

УДК 54.544.651/653

doi:10.20998/2413-4295.2023.01.10

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КАТОДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ РЕГЕНЕРАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ СУЛЬФО-КИСЛОТНИХ РОЗЧИНІВ ТРАВЛЕННЯ СТАЛІ

К. М. КРАВЧЕНКО*, Г. Г. ТУЛЬСЬКИЙ

кафедра Технічної електрохімії НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проаналізовано сучасний стан регенерації сульфатних розчинів, встановлено, що існуючі фізико-хімічні методи не вирішують проблеми регенерації сульфатної кислоти, а тільки нейтралізують її, для переведення за нормами ГДК на нейтралізацію та у систему стоків з подальшим захороненням. Підтверджено, що регенерацію доцільно проводити електрохімічним методом із застосуванням трьохкамерного електролізера, коли розчин подається у середню камеру, концентрація регенованої сульфатної кислоти зростає до 180-200 г/л, з одночасним осадженням заліза, з виходом за струмом 65-70 %. Такий метод знижує відходи та дозволяє перейти на замкнений цикл по сульфатній кислоті. З'ясовано, що в процесі травлення концентрація сульфатної кислоти зменшується від 2,0 до 0,5 моль·дм⁻³, а концентрація заліза (II) сульфату відповідно зростає. За умов зниження концентрації сульфатної кислоти знижується і її хімічна активність при взаємодії із оксидами та гідроксидами заліза. Для збільшення реакційної активності травильних розчинів застосовується збільшення температури всього процесу. Була встановлена кінетична закономірність суміщених катодних процесів у модельних розчинах заліза (II) сульфату з сульфатною кислотою. У якості матеріалу катоду використовували платину, мідь та вуглецеву сталь. Вибір матеріалу катоду ґрунтувався на різних електрохімічних властивостях цих обраних металів по відношенню до водневої реакції. Основним процесом на платиновому катоді є виділення водню в широкому діапазоні густин струму. При густинах струму більше 0,1 А/см² спостерігалось різке зростання потенціалу через вбудову Fe²⁺ до складу межі розділу катод-електроліт, але потенціали відновлення Fe²⁺ не були досягненні. При заміні матеріалу катоду з платини на вуглецеву сталь спостерігалось значне гальмування виділення водню, що дозволило досягти потенціалів сумісного відновлення водню та заліза, однак максимальний струм прямолінійної ділянки перебігу електрохімічного процесу з електрохімічним контролем скоротився від 10 при 20 °С, до 3 разів при 80 °С. Застосування мідного катоду дозволило виявити вплив водневої реакції на перебіг відновлення Fe²⁺. Виділення водню на мідному катоді перебігало зі значним гальмуванням розряду іонів водню. При застосування залізного катоду електрохімічна десорбція є лімітуючою стадією, що призводить до існування шарів адсорбованого водню міцно зчепленими із поверхню залізного катоду. Порівняльний аналіз вольт-амперних залежностей для граничних досліджуваних температур вказує на значний вплив підвищення температури від 20 °С до 80 °С приблизно на 120-150 мВ. Катодний процес при 20 °С перебігає у режимі збільшеної кінетики для обох суміщених процесів. При 80 °С на вольт-амперних залежностях з'являються прямолінійні ділянки електрохімічного контролю катодного процесу, при концентраціях Fe²⁺ 1,0 та 1,5 моль/дм³. Ці ділянки простягаються від 20 до 60 мА/см². Концентрація іонів заліза та температура електролізу має суттєвий вплив на процес електрохімічного відновлення Fe²⁺, що було підтверджено експериментально. Так як цільовим процесом при електрохімічній регенерації відпрацьованих травильних розчинів є регенерація саме сульфатної кислоти, а не видалення з цього розчину Fe²⁺ то катодний режим роботи електродного блоку був визначений за технологічними показниками перебігу анодного процесу.

