

ВПЛИВ СУЛЬФУРУМІСНИХ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН НА СТРУКТУРУ ТА ВНУТРІШНІ НАПРУГИ НІКЕЛЮ, ОТРИМАНОГО ПРИ ЕЛЕКТРОЕКСТРАКЦІЇ

Юрій Скар

доктор хімічних наук, професор,
завідувач кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, yurisknar@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1188-3684

Ірина Скар

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, irinasknar202@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8433-1285

Тетяна Бутиріна

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, butyrinatanya74@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0619-6783

Дослідження присвячено актуальній темі переробки нікельумісних жаростійких сплавів з отриманням нікелю шляхом електроекстракції з розчину вилуговування. Нікель належить до стратегічно важливих металів в оборонному комплексі, його рециклінгове використання є пріоритетним з огляду на дефіцитність і дорожнечу. Висока чистота нікелю, отриманого в результаті переробки лому жаростійких сплавів, досягається при використанні електрохімічного способу вилучення його з розчинів вилуговування. У роботі використано метансульфонатний розчин вилуговування з додаванням до нього сульфурумісних органічних речовин. Досліджено вплив аллілсульфонату, ортоарилсульфонату й сахаринату натрію на структуру та внутрішні напруги нікелю, отриманого шляхом електроекстракції. Установлено, що всі досліджувані органічні речовини сприяють подрібненню кристалітів нікелю. Розмір кристалітів нікелю є меншим за присутності в метансульфонатному розчині аллілсульфонату натрію порівняно з ортоарилсульфонатом натрію. Показано, що аллілсульфонат сильніше адсорбується на поверхні катоду, ніж ортоарилсульфонат, на що вказує більша кількість сульфуру, що інкорпорується в нікель. Установлено, що найбільш ефективним модифікатором структури нікелю є сахаринат натрію. Зменшення розмірів кристалітів нікелю досягається за десятикратно меншої кількості сахаринату натрію, ніж аллілсульфонату й ортоарилсульфонату натрію. Для всіх органічних речовин у досліджуваному діапазоні концентрацій характерна інкорпорація сульфуру в кількості, що не перевищує 0,1 % (ат). Для пояснення впливу цих органічних речовин на структуру нікелю, отриманого електроекстракцією з метансульфонатного розчину, запропоновано модель десульфування, яка передбачає інкорпорацію сульфуру в нікелеву кристалічну ґратку у формі твердого розчину й сульфідів нікелю на межах кристалітів. Показано, що зменшення внутрішніх напруг досягається за рахунок зниження енергії на межах кристалітів і послаблення сил когезії, які викликають коалесценцію кристалітів.

Ключові слова: нікель, сульфурумісні органічні речовини, електроекстракція, метансульфонатний електроліт, структура, внутрішні напруги.

Актуальність роботи. Нікель належить до стратегічних металів, оскільки конструкційні матеріали, до складу яких він входить, відіграють важливу роль у критичних галузях діяльності людини. Обмеженість природних запасів і висока собівартість видобутку стратегічних металів сприяють пошуку технологій для продо-

вження терміну служби матеріалів [1] і їх повторного використання. Одним із основних напрямів застосування нікелю є виробництво жаростійких сплавів [2].

Жаростійкі сплави відзначаються високою міцністю, термостійкістю й корозійною стійкістю, що зумовлює їх застосування у виготов-

ленні газових турбін авіаційних двигунів [3–5]. Через високу вартість, обмеженість компонентів і критичну важливість таких сплавів їх лом підлягає рециклінговій переробці з метою виділення вихідних металів [6–8]. Отримані метали здебільшого використовуються для повторного створення жаростійких сплавів, що визначає високі вимоги до їх чистоти. Для отримання високочистого нікелю з розчинів вилуговування жаростійких сплавів використовується метод електроекстракції [9].

