

КУЧЕР ВАДИМ

Український державний університет науки і технологій,

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»

<https://orcid.org/0009-0009-5865-7375>e-mail: kuchervadym2023@gmail.com**СКНАР ЮРІЙ**

Український державний університет науки і технологій,

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»

<https://orcid.org/0000-0002-1188-3684>e-mail: yuriy.skнар@gmail.com**СКНАР ІРИНА**

Український державний університет науки і технологій,

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»

<http://orcid.org/0000-0001-8433-1285>e-mail: irinasknar202@gmail.com**БУТИРІНА ТЕТЯНА**

Український державний університет науки і технологій,

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»

<https://orcid.org/0000-0002-0619-6783>e-mail: butyrinatanya74@gmail.com**ЕЛЕКТРОЕКСТРАКЦІЯ ОЛОВА ІЗ МЕТАНСУЛЬФОНАТНИХ РОЗЧИНІВ**

Важливою прикладною задачею є селективне вилучення олова, міді та інших цінних компонентів із сплавів, що отримують при переробці відпрацьованої електронної та комп'ютерної техніки. Кількість таких відходів стрімко зростає у зв'язку з надзвичайно прискореними темпами розвитку інформаційних технологій і матеріалознавства, що призводять до формування потреби у постійному оновленні електронних пристроїв. Рециклінгове використання кольорових металів є економічно, екологічно та соціально доцільним і вже понад 30% олова отримується з електротехнічного брухту. Енергоощадним способом розділення металів з означених відходів є гідрометалургійна їх обробка. Багатокомпонентні сплави розчиняються в кислих або лужних розчинах вилуговування і в подальшому піддаються селективному покомпонентному розділенню. До найбільш селективного і керованого способу виділення чистого олова відноситься електроекстракція. Отримання компактних осадів олова високої чистоти можливе при його катодному виділенні з кислих розчинів за присутності органічних поверхнево-активних речовин. Традиційними кислими середовищами при вилуговуванні олова зі сплавів електротехнічного лому є хлоридні, сульфатні та нітратні розчини. З огляду на високу розчинність солей багатьох металів та низький парціальний тиск парів значні перспективи у використанні в якості вилуговувача проглядаються у метансульфоновій кислоті. Тому важливою задачею є встановлення закономірностей виділення олова з метансульфонатних розчинів шляхом електроекстракції. В даній роботі досліджено кінетику електроосадження олова за присутності оксиетильованих β -нафтолів, які відрізняються будовою гідрофільної групи. Встановлено, що досліджені поверхнево-активні речовини інгібують виділення олова. Максимальний ефект зниження граничного адсорбційного струму проявляється при концентрації досліджуваних добавок близько 1 ммоль/л. Найменше піноутворення і найвища температура помутніння, яка становить 85 °C, відповідає розчину неіоногенного оксиетильованого β -нафтолу. Це є важливим для швидкісного процесу електроекстракції, який проводиться за підвищених температур. Показано, що використання неіоногенного оксиетильованого β -нафтолу у метансульфонатному розчині електроекстракції дозволяє отримувати компактні дрібнокристалічні осадки олова у широкому діапазоні густин струму.

Ключові слова: олово, електроекстракція, поверхнево-активні речовини, метансульфонатний розчин