Ключові слова: сульфатна кислота; кінетика; платина; мідь; вуглецева сталь; залізо

TECHNOLOGICAL INDICATORS OF THE CATHODIC PROCESS IN THE REGENERATION OF USED SULFO-ACID SOLUTIONS FOR ETCHING STEEL

K. KRAVCHENKO*, G. TULSKY

Department of Technical Electrochemistry, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The current state of regeneration of sulfate solutions was analyzed, it was established that the existing physico-chemical methods do not solve the problem of regeneration of sulfuric acid, but only neutralize it, for transfer according to the standards of the MPC to neutralization and into the sewage system with subsequent disposal. It has been confirmed that it is advisable to carry out the regeneration by an electrochemical method using a three-chamber electrolyzer, when the solution is fed into the middle chamber, the concentration of regenerated sulfuric acid increases to 180-200 g/l, with simultaneous iron deposition, with a current yield of 65-70%. This method reduces waste and allows switching to a closed cycle on sulfuric acid. It was found that in the process of digestion, the concentration of sulfuric acid decreases from 2.0 to 0.5 mol·dm⁻³, and the concentration of iron (II) sulfate increases accordingly. Under the conditions of a decrease in the concentration of sulfuric acid, its chemical activity also decreases when interacting with iron oxides and hydroxides. To increase the reactivity of pickling solutions, an increase in the

temperature of the entire process is used. The kinetic regularity of combined cathodic processes in model solutions of iron (II) sulfate with sulfuric acid was established. Platinum, copper and carbon steel were used as cathode material. The choice of the cathode material was based on the different electrochemical properties of these selected metals with respect to the hydrogen reaction. The main process at the platinum cathode is hydrogen release in a wide range of current densities. At current densities greater than 0.1 A/cm^2 , a sharp increase in potential was observed due to the incorporation of Fe^{2+} into the composition of the cathode-electrolyte interface, but Fe^{2+} reduction potentials were not reached. When replacing the cathode material from platinum to carbon steel, a significant inhibition of hydrogen release was observed, which made it possible to reach the potentials for the simultaneous reduction of hydrogen and iron, however, the maximum current of the rectilinear section of the electrochemical process with electrochemical control was reduced from 10 at 20°C to 3 times at 80°C . The use of a copper cathode made it possible to reveal the influence of the hydrogen reaction on the course of Fe^{2+} reduction. The release of hydrogen at the copper cathode was accompanied by a significant inhibition of the hydrogen ion discharge. When using an iron cathode, electrochemical desorption is the limiting stage, which leads to the existence of layers of adsorbed hydrogen firmly attached to the surface of the iron cathode. A comparative analysis of the voltage-current dependences for the final investigated temperatures indicates a significant effect of an increase in temperature from 20°C to 80°C by approximately 120-150 mV. The cathodic process at 20°C takes place in the mode of increased kinetics for both combined processes. At 80°C , rectilinear sections of electrochemical control of the cathodic process appear on the voltage-current dependences, at Fe^{2+} concentrations of 1.0 and 1.5 mol/dm^3 . These areas range from 20 to 60 mA/cm^2 . The concentration of iron ions and the temperature of electrolysis have a significant effect on the process of electrochemical reduction of Fe^{2+} , which was confirmed experimentally. Since the target process in the electrochemical regeneration of spent pickling solutions is the regeneration of sulfuric acid itself, and not the removal of Fe^{2+} from this solution, the cathodic mode of operation of the electrode unit was determined according to the technological indicators of the anodic process.

Keywords: sulfate acid; kinetics; platinum; copper; carbon steel; iron

Вступ

Значна кількість технологічних процесів на гальванічних та металургійних підприємствах перебігає із застосуванням розчинів сульфатної кислоти. Регенерація таких розчинів не тільки є актуальною, із точки зору збереження сульфатної кислоти, а й екологічних послідовностей також.

По мірі зниження концентрації H_2SO_4 та насичення розчину Fe_2SO_4 швидкість травлення оксидної плівки на поверхні сталі знижується. Тому при зниженні концентрації H_2SO_4 до 25-30 г/л процес травлення припиняють та проводять заміну травильного розчину. При цьому концентрація Fe_2SO_4 досягає 400 г/л [1].

Регенерацію відпрацьованих сульфатних розчинів доцільно проводити електрохімічним методом [2]. Існуючі фізико-хімічні методи не вирішують проблеми регенерації сульфатної кислоти, а тільки нейтралізують її, для переведення за нормами ГДК на нейтралізацію та у систему стоків з подальшим захороненням.

