

Ю. Є. СКНАР

доктор хімічних наук, професор,
завідувач кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-1188-3684

Р. С. АМІРУЛЛОЄВ

аспірант кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0002-1571-0817

І. В. СКНАР

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0001-8433-1285

Т. Є. БУТИРІНА

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри технології неорганічних речовин і екології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-0619-6783

Н. В. АМІРУЛЛОЄВА

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці, цивільної та екологічної безпеки
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-3839-3976

ВПЛИВ НАТРІЙ САХАРИНАТУ НА МІКОТВЕРДІСТЬ НІКЕЛЮ, ОДЕРЖАНОГО ЕЛЕКТРОЕКСТРАКЦІЄЮ ІЗ МЕТАНСУЛЬФОНАТНОГО РОЗЧИНУ

Рециклінг жароміцних сплавів є ключовою ланкою виробництва стратегічно важливих матеріалів. Особливе значення для оборонної промисловості мають нікелеві суперсплави, що застосовуються під час виготовлення деталей авіаційних турбін. Переведення складових сплаву в розчин здійснюють у кислому середовищі, після чого з отриманого розчину послідовно виділяють окремі компоненти. Для одержання металів високої чистоти найбільш ефективним вважається метод електроекстракції з вилугувального розчину. Перспективним вилугувальним агентом із високою розчинною здатністю щодо солей компонентів жаротривких сплавів є метансульфонатний розчин. Метансульфонова кислота є електрохімічно інертною в широкому вікні потенціалів, що робить цей вилугувуючий агент прийнятним для організації процесу електроекстракції.

У роботі досліджено вплив натрій сахаринату на мікротвердість нікелю, одержаного з метансульфонатного розчину вилугування. Проведено співставлення результатів для метансульфонатного і сульфатного розчинів електроекстракції нікелю. Встановлено, що підвищення концентрації натрій сахаринату з 0,05 до 2 ммоль/л в метансульфонатному розчині вилугування призводить до збільшення мікротвердості нікелю з 180 до 310 кг/см². Показано, що мікротвердість зростає зі зменшенням температури електролізу з 333°K до 313°K. Збільшення густини струму електроосадження нікелю з 2 А/дм² до 7 А/дм² призводить до зменшення значень мікротвердості. Останнє пов'язано зі зменшенням впливу натрій сахаринату на структуру нікелю внаслідок зменшення його поверхневої концентрації за високих густин струму електроосадження. Збільшення густини струму електроосадження призводить



до пришивидшеного оновлення катодної поверхні і дифузійних утруднень при транспортуванні натрій сахаринату до поверхні осаджуваного нікелю. Встановлено, що мікротвердість нікелю, одержаного за присутності натрій сахаринату із метансульфонаного розчину перевищує мікротвердість нікелю, одержаного із сульфатного розчину. Показано, що збільшення мікротвердості електроосадженого нікелю обумовлено зменшенням розміру його кристалітів.

Ключові слова: метансульфонатний розчин, нікель, мікротвердість, натрій сахаринат, структура, електроекстракція

YU. E. SKNAR

Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department of Processes, Apparatuses
and General Chemical Technology
SEI “Ukrainian State University of Chemical Technology”
of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-1188-3684

R. S. AMIRULLOEV

Postgraduate at the Department of Processes, Apparatuses
and General Chemical Technology
SEI “Ukrainian State University of Chemical Technology”
of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0009-0002-1571-0817

I. V. SKNAR

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Processes, Apparatuses
and General Chemical Technology
SEI “Ukrainian State University of Chemical Technology”
of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-8433-1285

T. E. BUTYRINA

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technology of Inorganic Substances
and Ecology
SEI “Ukrainian State University of Chemical Technology”
of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-0619-6783

N. V. AMIRULLOIEVA

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Occupational Safety, Civil
and Environmental Security
SEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”
of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-3839-3976