SKNAR YURI, KUCHER VADYM,**SKNAR IRYNA, BUTYRINA TETIANA**

Ukrainian State University of Science and Technology,

Research Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology

ELECTROEXTRACTION OF TIN FROM METHANESULFONATE SOLUTIONS

An important applied problem is the selective extraction of tin, copper and other valuable components from alloys obtained during the processing of used electronic and computer equipment. The amount of such waste is rapidly increasing due to the extremely accelerated pace of development of information technologies and materials science, which lead to the formation of a need for constant updating of electronic devices. Recycling of non-ferrous metals is economically, environmentally and socially expedient and already more than 30% of tin is obtained from electrical scrap. An energy-saving method of separating metals from the specified waste is their hydrometallurgical processing. Multicomponent alloys are dissolved in acidic or alkaline leaching solutions and are subsequently subjected to selective component-by-component separation. The most selective and controllable method of isolating pure tin is electroextraction. Obtaining compact precipitates of high purity tin is possible during its cathodic separation from acidic solutions in the presence of organic surfactants. Traditional acidic media for tin leaching from electrical scrap alloys are chloride, sulfate and nitrate solutions. Given the high solubility of salts of many metals and low partial vapor pressure, methanesulfonic acid has significant prospects for use as a leachant. Therefore, an important task is to establish the regularities of tin separation from methanesulfonate solutions by electroextraction. In this work, the kinetics of tin electrodeposition in the presence of oxyethylated β -naphthols, which differ in the structure of the hydrophilic group, was studied. It was found that the studied surfactants inhibit tin separation. The maximum effect of reducing the limiting adsorption current is manifested at a concentration of the studied additives of about 1 mmol/l. The least foaming and the highest cloud point, which is 85 °C, correspond to a solution of nonionic oxyethylated β -naphthol. This is important for the high-speed electroextraction process, which is carried

out at elevated temperatures. It has been shown that the use of non-ionic oxyethylated β -naphthol in the methanesulfonate electroextraction solution allows obtaining compact fine-crystalline tin precipitates in a wide range of current densities.

Keywords: tin, electroextraction, surfactants, methanesulfonate solution

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Криза металевих ресурсів і нагальна потреба у рециклінговому використанні металів обумовили швидкий розвиток технологій переробки електротехнічного брухту. Енергетично ощадним методом переробки таких відходів є гідрометалургія [1]. Вилуговування є першим етапом хімічного перевodu металів у розчинну форму. Селективне виділення окремих металів високої чистоти із розчинів вилуговування можливе шляхом електроекстракції. Важливим науковим та практичним завданням є розробка технології електроекстракції з отриманням компактного олова.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У зв'язку зі швидким розвитком економіки та електронної промисловості відбувається стрімка заміна застарілого електричного та електронного обладнання. Таким чином, у всьому світі утворюється велика кількість електротехнічних відходів і, відповідно, актуалізується проблема їх переробки [2,3]. Гідрометалургійна переробка оловомісних відходів проводиться в лужних або кислих розчинах вилуговування [4]. Селективне виділення олова з розчинів вилуговування можливе шляхом електрохімічної екстракції [5]. Виділення олова зі станатного електроліту проводять за підвищених температур та невисоких густинах струму [6]. Разом з низьким значенням електрохімічного еквіваленту ці обставини обумовлюють економічну недоцільність використання лужного середовища для електроекстракції олова. Більш поширеним є виділення олова з кислих розчинів. Слід зазначити, що електроосадження олова із кислих розчинів відбувається з незначним перенапруженням і компактні осад катодного олова можливо отримати лише за присутності в розчині поверхнево-активних органічних речовин. В якості таких речовин використовують β -нафтол, желатину, поліетиленгліколь [7,8]. Автори [9] дослідили вплив тіосечовини на механізм електроосадження і особливості електрокристалізації олова із сульфатнокислого розчину. Сучасним розчином, що характеризується високою розчинністю солей різних металів, в тому числі і олова, є метансульфонатний розчин, який запропоновано використовувати для електрохімічного виділення олова з їх простих солей [10]. Електроосадження олова з метансульфонатного розчину у компактному вигляді потребує використання поверхнево-активних речовин. В якості таких добавок використовують поліетиленгліколи [11]. Проте їх низька адсорбційна здатність не дозволяє отримувати якісні осад олова без додавання інших поверхнево-активних речовин, таких як фенолфталеїн тощо.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

Процес електроосадження олова при переробці електротехнічного брухту проводиться із традиційних кислих розчинів на основі сульфатної, хлоридної чи нітратної кислоти. Проте, вельми перспективними для гідрометалургії виглядають розчини на основі метансульфонової кислоти [11]. Отже, невирішеними є питання щодо закономірностей електроекстракції олова із метансульфонатних розчинів за присутності органічних поверхнево-активних речовин.

Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи було вивчити вплив оксиетильованих β -нафтолів з різною будовою гідрофільної групи на кінетику виділення олова із метансульфонатних розчинів і на морфологію отримуваних осадів.

Виклад основного матеріалу

Розчини для електроосадження олов'яних покривів містили сульфат або метансульфонат стануму(II) – 0,4 моль/дм³, сульфатну або метансульфову кислоту – 1,0 моль/дм³. Всі реактиви марки ч.д.а.

У якості поверхнево-активних речовин (ПАР) використовували оксиетильовані β -нафтоли C₄₅H₇₈O₁₅ (ОН1) та C₃₆H₆₀O₁₄ (ОН2), які відрізняються будовою гідрофільної групи, а також сульфований оксиетильований β -нафтол C₅₀H₈₇O₁₈SO₃K (ОНС).

Концентрацію іонів стануму(II) у приготованих розчинах визначали йодометрично наступним чином. Пробу електроліту об'ємом 2 см³ вносили у конічну колбу на 100 см³, додавали 20 см³ дистильованої води і 1 см³ 1%-вого розчину крохмалю. Потім титрували розчином I₂ відомої концентрації до появи фіалкового забарвлення. Концентрацію іонів стануму(II) (моль/дм³) визначали за формулою:

$$C_{Sn^{2+}} = \frac{C_{I_2} \cdot V_{I_2}}{2V_{np}}, \quad (1)$$

де C_{I_2} – концентрація розчину I₂, визначена титриметрично, моль/дм³, V_{I_2} – об'єм розчину I₂, який пішов на титрування, см³, V_{np} – об'єм проби електроліту, взятий на титрування, см³.

Вольтамперні залежності отримували за допомогою потенціостату MTech SPG-500fast. Робочим електродом слугувала мідна пластина S = 0,01 дм² з попередньо нанесеним на неї олов'яним покривом. У якості допоміжного електроду слугував олов'яний анод, а електродом порівняння – насичений хлорид-срібний електрод. Швидкість розгортки складала 20 мВ/с.

Для визначення піноутворюючих властивостей добавок у мірний циліндр об'ємом 250 см³ вносили 100 см³ досліджуваного розчину (0,2 ммоль/дм³ ПАР) та проводили барботажа протягом 10 с, після чого визначали висоту піни і час її стійкості, який дорівнював періоду її повної деградації.

Поверхневий натяг розчинів визначали за методом Ребіндера. У досліджувану рідину опускали капіляр з радіусом просвіту r , глибина занурення капіляру була близькою до нуля, щоб елімінувати гідростатичний тиск. Верхній кінець капіляру з'єднували з манометром і резервуаром повітря з підвищеним тиском. Відкривши кран резервуару, поступово збільшували в капілярі тиск. Внаслідок цього на кінці капіляру з'являлась бульбашка повітря. По мірі збільшення тиску ця бульбашка зростала, змінюючи свою форму і радіус кривизни. Спочатку бульбашка мала великий радіус кривизни, вона плоска. Потім поступово радіус кривизни зменшувався, краплина робилась все більш випуклою. Наприкінці радіус кривизни досягав мінімального розміру, в цей момент він дорівнював радіусу просвіту капіляру, а бульбашка повітря мала форму напівсфери. Тиск всередині бульбашки і капіляру при цьому досягав максимального значення ($p=2\cdot\sigma/r$). Весь час до цього моменту і в цей момент тиск повітря на стінку бульбашки урівноважувався тиском зі сторони стінки бульбашки. При подальшому збільшенні тиску радіус кривизни збільшувався, тиск зі сторони стінки бульбашки падав, він не міг врівноважити тиск повітря всередині бульбашки, бульбашка ставала нестійкою, тому швидко розширювалась і відривалась від капіляру. На манометрі цей процес реєструвався наступним чином. Тиск поступово зростав, досягав максимуму, потім різко падав і знову повільно зростав, останнє відповідало утворенню і збільшенню в об'ємі нової бульбашки. Встановивши у декількох дослідах максимальний тиск p , обчислювали $\sigma=p\cdot r/2$. Для такого розрахунку треба знати r . Величину r визначали, вимірюючи p води, σ якої точно встановлена. Поверхневий натяг розчинів визначали за формулою:

$$\sigma = \frac{\sigma_{H_2O} \cdot p}{p_{H_2O}}, \quad (2)$$

де σ_{H_2O} – поверхневий натяг води при заданій температурі, Дж/м², p_{H_2O} – максимальний тиск всередині бульбашки, зануреної у воду, мм.вод.ст., p – максимальний тиск всередині бульбашки, зануреної у досліджуваний розчин, мм.вод.ст.

