаючи на густину струму на плоскому електроді з нерозвиненою поверхнею, можна спрогнозувати високі промислові густини струму на поруватому електроді з активним покриттям усієї розвиненої поверхні. Подальше дослідження процесу окислення SO₂ для з'ясування можливостей інтенсифікації електролізу, відбудеться за рахунок нанесення на поверхню поруватого графіту каталітичних добавок у вигляді активних форм вуглецю.

Методика, що заснована на багатостадійному просоченні вуглеграфітової основи у розчині полісахаридів з подальшим термічним розкладанням та активацією в розчині нітратної кислоти, дозволила регулювати кількість нанесеного АВ. Кількість АВ, нанесеного за одну активацію на зразок ПГ-50, становила 9...12 мг·см⁻². Вміст АВ підвищу-

вали шляхом збільшення кількості циклів просочення електродів розчином концентрованої нітратної кислоти з термічним розкладанням після кожного просочення.

Встановлено, що активність поверхні вуглеграфіту підвищується зі збільшенням вмісту АВ від 10 до 35 мг см⁻². Збільшення вмісту АВ вище 40 мг см⁻² призводить до погіршення характеристик електрода. При вмісті АВ порядку 33...39 мг см⁻² найбільша частина поверхні електрода стає доступною для вільного окислення SO₂. Подальше збільшення кількості АВ призводить до вигорання дрібних пір, що надають поруватому аноду розвинену поверхню. Вплив кількості АВ на анодний потенціал і густину струму представлені на рис. 2. Кількість SO₂ збільшувалася зі зростанням густини струму.

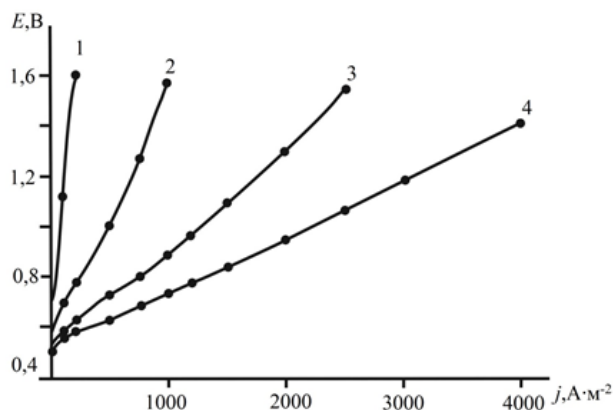


Рисунок 2 – Вплив питомої кількості АВ (мг·см⁻²) на потенціал аноду:
1 – 11, 2 – 26, 3 – 33, 4 – 39

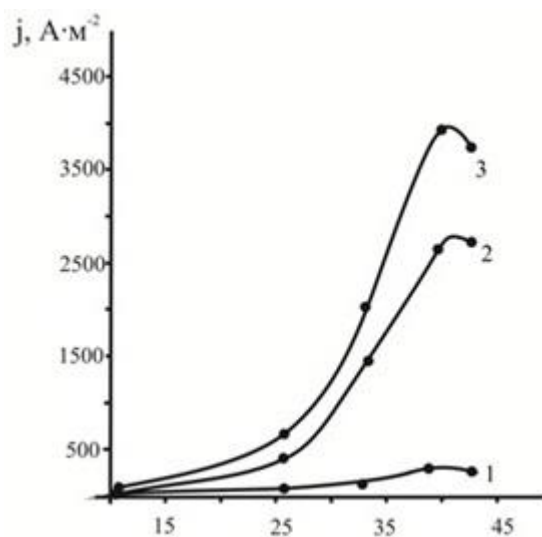


Рисунок 3 – Вплив питомої кількості АВ (мг·см⁻²) на густину струму в залежності від потенціалу аноду (В): 1 – 0,6; 2 – 1,0; 3 – 1,2

З отриманих залежностей видно, що активація графітової основи АВ дозволяє досягти анодної густини струму 3200...3300 А·м⁻². Що є достатнім для рекомендації активованих вуглеграфітових матеріалів для промислового застосування у сульфатно-кислотному циклі одержання водню.

Висновки. Встановлено, що анодний процес на вуглеці, при потенціалах до 0,7 В протікає безпосередньо за участю SO_2 , адсорбованого на поверхні анода, а в області більш високих потенціалів – за участю кисневмісних частинок, адсорбованих на поверхні вуглеграфітового анода. При вмісті АВ порядку 33...39 мг см^{-2} найбільша частина на поверхні електрода стає доступною для вільного окислення SO_2 . Подальше збільшення кількості АВ призводить до погіршення характеристик електрода. При активації графітової основи АВ анодна густина струму складає 3200...3300 $\text{А}\cdot\text{м}^{-2}$.