Використання методу електрохімічної регенерації сульфатнокислотних розчинів не тільки є ефективним, а й екологічним. Під час електрохімічної регенерації, коли розчин подається у середню камеру, при застосуванні трьохкамерного електролізера, концентрація регенованої сульфатної кислоти зростає до 180-200 г/л, з одночасним осадженням заліза, з виходом за струмом 65-70 %. Такий метод знижує відходи та дозволяє перейти на замкнений цикл по сульфатній кислоті [3,4].

Використання платини, у якості конструкційного матеріалу катода полягає у його стійкості до агресивних середовищ, таких як водні розчини сульфатної кислоти [5].

Для реалізації можливості катодного відновлення Fe^{2+} з відпрацьованих розчинів необхідно обрати катодний матеріал з високою напругою виділення водню.

Результати досліджень визначають теоретичні основи та технологічні показники впливу концентрації та температури розчинів заліза (II) сульфату на вольт-амперні залежності на платиновому катоді, як універсального матеріалу катода. На основі кінетики процесу, поведінка та механізми реакції на платині дозволяють вибрати матеріали катодів з високою напругою виділення водню. Порівняння катодних матеріалів дає змогу відкоригувати устаткування та технологію регенерації відпрацьованих сульфо-кислотних розчинів травлення сталі.

Мета роботи

Дослідження кінетики суміщених катодних процесів проводилися у розчинах $0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$; $1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ та $1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ відповідно до температурного діапазону $20 \dots 80^\circ\text{C}$ та матеріалу катода.

Одержані результати будуть використані для коригування технологічних показників та устаткування, роботи катода, з високою напругою виділення водню, в процесі електрохімічної регенерації відпрацьованих розчинів сульфо-кислотної обробки сталі.

Виклад основного матеріалу

Встановлення технологічних показників катодного процесу через дослідження кінетики, при електрохімічній регенерації відпрацьованих сульфо-

кислотних розчинів травлення сталі вирішує проблему із утилізацією таких розчинів, що мають включенням сульфатів заліза. Попередній досвід вказує на економічну доцільність електрохімічних методів регенерації відпрацьованих технологічних розчинів [3].

Робочі розчини готували розчиненням хімікатів кваліфікації «х.ч.» у дистильованій воді. Дослідження кінетики суміщених катодних процесів у модельних водних розчинах заліза (II) сульфату з сульфатною кислотою проводили різної концентрації при діапазонах температури 20 ... 80 °С, методом лінійної вольт-амперометрії з використанням потенціостату МТех PGP-500 S. Електрод порівняння – хлорсрібний. Допоміжний електрод – платина.

Модельні водні розчини мають наступний склад (моль·дм⁻³): 0,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄; 1,0 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,0 моль·дм⁻³ H₂SO₄ та 1,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 0,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ відповідно та температурний діапазон 20 ... 80 °С, матеріал катоду - платина, мідь та ст.20.

Обговорення результатів

Процес електрохімічної регенерації відпрацьованих розчинів травлення сталі характеризується суттєвою зміною складу травильного розчину та температурою проведення процесу [1].

В процесі травлення концентрація сульфатної кислоти зменшується від 2,0 до 0,5 моль·дм⁻³, а концентрація заліза (II) сульфату відповідно зростає. Тому перебіг катодного процесу досліджували для наступних складів розчину: 0,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄; 1,0 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,0 моль·дм⁻³ H₂SO₄ та 1,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 0,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ відповідно до температурного діапазону 20 ... 80 °С.

За умов зниження концентрації сульфатної кислоти знижується і її хімічна активність при взаємодії із оксидами та гідроксидами заліза. Для збільшення реакційної активності травильних розчинів застосовується збільшення температури всього процесу. Так як метою проведення дослідження є коригування технологічних показників процесу електрохімічної регенерації відпрацьованих розчинів і застосування електродного блоку, що буде розташований безпосередньо у ванні травлення, то досліджувався вплив зміни концентрації сульфатної кислоти, заліза (II) сульфату та температури на природу електродних процесів та кінетику їх перебігу.

На рис. 1 наведено вольт-амперні залежності в полулогарифмічних координатах для розчину 0,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ в залежності від температури на платиновому катоді.

Основним процесом на платиновому катоді є виділення водню в широкому діапазоні густин струму.

При густинах струму більше 0,1 А/см² спостерігається різке зростання потенціалу через вбудову Fe²⁺ до складу межі розділу катод-електроліт, але потенціали відновлення Fe²⁺ не були досягненні. При збільшенні температури спостерігається зниження катодного потенціалу з деяким збільшенням коефіцієнту *b* для прямолінійної ділянки виділення водню з електрохімічним контролем. Збільшення температури призводить до збільшення густини струму цієї прямолінійної ділянки вольт-амперної залежності.