Нікель, отриманий електрохімічним способом, має значні внутрішні напруги розтягування [10], що ускладнює формування товстих шарів при електроекстракції. Зменшити внутрішні напруги нікелю можна за допомогою додавання сульфуромісних сполук під час процесу [11]. Вилуговування суперсплавів зазвичай здійснюється із застосуванням традиційних розчинів вилуговування на основі сульфатної, хлоридної або нітратної кислот [12]. Залишається малодослідженим новий вид розчинів вилуговування на основі метансульфонової кислоти, солі якої добре розчиняються у водному середовищі [13].

З огляду на актуальність проблеми отримання нікелю з низькими внутрішніми напругами, метою дослідження стало вивчення впливу сульфуромісних органічних сполук на структуру нікелю, отриманого методом електроекстракції.

Матеріал і результати дослідження. Електроекстракція нікелю проводилася із сульфатного та метансульфонатного розчинів. Склад сульфатного розчину: 1М NiSO₄ + 0,3М NaCl + 0,7М Н₃ВО₃. Склад метансульфонатного розчину: 1М Ni(CH₃SO₃)₂ + 0,3М NaCl + 0,7М Н₃ВО₃. Усі експерименти проводили при температурі електролізу 333 К і рН 3. Як сульфуромісні органічні речовини, що знижують внутрішні напруги нікелю, використовували алілсульфонат, ортоарилсульфонат і сахаринат натрію.

Рентгеноструктурні дослідження нікелевих осадів проводили з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-3. Уміст сульфуру в нікелі визначали за допомогою рентгенівського спектрометра «Спрут» X100 [14].

Структуру нікелю вивчали за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3 з використанням монохроматичного Cu-Kα випромінювання. Розміри кристалітів обчислювали за формулою Селякова-Шеррера. Мікрофотографії отримано за допомогою електронного растрового мікроскопа мікроаналізатора РЕММА-102-02.

Уміст сульфуру в нікелі визначали методом калібрування за інтегральною інтенсивністю лінії S-Kα ($\lambda = 5,37 \text{ \AA}$) із використанням рентгенівського спектрометра «Спрут» X100, оснащеного Si(Li) детектором [14]. Полярографічні дослідження проводили із застосуванням ртутного капаючого електрода на полярографі ПУ-1. Електродом порівняння слугував насичений хлорид-срібний електрод.

Внутрішні напруги нікелю визначали методом гнучкого катода за формулою:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{E_k \cdot d_k \cdot (d_k + d_{\text{ос}}) \cdot z}{3 \cdot l^2 \cdot d_{\text{ос}}}, \quad (1)$$

де E_k – модуль пружності катодної пластини; d_k – товщина катода; $d_{\text{ос}}$ – товщина осаду; l – довжина робочої частини катода; z – відхилення кінця катода від початкового становища.

При визначенні внутрішніх напруг на мідну пластину наносився нікелевий шар товщиною 25 мкм.

Електроосадження нікелю з розчинів його простих солей супроводжується значною перенапругою, що призводить до формування дрібнокристалічної структури металу. На цю структуру серед іншого впливає природа і склад розчину. Як видно з рис. 1, нікель, отриманий при електроекстракції з метансульфонатного електроліту, має менший розмір зерен порівняно з нікелем, отриманим із сульфатного розчину.

Оскільки процес електровідновлення іонів нікелю з метансульфонатного розчину є більш оборотним порівняно із сульфатним, відмінність у структурі нікелю варто пояснювати умовами електрокристалізації металу в цих середовищах. Структура нікелю може залежати від адсорбції на поверхні електрода різних частинок, присутніх у електроліті, і їх стабільності [15]. У випадку розчинів без органічних речовин такими частинками можуть бути нікель гідроксид, адсорбовані атоми водню, молекули водню або хлорид-іони в розчинах хлориду нікелю [16].