Література

1. Wenda Kang, Liming Yan, Jiahao Tang Electrochemical activation of graphite electrode for nitrate reduction: Energetic performance and application potential / *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 329, 2023, P. 122–155.
2. Electrocatalytic Hydrogen- Evolution at the Pyrolytic Graphite Electrode in the Presence of Hydrogenase Pierre Bianco and Jean Haladjian *The Electrochemical Society Journal of The Electrochemical Society*, Volume 139, Number 9. P. 227–242.
3. Wu Z. Platinum nanoparticle-modified carbon fiber ultramicroelectrodes for mediator-free biosensing / Z. Wu, L. Chen, G. Shen, R. Yu // *Sensors and Actuators B*. 2006. – V.119, –№ 1. – P. 295–301.
4. Lu L. Glassy carbon electrode modified with gold nanoparticles and DNA for the simultaneous determination of uric acid and norepinephrine undercoexistence of ascorbic acid / L. Lu, X. Lin *Anal. Science*. 2004. – V.20, –№ 3. – P. 527–530.
5. Rivas G.A. Graphite paste electrode modified with gold nanoparticles. *Analytical applications* / G.A. Rivas, S.A. Miscoria, G.D. Barrera // *Int. Soc. Electrochem*. 2004. – № 4. – P. 442–452.
6. Saldan I., Girella A., Milanese C., Fratini E., Dobrovetska O., Levchuk I., Kuntty O. Size and distribution of palladium nanoparticles electrodeposited on graphite. *Functional materials*. 2018, –vol. 25, –№ 1, – P. 82–87.
7. Бервицкая О.С., Полищук Ю.В. Композиционные покрытия никель углеродный материал. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry: Monograph*. Kyiv: KNUTD. 2016, –№ 2, – P. 122–126.
8. Рутковська К.С., Тульський Г.Г., Сінкевич І.В., Артеменко В.М. Застосування газодифузійного катоду в електрохімічному синтезі гіпохлориту натрію. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. Харків: НТУ «ХП». 2018. № 39 (1271). С. 23–26.
9. Рутковська К.С., Тульська А.Г., Сінкевич І.В., Бровін О.Ю. Методологія активації пористих графітових електродів. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. Харків: НТУ «ХП». 2019. –№ 1. –С. 49–54.
10. Перспективні матеріали та процеси в прикладній електрохімії - 2018: монографія / В.З. Барсуков, Ю.В. Борисенко, В.Г. Хоменко, О.В. Лінючева; за заг. ред. В. З. Барсукова. – Київ: КНУТД, 2018. – 290 с.
11. Байрачний Б.І. Удосконалення електрохімічного методу одержання водню // Б.І. Байрачний, А.Г. Тульська, Д.С. Сидоренко // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2013. – № 4. – С. 124–127.
12. Тульська А.Г. Деполяризація анодного процесу SO_2 в електрохімічному синтезі водню [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.03 / Альона Геннадіївна Тульська ; [наук. керівник Байрачний Б. І.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2015. – 22 с. – Бібліогр.: с. 17–20. – укр.

13. Пат. 100329 Україна, МПК H01M 4/96 (2006.01), H01M 4/86 (2006.01). Склад газодифузійного анода [Текст] / В. Б. Байрачний, Б. І. Байрачний, А. Г. Тульська, І. В. Сінкевич ; патентовласник Нац. техн. ун-т "ХПІ". – № у 2014 14174 ; заяв. 30.12.2014 ; публ. 27.07.2015, Бюл. № 14. – 4 с.

Bibliography (transliterated)

1. Wenda Kang, Liming Yan, Jiahao Tang Electrochemical activation of graphite electrode for nitrate reduction: Energetic performance and application potential / Applied Catalysis B: Environmental, Volume 329, 2023, P. 122–155.

2. Electrocatalytic Hydrogen- Evolution at the Pyrolytic Graphite Electrode in the Presence of Hydrogenase Pierre Bianco and Jean Haladjian The Electrochemical Society Journal of The Electrochemical Society, Volume 139, Number 9. P. 227–242.

3. Wu Z. Platinum nanoparticle-modified carbon fiber ultramicroelectrodes for mediator-free biosensing / Z. Wu, L. Chen, G. Shen, R. Yu // Sensors and Actuators B. 2006. – V.119, –№ 1. – P. 295–301.

4. Lu L. Glassy carbon electrode modified with gold nanoparticles and DNA for the simultaneous determination of uric acid and norepinephrine undercoexistence of ascorbic acid / L. Lu, X. Lin 11 Anal. Science. 2004. – V.20, –№ 3. – P. 527–530.