На рис. 2 наведено вольт-амперні залежності в полулогарифмічних координатах для розчину 1,0 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,0 моль·дм⁻³ H₂SO₄ від температури на платиновому катоді.

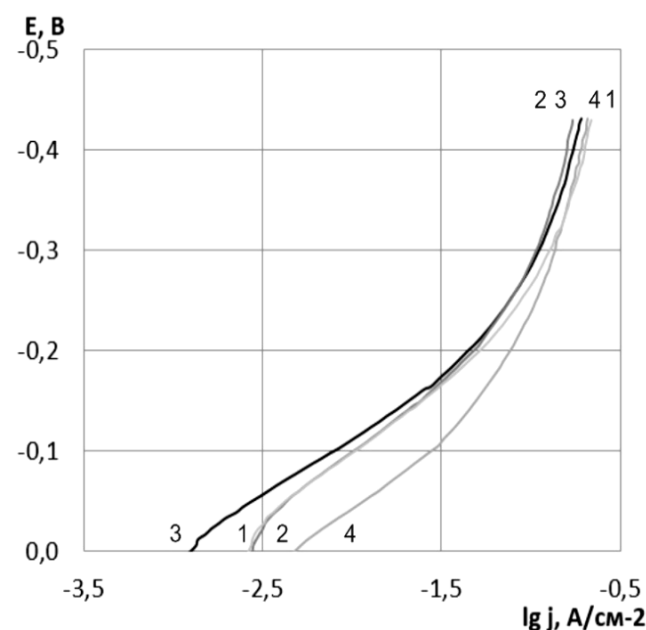


Рис. 1 – Поляризаційні криві, одержані на катодах із платини у розчині 0,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ в інтервалі температур: 1 - 20 °С; 2 - 40 °С; 3 - 60 °С; 4 - 80 °С

Збільшення концентрації FeSO₄ та зменшення концентрації сульфатної кислоти суттєво не впливають на загальний хід вольт-амперних залежностей, але призводять до зниження значення катодного потенціалу.

На рис. 3 наведено вольт-амперні залежності в полулогарифмічних координатах для розчину 1,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 0,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ від температури на платиновому катоді.

Спостерігається збільшення катодного потенціалу, що обумовлено зростанням концентрації Fe²⁺ на межі катод-електроліт, що призводить до значного ускладнення відновлення протонів. Вплив складу досліджуваного розчину та температур на коефіцієнт *b* наведено в табл. 1.

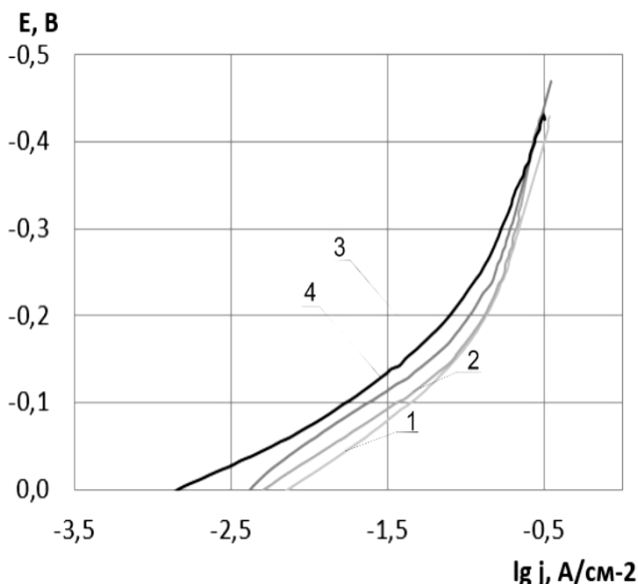


Рис. 2 – Поляризаційні криві, одержані на катодах із платини у розчині $1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ в інтервалі температур: 1 - 20°C ; 2 - 40°C ; 3 - 60°C ; 4 - 80°C