Кількість водню, що виділяється під час електролізу нікелю в сульфатному й метансульфонатному розчинах, є майже однаковою і становить близько 3 %. Таким чином, адсорбований водень не може бути причиною відмінностей у морфології нікелевих зразків, отриманих із цих розчинів. Імовірно, вплив метансульфонат-аніону на структуру нікелю пов'язаний з утворенням метансульфонатних комплексів нікелю, які, на відміну від сульфатних комплексів, можуть адсорбуватися на

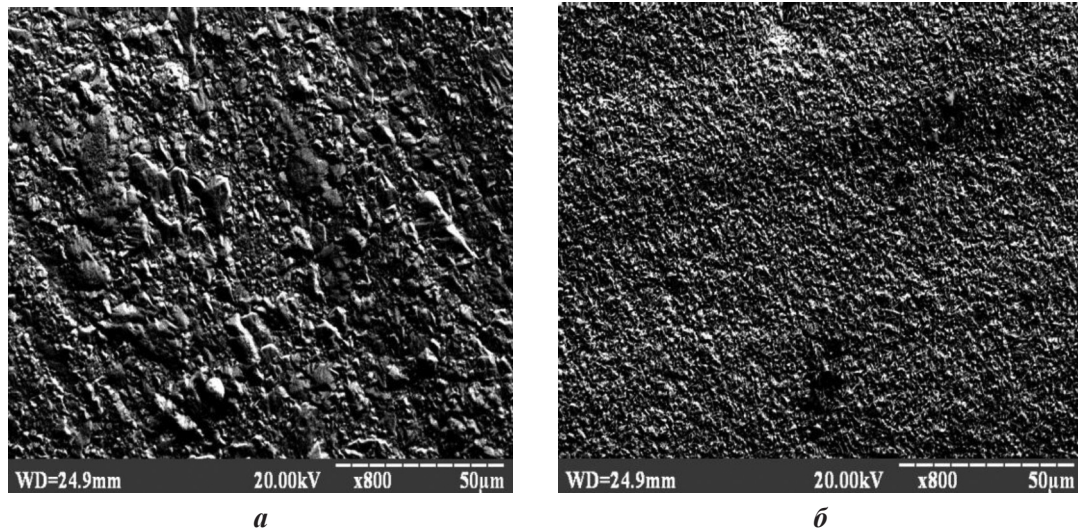


Рис. 1. Морфологія поверхні нікелю, отриманого з розчинів вилуговування:
а) сульфатного; б) метансульфонатного

активних центрах росту кристалів. Іншою можливою причиною є вплив на стабільність колоїдних частинок гідроксиду нікелю, які утворюються в приелектродному просторі. Потрапляючи на поверхню електрода, ці частинки, залежно від їхнього розміру, сприяють зменшенню розмірів зерен нікелю.

Для отримання нікелю з низькими внутрішніми напруженнями до метансульфонатного розчину додавали сульфуромісні органічні речовини аллілсульфонат, ортоарилсульфонат і сахаринат натрію, які, вочевидь, впливають на структуру нікелю. Додавання цих компонентів у розчин вилуговування викликає суттєве зменшення розміру зерен нікелю. Порівняння морфології поверхні нікелевих зразків, отриманих за при-

сутності аллілсульфонату й ортоарилсульфонату натрію, показує, що осад із більш дрібнокристалічною структурою формується в розчині, що містить аллілсульфонат натрію (рис. 2). Це, імовірно, пов'язано з рівномірною адсорбцією аллілсульфонат натрію на різних гранях кристалів, тоді як ортоарилсульфонат натрію адсорбується вибірково щодо граней кристалів. Як видно з таблиці 1, розміри кристалів нікелю вздовж напрямків відбиття $\{111\}$ і $\{311\}$ за присутності в розчині аллілсульфонату натрію є меншими, ніж за присутності в розчині ортоарилсульфонату натрію. Характерно, що вміст сульфуру в нікелі, отриманому за використання аллілсульфонату, перевершує вміст сульфуру, що потрапляє в нікель з ортоарилсульфонату. Можна