Температуру помутніння фіксували у момент з'явлення муті під час повільного нагрівання 1%-вого водного розчину добавки.

На рис. 1 представлені вольтамперограми розряду іонів стануму(II) з метансульфонатного електроліту в присутності досліджуваних добавок.

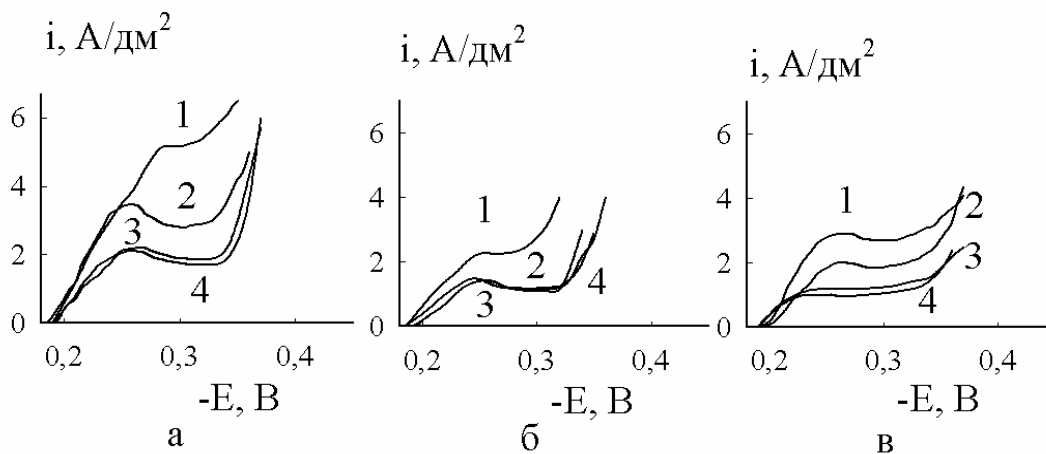


Рис. 1 Вольтамперограми розряду іонів стануму(II) з метансульфонатного електроліту в присутності ПАР ОНС (а), ОН1 (б), ОН2 (в), (ммоль/дм³): 0,1 (1), 0,5 (2), 1,0 (3), 2,0 (4)

Як видно з рисунку, введення у розчин оксигетильованих β -нафтолів призводить до інгібування виділення олова. Підвищення концентрації ПАР призводить до розширення діапазону потенціалів, в якому спостерігається граничний адсорбційний струм. Величина струму при цьому зменшується. Наведені залежності проявляються при концентраціях ПАР менших за 1 ммоль/л. Подальше підвищення концентрації досліджуваних добавок практично не впливає на хід вольтамперограм. В метансульфонатному електроліті для всіх досліджуваних ПАР діапазон потенціалів, що відповідає граничному адсорбційному струму, приблизно однаковий.

Для сульфатного електроліту (рис. 2) характерні аналогічні залежності величини граничного адсорбційного струму від концентрації ПАР.

У той же час, величина рівноважного потенціалу олов'яного електроду в одномолярних сульфатному та метансульфонатному електролітах відрізняються на 15 мВ, а діапазон потенціалів граничного адсорбційного струму в сульфатному електроліті значно ширше, ніж в метансульфонатному електроліті. Крім того, в сульфатному електроліті спостерігається значна відмінність діапазонів потенціалів, що відповідають граничному адсорбційному струмові для неіоногенних (ОН1 та ОН2) та аніоноактивного ПАР (ОНС).