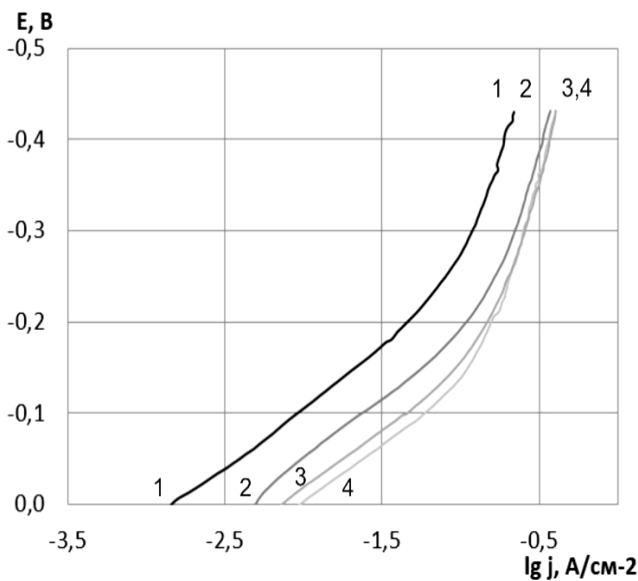


Рис. 3 – Поляризаційні криві, одержані на катодах із платини у розчині $1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ в інтервалі температур: 1 - 20°C ; 2 - 40°C ; 3 - 60°C ; 4 - 80°C

При заміні матеріалу катода з платини на вуглецеву сталь спостерігається значне гальмування виділення водню, що дозволяє досягти потенціалів сумісного відновлення водню та заліза, однак максимальний струм прямолінійної ділянки перебігу електрохімічного процесу з електрохімічним контролем скоротився від 10 при 20°C , до 3 разів при 80°C .

Таблиця 1 – Рівноважні потенціали кисневого електрода

Концентрація H_2SO_4 , моль·дм ⁻³	pH, [6]	$a_{\text{H}_2\text{O}}$, [7]	$E_{\text{O}_2}^{\text{P}}$, В
0,5	-0,15	0,1557	1,237
1,0	-0,30	0,1316	1,246
1,5	-0,48	0,1300	1,256
2,0	-0,60	0,1276	1,263

Збільшення концентрації FeSO_4 від 0,5 до 1,5 моль/дм³ менше впливає на зниження катодного потенціалу сумісного виділення водню та осадження Fe на сталевому катоді, ніж виділення водню на платиновому катоді.

Для реалізації можливості катодного відновлення Fe^{2+} з досліджуваних розчинів необхідно обрати катодний матеріал з високою напругою виділення водню. В якості порівняння катодних матеріалів використовували мідь та ст.20.

Порівняльний вплив зміни концентрації електроліту для 20°C та 80°C наведено на рис. 4.

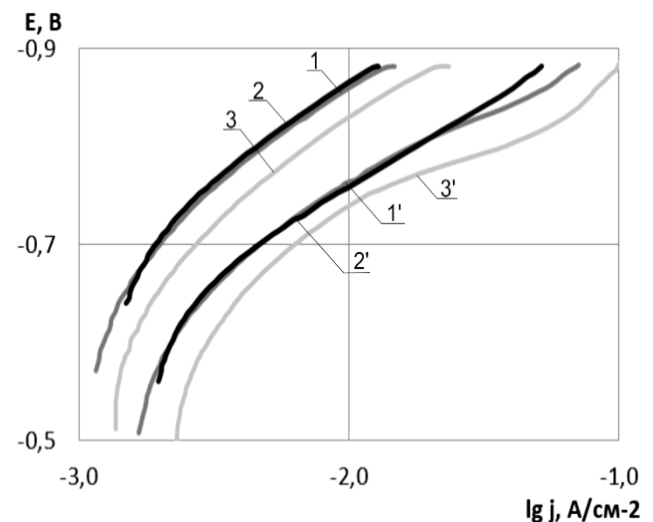
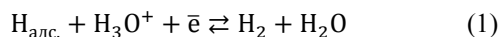


Рис. 4 – Вплив зміни концентрації розчину в залежності від температур на катоді ст.20: 1 - $0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ при 20°C ; 2 - $1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ при 20°C ; 3 - $1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ при 20°C ; 1' - $0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ при 80°C ; 2' - $1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ при 80°C ; 3' - $1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ при 80°C

Застосування мідного катода дозволило виявити вплив водневої реакції на перебіг відновлення Fe^{2+} . Відомо [8-10], що виділення водню

на мідному катоді перебігає зі значним гальмуванням розряду іонів водню. Видалення адсорбованих атомів водню відбувається через швидку стадію електрохімічної десорбції за реакцією (1) Гейеровського [11]:



У зв'язку з цим поверхня мідного катоду не вкрита шаром адсорбованого атомарного водню, що не створює конкурентну адсорбцію між адсорбованими атомами водню та заліза на поверхні катоду. При застосування залізного катоду електрохімічна десорбція є лімітуючою стадією, що призводить до існування шарів адсорбованого водню міцно зчепленими із поверхньою залізного катоду.