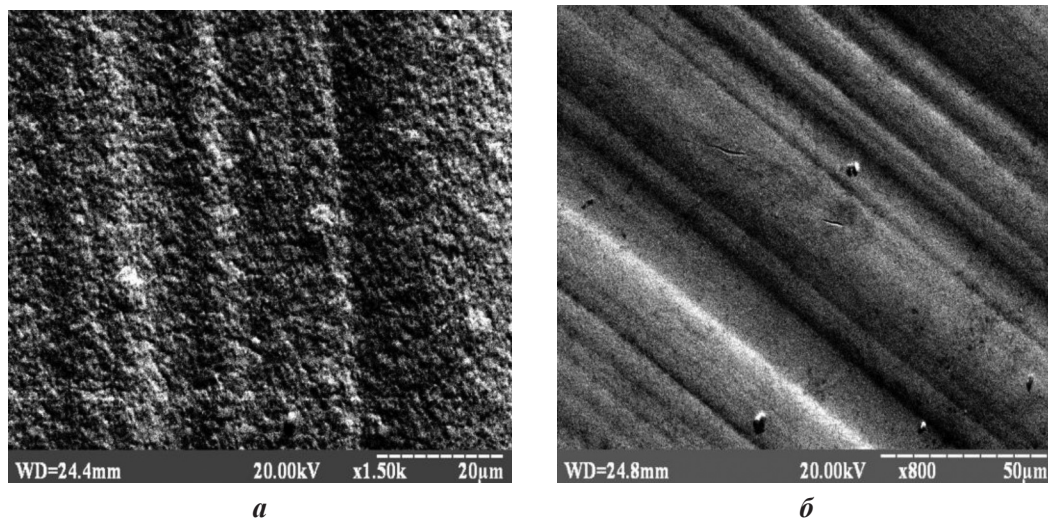


Рис. 2. Морфологія поверхні нікелевих осадків, одержаних із метансульфонатного розчину за присутності 2 г/л: а) аллілсульфонат натрію; б) ортоарилсульфонат натрію

Таблиця 1

Вплив аллілсульфонату, ортоарилсульфонату й сахаринату натрію на розмір кристалітів нікелю та вміст сульфуру в металі

Органічна речовина	Концентрація, г/л	Розмір кристаліту{111}, нм	Розмір кристаліту{311}, нм	Атомний відсоток сульфуру, % (ат.)
Аллілсульфонат натрію	1	51	32	0,09
	2	50	30	0,096
	3	49	29	0,101
Ортоарилсульфонат натрію	1	89	46	0,035
	2	65	35	0,077
	3	65	34	0,079
Сахаринат натрію	0,01	89	64	0,013
	0,10	80	63	0,065
	0,50	59	42	0,058

припустити, що адсорбція аллілсульфонату є більшою порівняно з ортоарилсульфонатом, у результаті перетворення цих речовин на катоді більша кількість сульфуру потрапляє в нікель з аллілсульфонату.

Сахаринат натрію є більш ефективним модифікатором структури нікелю, тому його використовують у значно меншій кількості порівняно з аллілсульфонатом та ортоарилсульфонатом натрію. Як видно з таблиці 1, використання сахаринату натрію в діапазоні концентрацій 0,01–0,5 г/л призводить до подрібнення кристалітів нікелю. При цьому вміст сульфуру в металі є суттєвим уже за таких концентрацій. Вочевидь, сульфур із сахаринату потрапляє в нікель не тільки в результаті повної деструкції органічної речовини, а й разом із карбонумісними залишками продуктів неповного розкладання сахаринату на катоді.

Умови електроекстракції нікелю з метансульфонатних розчинів впливають не лише на структуру металу, а й внутрішні напруги, що виникають у нікелі при електроосажденні. Збільшення концентрації сульфуромісних органічних речовин у розчині сприяє зниженню внутрішніх напруг розтягнення (таблиця 2), характерних для нікелю. При концентрації ортоарилсульфонату понад 2 г/л спостерігається зміна знака внутрішніх напруг на від'ємний, що відповідає переходу від внутрішніх напруг розтягнення до внутрішніх напруг стискання. Аналогічний ефект прослідковується й у разі використання понад 0,1 г/л сахаринату натрію. Як бачимо, ефективність сахаринату натрію є найбільшою, оскільки для отримання практично ненапруженого нікелю достатньо 0,1 г/л сахаринату натрію.