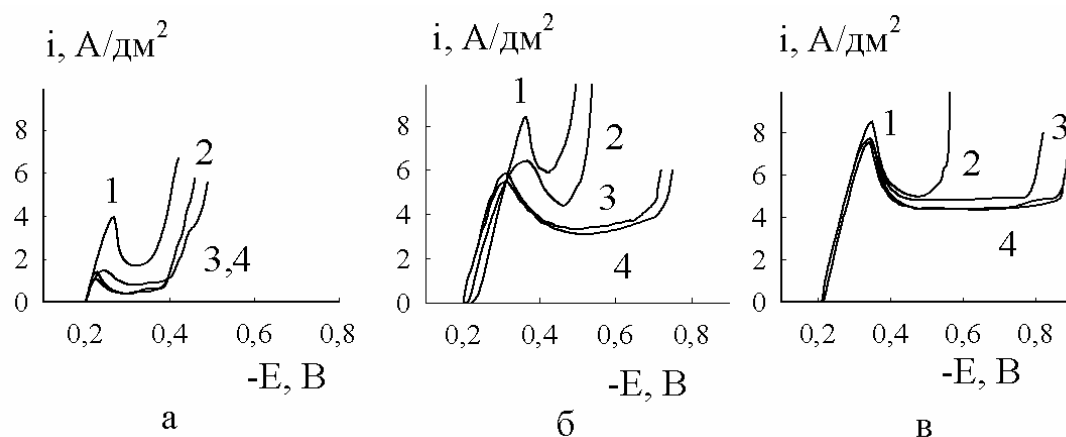


Рис. 2 Вольтамперограми розряду іонів стануму(II) з сульфатного електроліту в присутності ПАР: ОНС (а), ОН1 (б), ОН2 (в), (ммоль/дм³): 0,1 (1), 0,5 (2), 1,0 (3), 2,0 (4)

Вплив поверхнево-активних речовин на кінетику електровідновлення олова обумовлений, насамперед, їх здатністю до адсорбції, яка залежить від будови цих сполук.

Залежності поверхневого натягу водних розчинів органічних добавок від їх концентрації представлені на рис. 3.

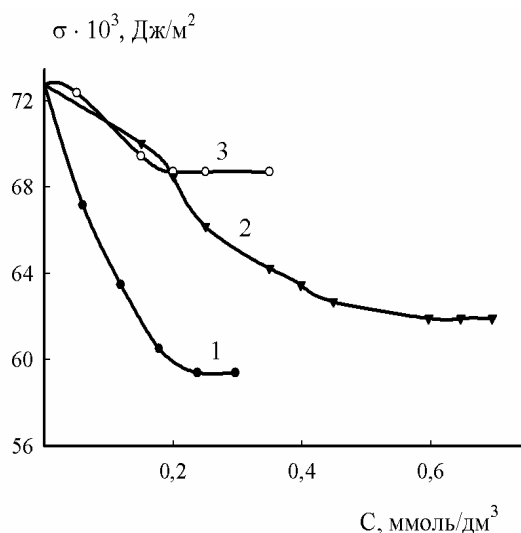


Рис. 3 Залежність поверхневого натягу водних розчинів ПАР від концентрації: ОН1 (1), ОНС (2), ОН2 (3)

Як видно з рисунку, зниження поверхневого натягу водних розчинів у присутності ПАР проявляється в значній мірі у ряду ОН2 < ОНС < ОН1. На підставі отриманих даних були розраховані критичні концентрації міцелотворення досліджуваних ПАР. Крім того, були визначені деякі фізико-хімічні властивості похідних β-нафтолу. Отримані результати представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості похідних β-нафтолу

Речовина	Температура помутніння, °С	Висота піни, см	Час стійкості піни, хв	ККМ, ммоль/л
ОН1	66	24,0	3,00	0,235
ОНС	80	23,0	1,72	0,423
ОН2	85	22,6	1,27	0,268

Слід зазначити, що в обох електролітах величина граничного адсорбційного струму сягає постійного значення при концентраціях ПАР у декілька разів вищих за значення ККМ. Вірогідно, в умовах швидкого оновлення поверхні металу і інкорпорації ПАР в олов'яні покриття поверхнева концентрація органічних сполук менша за об'ємну. Вирівнювання цих концентрацій відбувається унаслідок руйнування міцел у приелектродному шарі, частинна концентрація яких, а, відповідно, й загальна поверхня, повинна бути значною.