Порівняльний аналіз вольт-амперних залежностей для граничних досліджуваних температур вказує на значний вплив підвищення температури від 20 °С до 80 °С приблизно на 120-150 мВ. Катодний процес при 20 °С перебігає у режимі збільшеної кінетики для обох суміщених процесів. При 80 °С на вольт-амперних залежностях з'являється прямолінійні ділянки електрохімічного контролю катодного процесу при концентраціях Fe²⁺ 1,0 та 1,5 моль/дм³. Ці ділянки простягаються від 20 до 60 мА/см².

Наведені результати вказують на концентраційне гальмування при відновленні Fe²⁺ для досліджуваних умов. Концентрація іонів заліза та температура електролізу має суттєвий вплив на процес електрохімічного відновлення Fe²⁺. Зважаючи на те що робота електронного блоку може здійснюватися у режимах як осадження металевого заліза так і переносу іонів заліза із анодної камери діафрагмового електролізера в катодну, де за рахунок підлучення прикатодного простору іони заліза будуть зв'язані у нерозчинний осад оксидів чи гідроксидів. Так як цільовим процесом при електрохімічній регенерації відпрацьованих травильних розчинів є регенерація саме сульфатної кислоти, а не видалення з цього розчину Fe²⁺ то катодний режим

роботи електродного блоку буде визначатися технологічними показниками перебігу анодного процесу.

Для уточнення показників відновлення Fe²⁺ були одержані вольт-амперні залежності на мідному катоді на рис. 5.

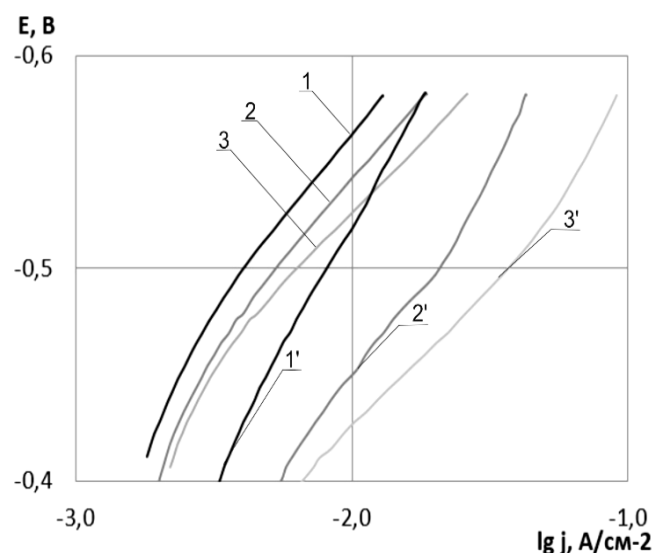


Рис. 5 – Поляризаційні криві, одержані на мідному катоді в залежності від зміни концентрації та температури: 1 - 0,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ при 20 °С; 2 - 1,0 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,0 моль·дм⁻³ H₂SO₄ при 20 °С; 3 - 1,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 0,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ при 20 °С; 1' - 0,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ при 80 °С; 2' - 1,0 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 1,0 моль·дм⁻³ H₂SO₄ при 80 °С; 3' - 1,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 0,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ при 80 °С

Застосування мідного катоду значно загальмовує суміщений процес виділення водню та потребує більш детального дослідження процесу відновлення заліза. Одержані результати підтверджують висновок, зроблений за аналізом рис. 4 про діапазон робочих густин струму, що відповідає електрохімічному відновленню Fe²⁺ до Fe.