Таблиця 2

Вплив аллілсульфонату, ортоарилсульфонату й сахаринату натрію на внутрішні напруги нікелю

Органічна речовина	Концентрація, г/л	Внутрішні напруги, МПа
Аллілсульфонат натрію	1	193
	2	6
	3	5
Ортоарилсульфонат натрію	1	31
	2	-2
	3	-14
Сахаринат натрію	0,01	145
	0,10	3
	0,50	-18

Зниження внутрішніх напруг нікелю, отриманого електроекстракцією за присутності сульфуромісних органічних речовин, очевидно, пов'язане зі збільшенням умісту сульфуру в металі. Відомо, що сульфур може включатися в електролітичний нікель у вигляді пересиченого твердого розчину [17]. При перевищенні кількості сульфуру в нікелі понад 0,1 % (ат.) досягається межа його розчинності, подальше збільшення умісту сульфуру призводить до формування двофазної системи, яка складається з твердого розчину сульфуру в нікелі й сульфіді нікелю.

Згідно з результатами дослідження, уміст сульфуру в більшості досліджуваних осадів не перевищує 0,1 % (ат.), або 0,057 % (мас.), що свідчить про його включення переважно

в металеву решітку, підвищуючи ступінь її неупорядкованості.

Вплив сульфур на внутрішні напруги нікелю зумовлений збільшенням рівноважної густини дислокацій. Крім того, величина внутрішніх напруг значною мірою залежить від розміру кристалітів: зразки з більшими кристалітами мають нижчі напруги. Дослідження авторів [17] також показують, що включення сульфур в нікель, отриманий із сульфамінового розчину, змінює кристалічну структуру металу. Установлено, що сульфур знижує енергію на межах кристалітів і послаблює сили когезії, які викликають коалесценцію кристалітів, що, своєю чергою, зменшує внутрішні напруги розтягнення.

Кількість сульфур, що потрапляє в нікель під час електроекстракції, варіюється, що зумовлено специфікою поведінки органічних сульфуромісних сполук на катоді. Як видно з полярограм, алілсульфонат та ортоарилсульфонат натрію (рис. 3, криві 2 і 3) не проявляють електроактивності в діапазоні потенціалів від $-0,1$ до $-1,5$ В (х.с.е.), на що вказує ідентичність ходу кривих із фоновою кривою (рис. 3, крива 1).

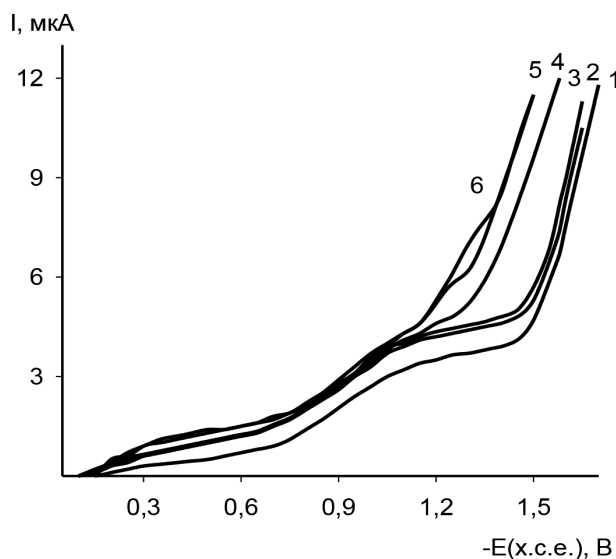
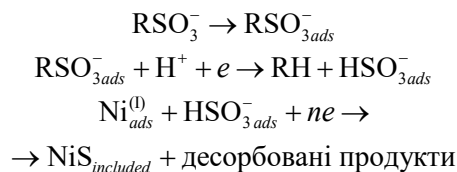


Рис. 3. Польограми, отримані у фоновому розчині $1\text{M CH}_3\text{SO}_3\text{Na}$ (1) і в присутності: 2 – 1 г/л алілсульфонату натрію; 3 – 1 г/л ортоарилсульфонату натрію; 4 – 0,1 г/л сахаринату натрію; 5 – 1 г/л сахаринату натрію; 6 – 2 г/л сахаринату натрію