Висота піни і час її стійкості за однакових мольних концентрацій органічних речовин підвищується у послідовності ОН2 < ОНС < ОН1, у той час як температура помутніння змінюється антибатно (див. табл. 1). Все це вказує на збільшення поверхневої активності органічних добавок у ряду ОН2 < ОНС < ОН1 на межі розділу фаз розчин/повітря. Наведені фізико-хімічні властивості є найбільш

значущими при виборі поверхнево-активних речовин для електролітів швидкісного нанесення олов'яних покриттів при електрохімічному виділенні олова при електроекстракції чи електрорафінуванні. Ці процеси ведуться в умовах високих температур (50–60°C) та інтенсивного руху електроліту, тому поверхнево-активні речовини повинні мати мінімальну здатність до піноутворення і максимальну температуру помутніння. Для швидкісних процесів електролізу найбільш цікавою є добавка OH2.

Стійкість метансульфонатних комплексів вище, ніж сульфатних, тому концентрація вільних іонів олова в метансульфонатному електроліті більша. Цей факт дозволяє розширити діапазон робочих густин струму, в якому формуються компактні олов'яні покритви.

Для з'ясування правомірності зробленого припущення були проведені тести у комірці Хулла (рис. 4).

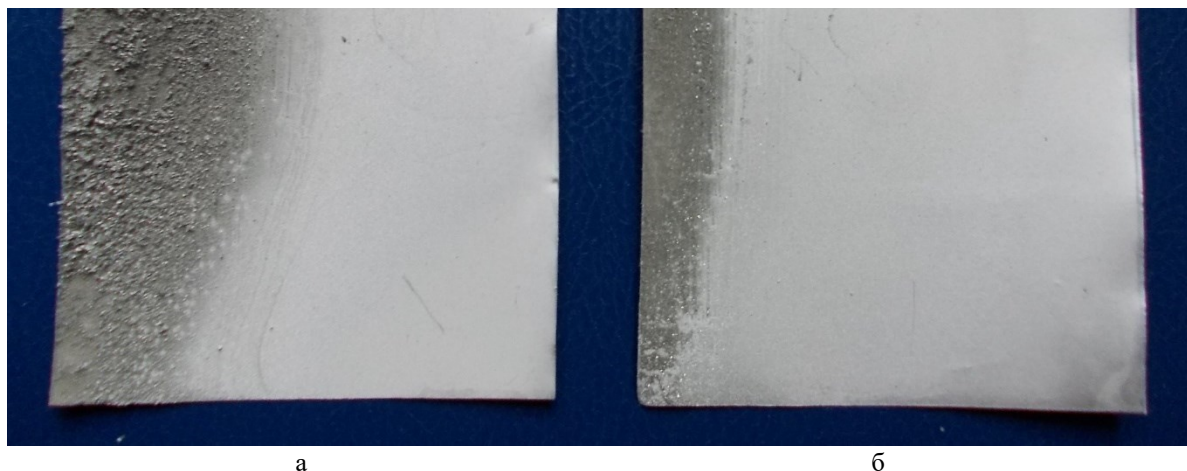


Рис. 4 Осади олова, отримані в комірці Хулла з сульфатного (а) та метансульфонатного (б) електролітів

Як видно з рисунку, осади, отримані з метансульфонатного електроліту в присутності поверхнево-активних речовин, є світлими та дрібнокристалічними у широкому діапазоні густин струму.

Висновки

Встановлено, що введення у метансульфонатний розчин електроекстракції оксиетильованих β -нафтолів приводить до інгібування виділення олова. Показано, що максимальний ефект інгібування досягається за концентрацій добавок близько 1 ммоль/л. Встановлено, що діапазон потенціалів, який відповідає граничному адсорбційному струму виділення олова з метансульфонатного розчину, є вужчим порівняно з сульфатним розчином.