5. Rivas G.A. Graphite paste electrode modified with gold nanoparticles. Analytical applications / G.A. Rivas, S.A. Miscoria, G.D. Barrera // Int. Soc. Electrochem. 2004. – № 4. – P. 442–452.

6. Saldan I., Girella A., Milanese C., Fratini E., Dobrovetska O., Levchuk I., Kuntiyi O. Size and distribution of palladium nanoparticles electrodeposited on graphite. Functional materials. 2018, –vol. 25, –№ 1, – P. 82–87.

8. Rutkovska K.S., Tulskeyi H.H., Sinkevych I.V., Artemenko V.M. Zastosuvannia hazodyfuziinoho katodu v elektrokhimichnomu syntezi hipokhlorytu natriiu. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia. Kharkiv: NTU «KhPI». 2018. № 39 (1271). P. 23–26.

9. Rutkovska K.S., Tulska A.H., Sinkevych I.V., Brovin O.Yu. Metodolohiia aktyvatsii porystykh hrafitovykh elektrodov. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia. Kharkiv: NTU «KhPI». 2019. –№ 1. – P. 49–54.

10. Perspektyvni materialy ta protsesy v prykladnii elektrokhimii – 2018: monohrafiia / V.Z. Barsukov, Yu.V. Borysenko, V.H. Khomenko, O.V. Liniucheva; za zah. red. V.Z. Barsukova. – Kyiv: KNUTD, 2018. – 290 p.

11. Bairachnyi B.I. Udoskonalennia elektrokhimichnoho metodu oderzhannia vodniu // B.I. Bairachnyi, A.H. Tulska, D.S. Sydorenko // Voprosi khymyy y khymycheskoi tekhnolohyy. – 2013. – № 4. – P. 124–127.

12. Tulska A.H. Depoliaryzatsiia anodnoho protsesa SO₂ v elektrokhimichnomu syntezi vodniu [Elektronnyi resurs] : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.17.03 / Alona Hennadiivna Tulska ; [nauk. kerivnyk Bairachnyi B. I.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv, 2015. – 22 p. – Bibliohr.: P. 17–20. – ukr.

13. Pat. 100329 Ukraina, MPK H01M 4/96 (2006.01), H01M 4/86 (2006.01). Sklad hazodyfuziinoho anoda [Tekst] / V. B. Bairachnyi, B. I. Bairachnyi, A. H. Tulska, I. V. Sinkevych ; patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t "KhPI". – № у 2014 14174 ; zaiav. 30.12.2014 ; publ. 27.07.2015, Biul. № 14. – 4 p.

УДК 621.35

С. Г. Дерібо, к. техн. н., доцент, І. М. Рищенко, д. техн. н., професор,
В. Б. Байрачний, к. техн. н., професор, Г. Г. Тульський, д. техн. н., професор

ТЕРМОХІМІЧНА АКТИВАЦІЯ ПОВЕРХНІ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Перспективним є застосування газодифузійного вуглеграфітового електроду для деполяризації анодного процесу у сульфатно кислотному циклі одержання водню. Сульфатно кислотний цикл є на сьогоднішній день найбільш перспективним у вирішенні проблем атомно-водневої енергетики. Використання, в єдиному комплексі, великотоннажного електрохімічного виробництва та електричної енергії без «карбонового сліду» дозволить вирішити проблему «провальних» та «пікових» навантажень.

Використання анодів на основі поруватого графіту дозволяє проводити процес газодифузійному режимі. Невирішеною задачею є велика перенапряга електродного процесу, яку можна знизити активацією поверхні вуглецевих матеріалів.

Як основу газодифузійного електроду використовувався поруватий графіт марки ПГ–50. Для збільшення каталітичної активності, а також питомої поверхні електрода в порах графітових електродів, осаджували поверхні електрода і в порах активний вуглець (АВ). Експериментально встановлено, що дворазове просочення графіту розчином полісахаридів з наступним обвуглюванням дозволяє отримати поруваті електроди із вмістом активного вуглецю в порах графіту 82...85 % від початкової ваги електрода.

Для встановлення ролі каталітично активних форм вуглецю в процесі окислення SO_2 отримані циклічні вольтамперні залежності на скловуглеці СВ 12 в 1 моль·дм⁻³ сульфатної кислоти без і з добавкою сульфуру (IV) оксиду в кількості 0,24 моль·дм⁻³. СВ 12 обраний як вуглецевмісний матеріал з низьким ступенем розвиненості поверхні, реальна площа поверхні якого близька до геометрично вимірної. Отримані експериментальні дані свідчать, що на поверхні скловуглецю протікає процес окислення сульфуру (IV) оксиду. Процес окислення відбувається при потенціалах утворення на поверхні графіту слабо зв'язаного кисню. Тому є підстави припустити, що окислення сульфуру (IV) оксиду на графіті протікає через слабо зв'язаний кисень на поверхні електроду.