Для сахаринату натрію характерна хвиля електровідновлення, яка починається при потенціалі $-1,2$ В (х.с.е.) (рис. 3, криві 4–6), причому гра-

нична густина струму зростає пропорційно концентрації сахаринату натрію в розчині. Проте електровідновлення сахаринату натрію під час осадження нікелю малоімовірно, оскільки виділення нікелю відбувається в ділянці потенціалів, які є більш позитивними. Варто зазначити, що паралельно з нікелем відбувається виділення водню. Отже, відновлення сульфур з органічних сполук найбільш вірогідно відбувається на поверхні електроду за участі адсорбованих атомів гідрогену:



Згідно із цією схемою, десульфування сахаринату натрію відбувається найбільш інтенсивно, оскільки при десятикратно меншій концентрації сахаринату натрію, ніж алілсульфонату й ортоарилсульфонату натрію, у нікель потрапляє приблизно однакова кількість сульфур.

Отже, для отримання нікелю з низькими внутрішніми напругами з метансульфонатного розчину можуть бути застосовані всі досліджувані органічні речовини. Унаслідок хімічних перетворень на електроді за їх участі відбувається включення сульфур в нікель, що змінює структуру осаду і внутрішні напруги нікелю.

Висновки. Виявлено вплив органічних сульфуромісних речовин на структуру та внутрішні напруги нікелю, отриманого електроекстракцією з метансульфонатного розчину. Установлено кореляцію між умістом сульфур, що інкорпорується в нікель, і рівнем його внутрішніх напруг.

Досліджено електроактивність алілсульфонату, ортоарилсульфонату й сахаринату натрію. Установлено, що в діапазоні потенціалів $-0,1$ – $-1,5$ В (х.с.е.) електроактивність проявляє лише сахаринат натрію, однак його відновлення відбувається при потенціалі $-1,2$ В (х.с.е.), який не досягається в умовах електроекстракції нікелю. Для пояснення впливу цих органічних речовин на структуру нікелю, отриманого електроекстракцією з метансульфонатного розчину, запропоновано модель десульфування, яка передбачає інкорпорацію сульфур в нікелеву кристалічну ґратку у формі твердого розчину та сульфиду нікелю на межах кристалітів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Симонова А., Кулинич В., Драгобецький В. Аналіз перспектив використання технологічних способів модифікації поверхневого шару для підвищення ресурсу та довговічності деталей машин. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2024. № 1(144). С. 184–189.
2. Selective Extraction of Ni from Superalloy Scraps by Molten Mg-Zn / Q.Tian et al. *Metals*. 2021. № 11(6). P. 993.
3. Exploring the fundamentals of Ni-based superalloy single crystal (SX) alloy design: Chemical composition vs. Microstructure / O.Horst et al. *Materials & Design*. 2020. V. 195. 108976.
4. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges / R.R.Srivastava et al. *Journal of Materials Science*. 2014. № 14. P. 4671–4686.
5. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys / W.Xia et al. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020 V. 44. P. 76–95.
6. Recovery of Ni and Co Elements from Superalloy Leaching Solution by Sodium Roasting and Water Leaching / J.Liu et al. *Journal of Materials Science & Technology*. 2024. V. 76. P. 3393–3401.
7. Alviál-Hein G., Mahandra H., Ghahreman A. Separation and recovery of cobalt and nickel from end of life products via solvent extraction technique: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. V. 297. 126592.
8. Towards “zero waste” extraction of nickel from scrap nickel-based superalloy using magnesium / F.Cui et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. V. 262. 121275.
9. Kollová A., Pauerová K. Superalloys – characterization, usage and recycling. *Manufacturing technology*. 2022. № 22(5). P. 550–557.
10. Mieszkowska M., Grdeń M. Electrochemical deposition of nickel targets from aqueous electrolytes for medical radioisotope production in accelerators: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2021. V. 25. P. 1699–1725.
11. Li Y., Yao J., Huang X. Effect of Saccharin on the Process and Properties of Nickel Electrodeposition from Sulfate Electrolyte. *Int J Metall Mater Eng*. 2016. V. 2. 123.
12. Ganji D.K., Rajyalakshmi G. Influence of Alloying Compositions on the Properties of Nickel-Based Superalloys: A Review. Kumar H., Jain P. (Eds.) *Recent Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore : Springer, 2020. P. 537–555.
13. Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages / M.D.Gernon et al. *Green Chemistry*. 1999. № 3. P. 127–140.
14. Perspectives of development of X-ray analysis for material composition / I.F.Gernon et al. *Functional Materials*. 2016. V. 23(1). P. 5–14.
15. Recent developments in the electrodeposition of nickel and some nickel-based alloys / R.Orinakova et al. *J. Appl. Electrochem*. 2006. V. 36. P. 957–972.
16. Chassaing E., Jousselein M., Wiart R. The kinetics of nickel electrodeposition. Inhibition by adsorbed hydrogen and anions. *J. Electroanal. Chem*. 1983. V. 157. P. 75–88.
17. Microstructural origins of saccharin-induced stress reduction in electrodeposited Ni / A.Bhandari et al. *J. Electrochem. Soc*. 2009. V. 156(8). P. D279–D282.