Встановлено, що мінімальна висота піни і максимальна температура помутніння характерні для неіоногенного оксиетильованого β -нафтола з брутто формулою $C_{36}H_{60}O_{14}$, що робить його потенційно прийнятним для використання у високошвидкісних процесах електроекстракції олова з метансульфонатних розчинів. Показано, що за рахунок більшої концентрації аквакомплексів олова(II) в метансульфонатному розчині порівняно з сульфатним розчином, діапазон густин струму, в якому можна отримати компактні дрібнокристалічні осади олова для метансульфонатного розчину є ширшим.

Література

1. Rudnik E. Preliminary studies on hydrometallurgical tin recovery from waste of tin stripping of copper wires / E. Rudnik, D. Wincek // *Metallurgy and Foundry Engineering*. – 2017. – Volume 43(1). – P. 7–20. <http://dx.doi.org/10.7494/mafe.2017.43.1.7>
2. Zhang X. Selective Desoldering Separation of Tin–Lead Alloy for Dismantling of Electronic Components from Printed Circuit Boards / X. Zhang, J. Guan, Y. Guo, X. Yan, H. Yuan, J. Xu, J. Guo, Y. Zhou, R. Su, Z. Guo // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2015. – Volume 3(8). – P. 1696–1700. doi:10.1021/acssuschemeng.5b00136
3. Yang C. Green Process of Metal Recycling: Coprocessing Waste Printed Circuit Boards and Spent Tin Stripping Solution / C. Yang, J. Li, Q. Tan, L. Liu, Q. Dong // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2017. – Volume 5(4). – P. 3524–3534. doi:10.1021/acssuschemeng.7b00245
4. Jumari A. Tin recovery from tin slag using electrolysis method / A. Jumari, A. Purwanto, A. Nur, A.W. Budiman, M. Larian, F.A. Paramita // *The 3rd International Conference on Industrial Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering*. AIP Conf. Proc. 9 February 2018. – Volume 1931 (1). – P. 030011. <https://doi.org/10.1063/1.5024070>
5. Silva M.S.B. Electrochemical extraction of tin and copper from acid leachate of printed circuit boards using copper electrodes / M.S.B. Silva, R.A.C. Melo, A.L. Lopes-Moriyama, C.P. Souza // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Volume 246. – P. 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.009>

6. Sharma A. Pure Sn Coatings Produced by Pulse Plating from Stannate Bath / A. Sharma, H. Seo, B. Ahn // *Coatings*. – 2020. – Volume 10(2). – P. 117. <https://doi.org/10.3390/coatings10020117>
7. Sekar R. Effect of additives on electrodeposition of tin and its structural and corrosion behaviour / R. Sekar, C. Eagammai, S. Jayakrishnan // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2009. – Volume 40(1). – P. 49–57. doi:10.1007/s10800-009-9963-6
8. He A. Electrodeposition of tin: a simple approach / A. He, Q. Liu, D.G. Ivey // [*Journal of Materials Science: Materials in Electronics*](#). – 2008. – Volume 19. – P. 553–562. <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9385-3>
9. Azpeitia L.A. Effects of Temperature and Thiourea Addition on the Electrodeposition of Tin on Glassy Carbon Electrodes in Acid Solutions / L.A. Azpeitia, C.A. Gervasi, A.E. Bolzán // *Electrochimica Acta*. – 2017 – Volume 257. – P. 388-402. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.064>
10. Yung-Herng Y. The Effect of Process Variables on Electrotinning in a Methanesulfonic Acid Bath / Y. Yung-Herng // [*Journal of The Electrochemical Society*](#). – 2000. – Volume 147(3). – P. 1071-1076. [HTTPS://DOI.ORG/10.1149/1.1393315](https://doi.org/10.1149/1.1393315)
11. Zavarine I.S. Spectroelectrochemical Study of the Effect of Organic Additives on the Electrodeposition of Tin / I.S. Zavarine, O. Khaselev, Y. Zhang // [*Journal of The Electrochemical Society*](#). – 2003. – Volume 150(4). – P. 202-207. [HTTPS://DOI.ORG/10.1149/1.1554724](https://doi.org/10.1149/1.1554724)
12. Gernon M. D. Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages / M.D. Gernon, M. Wu, T. Buszta, P. Janney // *Green Chemistry*. – 1999 – № 3. – P. 127 – 140.