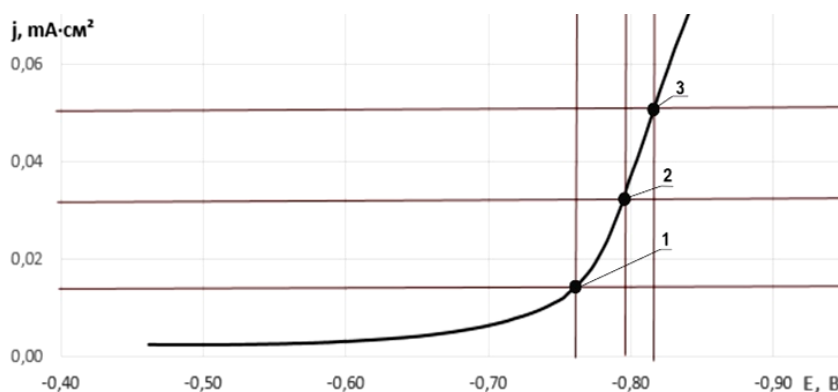


Рис. 6 – Поляризаційна крива, одержана на сталевому катоді у розчині 1,5 моль·дм⁻³ FeSO₄ + 0,5 моль·дм⁻³ H₂SO₄ при 80 °С, в інтервалах 120-480 мА/см²

Висновки

За результатами дослідження кінетики суміщених катодних процесів у водних розчинах заліза (II) сульфату та сульфатної кислоти у розчинах визначеної концентрації: $0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$; $1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 1,0 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ та $1,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ FeSO}_4 + 0,5 \text{ моль} \cdot \text{дм}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$ та температурного діапазону $20 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$, були визначені діапазони потенціалів і густини струму та обраний матеріал катоду, які відповідають електрохімічному виділенню заліза, суміщеному з виділенням водню.

Встановлено, що збільшення концентрації FeSO_4 та зменшення концентрації сульфатної кислоти суттєво не впливають на загальний хід вольт-амперних залежностей, але призводять до зниження значення катодного потенціалу.

При заміні матеріалу катоду з платини на вуглецеву сталь спостерігається значне гальмування виділення водню, що дозволяє досягти потенціалів сумісного відновлення водню та заліза.

Застосування мідного катоду дозволило виявити вплив водневої реакції на перебіг відновлення Fe^{2+} . Виділення водню на мідному катоді перебігає зі значним гальмуванням розряду іонів водню. Видалення адсорбованих атомів водню відбувається через швидку стадію електрохімічної десорбції за реакцією Гейерівського.

При застосування залізного катоду електрохімічна десорбція є лімітуючою стадією, що призводить до існування шарів адсорбованого водню міцно зчепленими із поверхню залізного катоду, що дозволяє зробити висновок про доцільність використання залізного катоду у досвідно промисловій установці, формує робочі технологічні показники та подальший регламент роботи установки.

Список літератури

1. Травление штампованных деталей и трубных заготовок. Технологическая инструкция. № 0450.25071.00014. АО «ХТЗ». Харьков. 2014. 9 с.
2. Смірнова О. Л., Лещенко С. А. *Ресурсозберігаючі електрохімічні виробництва: навчальний посібник*. Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2019. 120 с.
3. Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Вплив матеріалу аноду на перебіг суміщених процесів при регенерації сульфатно-кислотних розчинів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2022. 2 № 8 (2022). С. 45-50. doi: 10.20998/2079-0821.2022.02.06.

4. Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Механізм поведінки іонів Fe^{2+} та Fe^{3+} при регенуванні розчинів сульфатно-кислотної обробки сталі. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей 30-ї міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2022*, 19-21 жовтня 2022 р. – Харків: НТУ "ХПІ", 2022. С. 435.
5. Гапон Ю. К., Чиркіна М. А. Електродні матеріали для електрохімічного очищення промислових стічних вод. Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій. *Матеріали міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 100-річчю ХНУМГ ім. О. М. Бекетова*, 7 червня 2022 р. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова [та ін.]. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 105.
6. *Chemie. Allgemeine und anorganische Chemie. Aufbauwissen*. Red. Dr. Hans-Peter Waschi. 2004. Hamburg. 189 p.
7. Лінючева О. В., Фроленкова С. В., Мірошніченко Ю. С. *Теоретична електрохімія*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 49 с.
8. Shi G., Liao Y., Su B., Zhang Y., Wang W., Xi J. Kinetics of copper extraction from copper smelting slag by pressure oxidative leaching with sulfuric acid. *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 241. P. 116699. doi: 10.1016/j.seppur.2020.116699.
9. Poubaix M. *Atlas D'Équilibres Electrochimiques*. Paris. Gauthier – Villars & Cie. Éditeur-Imprimeur-Libraire, 1963. 646 p.
10. Kosohin O., Makohoniuk O., Kushmyruk A. Electrochemical Oxidation of Thiocyanate on Metal Oxide Electrodes. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 6, Part 2. P. 219-226. doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.097.
11. Gurreri L., Tamburini A., Micale G. *Electromembrane Processes: Experiments and Modelling*. Basel, Switzerland: MDPI, 2021. 226 p.