THE INFLUENCE OF SULPHUR-CONTAINING ORGANIC SUBSTANCES ON THE STRUCTURE AND INTERNAL STRESSES OF NICKEL OBTAINED BY ELECTROEXTRACTION

Yuri Sknar

Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department of Processes, Apparatus and General Chemical Technology
Ukrainian State University of Science and Technology, 2 Lazaryana str., Dnipro, Ukraine, 49010,
yurisknar@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1188-3684

Irina Sknar

PhD, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Processes, Apparatus and General Chemical Technology
Ukrainian State University of Science and Technology, 2 Lazaryana str., Dnipro, Ukraine, 49010,
irinasknar202@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8433-1285

Tetiana Butyrina

PhD, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of technology of inorganic substances and ecology
Ukrainian State University of Science and Technology, 2 Lazaryana str., Dnipro, Ukraine, 49010,
butyrinatanya74@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0619-6783

The study is devoted to the topical topic of processing nickel-containing heat-resistant alloys with the production of nickel by electroextraction from the leaching solution. Nickel is a strategically important metal in the defense complex and its recycling is a priority due to its scarcity and high cost. High purity of nickel obtained as a result of processing scrap of heat-resistant alloys is achieved by using an electrochemical method of extracting it from leaching solutions. The work used a methanesulfonate leaching solution with the addition of sulfur-containing organic substances. The effect of allyl sulfonate, orthoaryl sulfonate and sodium saccharinate on the structure and internal stresses of nickel obtained by electroextraction was studied. It was found that all the studied organic substances contribute to the grinding of nickel crystallites. The size of nickel crystallites is smaller in the presence of sodium allyl sulfonate in the methanesulfonate solution compared to sodium orthoaryl sulfonate. It is shown that allyl sulfonate is more strongly adsorbed on the cathode surface than orthoarylsulfonate, as indicated by the greater amount of sulfur incorporated into nickel. It is established that the most effective modifier of the nickel structure is sodium saccharinate. A decrease in the size of nickel crystallites is achieved with a tenfold smaller amount of sodium saccharinate than with allyl sulfonate and sodium orthoarylsulfonate. For all organic substances in the studied concentration range, the incorporation of sulfur in an amount not exceeding 0.1 % (at). To explain the influence of these organic substances on the structure of nickel obtained by electroextraction from a methanesulfonate solution, a desulfuration model is proposed, which assumes the incorporation of sulfur into the nickel crystal lattice in the form of a solid solution and nickel sulfide at the crystallite boundaries. It is shown that the reduction of internal stresses is achieved by reducing the energy at the crystallite boundaries and weakening the cohesive forces that cause the coalescence of crystallites.

Key words: nickel, sulfur-containing organic substances, electroextraction, methanesulfonate electrolyte, structure, internal stresses.