References

1. Rudnik E. Preliminary studies on hydrometallurgical tin recovery from waste of tin stripping of copper wires / E. Rudnik, D. Wincek // *Metallurgy and Foundry Engineering*. – 2017. – Volume 43(1). – P. 7–20. <http://dx.doi.org/10.7494/mafe.2017.43.1.7>
2. Zhang X. Selective Desoldering Separation of Tin–Lead Alloy for Dismantling of Electronic Components from Printed Circuit Boards / X. Zhang, J. Guan, Y. Guo, X. Yan, H. Yuan, J. Xu, J. Guo, Y. Zhou, R. Su, Z. Guo // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2015. – Volume 3(8). – P. 1696–1700. doi:10.1021/acssuschemeng.5b00136
3. Yang C. Green Process of Metal Recycling: Coprocessing Waste Printed Circuit Boards and Spent Tin Stripping Solution / C. Yang, J. Li, Q. Tan, L. Liu, Q. Dong // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2017. – Volume 5(4). – P. 3524–3534. doi:10.1021/acssuschemeng.7b00245
4. Jumari A. Tin recovery from tin slag using electrolysis method / A. Jumari, A. Purwanto, A. Nur, A.W. Budiman, M. Larian, F.A. Paramita // *The 3rd International Conference on Industrial Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering. AIP Conf. Proc.* 9 February 2018. – Volume 1931 (1). – P. 030011. <https://doi.org/10.1063/1.5024070>
5. Silva M.S.B. Electrochemical extraction of tin and copper from acid leachate of printed circuit boards using copper electrodes / M.S.B. Silva, R.A.C. Melo, A.L. Lopes-Moriyama, C.P. Souza // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Volume 246. – P. 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.009>
6. Sharma A. Pure Sn Coatings Produced by Pulse Plating from Stannate Bath / A. Sharma, H. Seo, B. Ahn // *Coatings*. – 2020. – Volume 10(2). – P. 117. <https://doi.org/10.3390/coatings10020117>
7. Sekar R. Effect of additives on electrodeposition of tin and its structural and corrosion behaviour / R. Sekar, C. Eagammai, S. Jayakrishnan // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2009. – Volume 40(1). – P. 49–57. doi:10.1007/s10800-009-9963-6
8. He A. Electrodeposition of tin: a simple approach / A. He, Q. Liu, D.G. Ivey // [*Journal of Materials Science: Materials in Electronics*](#). – 2008. – Volume 19. – P. 553–562. <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9385-3>
9. Azpeitia L.A. Effects of Temperature and Thiourea Addition on the Electrodeposition of Tin on Glassy Carbon Electrodes in Acid Solutions / L.A. Azpeitia, C.A. Gervasi, A.E. Bolzán // *Electrochimica Acta*. – 2017 – Volume 257. – P. 388-402. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.064>
10. Yung-Herng Y. The Effect of Process Variables on Electrotinning in a Methanesulfonic Acid Bath / Y. Yung-Herng // [*Journal of The Electrochemical Society*](#). – 2000. – Volume 147(3). – P. 1071-1076. [HTTPS://DOI.ORG/10.1149/1.1393315](https://doi.org/10.1149/1.1393315)
11. Zavarine I.S. Spectroelectrochemical Study of the Effect of Organic Additives on the Electrodeposition of Tin / I.S. Zavarine, O. Khaselev, Y. Zhang // [*Journal of The Electrochemical Society*](#). – 2003. – Volume 150(4). – P. 202-207. [HTTPS://DOI.ORG/10.1149/1.1554724](https://doi.org/10.1149/1.1554724)
12. Gernon M. D. Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages / M.D. Gernon, M. Wu, T. Buszta, P. Janney // *Green Chemistry*. – 1999 – № 3. – P. 127 – 140.