Активація поверхні вуглецевого електроду для інтенсифікації окислення SO_2 відбулось за рахунок нанесення на поверхню поруватого графіту каталітичних добавок у вигляді активних форм вуглецю. При багатостадійному просоченні вуглеграфітової основи у розчині полісахаридів з подальшим термічним розкладанням та активацією в розчині нітратної кислоти відбувалось регулювання кількості нанесеного АВ. Кількість АВ, нанесеного за одну активацію на зразок ПГ–50, становила 9...12 мг·см⁻². Вміст АВ підвищували шляхом збільшення кількості циклів просочення електродів розчином концентрованої нітратної кислоти з термічним розкладанням після кожного просочення.

При вмісті АВ порядку 33...39 мг см⁻² найбільша частина поверхні електрода стає доступною для вільного окислення SO_2 . Подальше збільшення кількості АВ призводить до погіршення характеристик електроду. При активації графітової основи АВ анодна густина струму складає 3200...3300 А·м⁻². Що є достатнім для рекомендації активованих вуглеграфітових матеріалів для промислового застосування у сульфатно кислотному циклі одержання водню.

Ключові слова: вуглеграфіт, вуглець, активація поверхні вуглецю, газодифузійний електрод, анодний процес, електродна перенапряга, водень, вольтамперометрія.

S. G. Deribo, PhD, associate professor, I. M. Ryshchenko, ScD, professor,
V. B. Bairachnyi, PhD, professor, H. H. Tulsnyi, ScD, professor

THERMOCHEMICAL ACTIVATION OF THE SURFACE OF CARBON MATERIALS

The use of a gas-diffusion carbon-graphite electrode for depolarizing the anode process in the sulfuric acid cycle of hydrogen production is promising. The sulfuric acid cycle is currently the most promising solution for addressing issues in atomic-hydrogen energy. The integration of large-scale electrochemical production and carbon-free electricity generation into a single system can solve the problem of "valley" and "peak" loads.

The use of porous graphite-based anodes enables the process to be conducted in a gas-diffusion mode. A significant challenge is the high overpotential of the electrode process, which can be reduced by activating the surface of carbon materials.

Porous graphite of the PG-50 grade was used as the base for the gas-diffusion electrode. To enhance catalytic activity and increase the specific surface area of the electrode, active carbon (AC) was deposited on the surface and in the pores of the graphite electrodes. Experimental results show that two impregnations of graphite with a polysaccharide solution followed by carbonization produce porous electrodes with an active carbon content of 82...85 % of the initial electrode weight.

To establish the role of catalytically active carbon forms in the oxidation of SO₂, cyclic voltammograms were obtained on glassy carbon (GC 12) in 1 mol·dm⁻³ sulfuric acid, both with and without the addition of sulfur(IV) oxide (0.24 mol·dm⁻³). GC 12 was chosen as a carbonaceous material with a low degree of surface development, whose actual surface area is close to its geometrically measured area. The experimental data indicate that sulfur(IV) oxide oxidation occurs on the glassy carbon surface. This oxidation process occurs at potentials where weakly bound oxygen forms on the graphite surface. Therefore, it can be assumed that the oxidation of sulfur(IV) oxide on graphite proceeds through weakly bound oxygen on the electrode surface.

The activation of the carbon electrode surface to intensify SO₂ oxidation was achieved by depositing catalytic additives in the form of active carbon onto the porous graphite surface. Multistage impregnation of the carbon-graphite base with a polysaccharide solution, followed by thermal decomposition and activation in nitric acid solution, regulated the amount of deposited AC. The amount of AC deposited per activation on a PG-50 sample was 9...12 mg·cm⁻². The AC content was increased by increasing the number of impregnation cycles with concentrated nitric acid, followed by thermal decomposition after each cycle.

At an AC content of 33...39 mg·cm⁻², the majority of the electrode surface becomes available for free SO₂ oxidation. Further increases in AC content lead to deteriorating electrode performance. With AC activation of the graphite base, the anodic current density reaches 3200...3300 A·m⁻², which is sufficient to recommend activated carbon-graphite materials for industrial application in the sulfuric acid cycle of hydrogen production.

Keywords: carbon-graphite, carbon, carbon surface activation, gas-diffusion electrode, anodic process, electrode overpotential, hydrogen, voltammetry.