REFERENCES

1. Simonova, A., Kulnych, V., Dragobetskyi, V. (2024). Analiz perspektyv vykorystannia tekhnolohichnykh sposobiv modyfikatsii poverkhnevoho sharu dlia pidvyschennia resursu ta dovhovichnosti detalei mashyn [Analysis of prospects for the use of technological methods of surface layer modification to increase the service life and durability of machine parts]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*. № 1(144), pp. 184–189 [in Ukrainian].
2. Tian, Q., Gan, X., Cui, F., Yu, D., & Guo, X. (2021). Selective Extraction of Ni from Superalloy Scraps by Molten Mg-Zn. *Metals*. 11, 993.
3. Horst, O., Adler, D., Adler, P., Wang, H., Streitberger, J., Streitberger, M., Jöns, N., Singer, R.F., Körner, C., & Eggeler, G. (2020). Exploring the fundamentals of Ni-based superalloy single crystal (SX) alloy design: Chemical composition vs. microstructure. *Materials & Design*. V. 195, 108976.
4. Srivastava, R.R., Kim, M., Lee, J., Jha, M.K., & Kim, B. (2014). Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of Materials Science*. № 14, pp. 4671–4686.
5. Xia, W., Zhao, X., Yue, L., & Zhang, Z., (2020). A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys. *Journal of Materials Science & Technology*. V. 4, pp. 76–95.
6. Liu, J., Tang, J., Sun, Y., Zhou, Y., & Shi, F. (2024). Recovery of Ni and Co Elements from Superalloy Leaching Solution by Sodium Roasting and Water Leaching. *Journal of Materials Science & Technology*. V. 76, pp. 3393–3401.
7. Alvial-Hein, G., Mahandra, H., & Ghahreman, A. (2021). Separation and recovery of cobalt and nickel from end of life products via solvent extraction technique: A review. *Journal of Cleaner Production*. V. 297, 126592.
8. Cui, F., Wang, G., Yu, D., Gan, X., Tian, Q., & Guo X. (2020). Towards “zero waste” extraction of nickel from scrap nickel-based superalloy using magnesium. *Journal of Cleaner Production*. V. 262, 121275.
9. Kollová, A., & Pauerová, K. (2022). Superalloys – characterization, usage and recycling. *Manufacturing technology*. 22 (5), pp. 550–557.
10. Mieszkowska, M., & Grdeń, M. (2021). Electrochemical deposition of nickel targets from aqueous electrolytes for medical radioisotope production in accelerators: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*. V. 25, pp. 1699–1725.
11. Li, Y., Yao, J., & Huang, X. (2016). Effect of Saccharin on the Process and Properties of Nickel Electrodeposition from Sulfate Electrolyte. *Int J Metall Mater Eng*. V. 2, 123.
12. Ganji, D.K., & Rajyalakshmi, G. (2020). Influence of Alloying Compositions on the Properties of Nickel-Based Superalloys: A Review. In H. Kumar & P. Jain (Eds.), *Recent Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore, pp. 537–555.
13. Gernon, M.D., Wu, M., Buszta T., & Janney P. (1999). Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages. *Green Chemistry*. № 3, pp. 127–140.
14. Mikhailov, I.F., Baturin, A.A., Mikhailov, A.I., & Fomina, L.P. (2016). Perspectives of development of X-ray analysis for material composition. *Functional Materials*. V. 23(1), pp. 5–14.
15. Orinakova, R., Turonova, A., Kladekova, D., Galova, M., & Smith, R.M. (2006). Recent developments in the electrodeposition of nickel and some nickel-based alloys. *J. Appl. Electrochem*. V. 36. pp. 957–972.

16. Chassaing, E., Jousselein, M., & Wiart R. (1983). The kinetics of nickel electrodeposition. Inhibition by adsorbed hydrogen and anions. *J. Electroanal. Chem.*. V. 157. pp. 75–88.

17. Bhandari, A., Yearne, S.J., Sheldon, B.W., & Soni, S.K. (2009). Microstructural origins of saccharin-induced stress reduction in electrodeposited Ni. *J. Electrochem. Soc.* V. 156(8). pp. D279–D282.

Стаття надійшла 26.01.2025