References (transliterated)

1. Etching of stamped details and pipe blanks. Technological instruction. No. 0450.25071.00014. JSC "HTZ". Kharkov. 2014. 9 p.
2. Smirnova O. L., Leshchenko S. A. *Resource-saving electrochemical production: a textbook*. Kharkiv. Publishing Ivanchenko I. S., 2019. 120 p.
3. Kravchenko K. M., Tulsy G. G. The influence of the anode material on the course of combined processes during the regeneration of sulfate-acid solutions. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and ecology*, 2022, vol. 2, No. 8 (2022), pp. 45-50, doi: 10.20998/2079-0821.2022.02.06.
4. Kravchenko K. M., Tulsy G. G. Mechanism of behavior of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions during the regeneration of solutions of sulfate-acid treatment of steel. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: theses add. 30th International science and practice conf. MicroCAD–2022*, October 19-21, 2022. – Kharkiv. NTU "KhPI", 2022. P. 435.

5. Gapon Y. K., Chirkina M. A. Electrode materials for electrochemical treatment of industrial wastewater. Current issues of chemistry and integrated technologies. *Materials of the international science and practice conf. dedicated to the 100th anniversary of XNUMG named after O. M. Beketova*, June 7, 2022. Kharkiv national city university farm named after O. M. Beketova [etc.]. Kharkiv. XNUMG named after O. M. Beketova, 2022. P. 105.
6. *Chemie. Allgemeine und anorganische Chemie. Aufbauwissen*. Red. Dr. Hans-Peter Waschi. 2004. Hamburg. 189 p.
7. Linyucheva O. V., Frolenkova S. V., Miroshnychenko Y. S. *Theoretical electrochemistry*. Kyiv. KPI named after Igor Sikorskyi, 2018. 49 p.
8. Shi G., Liao Y., Su B., Zhang Y., Wang W., Xi J. Kinetics of copper extraction from copper smelting slag by pressure oxidative leaching with sulfuric acid. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 241, pp. 116699, doi: 10.1016/j.seppur.2020.116699.
9. Poubaix M. *Atlas D'Équilibres Electrochimiques*. Paris. Gauthier – Villars & Cie. Éditeur-Imprimeur-Libraire, 1963. 646 p.
10. Kosohin O., Makohoniuk O., Kushmyruk A. Electrochemical Oxidation of Thiocyanate on Metal Oxide Electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 6, part 2, pp. 219-226, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.097.
11. Gurreri L., Tamburini A., Micale G. *Electromembrane Processes: Experiments and Modelling*. Basel, Switzerland. MDPI, 2021. 226 p.

Відомості про авторів (About authors)

Кравченко Кристина Миколаївна – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра Технічної електрохімії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9412-1393; e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com.

Kravchenko Kristina – graduate student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Technical Electrochemistry; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9412-1393; e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com.

Тульський Геннадій Георгійович – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра Технічної електрохімії; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0003-2662-8333; e-mail: tgg@kpi.kharkov.ua

Tulsky Gennady – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Technical Electrochemistry; Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-2662-8333; e-mail: tgg@kpi.kharkov.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Технологічні показники катодного процесу при регенерації відпрацьованих сульфо-кислотних розчинів травлення сталі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 1 (15). С. 76-82. doi:10.20998/2413-4295.2023.01.10.

Please cite this article as:

Kravchenko K., Tulsky G. Technological indicators of the cathodic process in the regeneration of used sulfo-acid solutions for etching steel. *Bulletin of the National Technical University KhPI. Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, № 1 (15), pp. 76-82, doi:10.20998/2413-4295.2023.01.10.

*Надійшла (received) 01.02.2023
Прийнята (accepted) 03.03.2023*