INFLUENCE OF SODIUM SACCHARINATE ON THE MICROTARDNESS OF NICKEL OBTAINED BY ELECTROEXTRACTION FROM METHANE SULFONATE SOLUTION

Recycling of heat-resistant alloys is a key link in the production of strategically important materials. Of particular importance for the defense industry are nickel superalloys used in the manufacture of aircraft turbine parts. The alloy components are transferred into solution in an acidic environment, after which individual components are sequentially isolated from the resulting solution. The most effective method for obtaining high-purity metals is considered to be electroextraction from a leaching solution. A promising leaching agent with high solubility in relation to salts of components of heat-resistant alloys is methanesulfonate solution. Methanesulfonic acid is electrochemically inert in a wide potential window, which makes this leaching agent acceptable for organizing the electroextraction process.

The work investigated the effect of sodium saccharinate on the microhardness of nickel obtained from methanesulfonate leaching solution. The results were compared for methanesulfonate and sulfate solutions of nickel electroextraction. It was found that increasing the concentration of sodium saccharinate from 0.05 to 2 mmol/l in methanesulfonate leaching solution leads to an increase in the microhardness of nickel from 180 to 310 kg/cm². It was shown that the microhardness increases with a decrease in the electrolysis temperature from 333°K to 313°K. An increase in the current density of nickel

electrodeposition from 2 A/dm² to 7 A/dm² leads to a decrease in the microhardness values. The latter is associated with a decrease in the influence of sodium saccharinate on the structure of nickel due to a decrease in its surface concentration at high electrodeposition current densities. An increase in the electrodeposition current density leads to an accelerated renewal of the cathode surface and diffusion difficulties in transporting sodium saccharinate to the surface of the deposited nickel. It has been established that the microhardness of nickel obtained in the presence of sodium saccharinate from a methanesulfonate solution exceeds the microhardness of nickel obtained from a sulfate solution. It has been shown that the increase in the microhardness of electrodeposited nickel is due to a decrease in the size of its crystallites.

Key words: methanesulfonate solution, nickel, microhardness, sodium saccharinate, structure, electroextraction

Постановка проблеми

Нікель належить до групи стратегічно важливих металів, оскільки матеріали з його вмістом застосовуються у виробництвах, що мають критичне значення для різних сфер людської діяльності. Обмеженість природних ресурсів і висока собівартість отримання таких металів зумовлюють необхідність розроблення технологій, спрямованих на подовження строку служби матеріалів та їх повторне використання шляхом рециклінгу. Однією з провідних сфер застосування нікелю є виробництво суперсплавів [1], які відзначаються високою міцністю, жаростійкістю та корозійною стійкістю. Саме тому їх широко використовують у виготовленні газових турбін авіаційних двигунів [2–4]. Значна вартість, дефіцитність і стратегічна важливість компонентів суперсплавів зумовлюють необхідність переробки їх брухту з вилученням цінних складників [5–7]. Отримані метали переважно застосовують для повторного синтезу суперсплавів, що висуває підвищені вимоги до рівня їх чистоти. Високочистий нікель зазвичай одержують електрохімічними методами, зокрема шляхом електроекстракції з розчинів, отриманих після вилуговування брухту суперсплавів [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Електроосадження нікелю зазвичай супроводжується виділенням водню, що призводить до підвищення рН у прикатодному шарі та утворення малорозчинних основних сполук нікелю. Частинки цих сполук адсорбуються на поверхні катода, включаються до осаду та впливають на кінетику процесу, мікроструктуру і фізико-хімічні характеристики металу. Для нікелевих осадів, отриманих із електролітів без органічних добавок, типовими є внутрішні напруги розтягнення [10], що погіршує механічні властивості й ускладнює формування товстих шарів металу під час електроекстракції. Зменшити ці напруги можна шляхом введення до електроліту сірковмісних сполук [11–13].

У роботі [14] досліджено вплив сахарину на процес електроосадження нікелю із сульфатного електроліту при рН 4,2 і температурі 50°C та на властивості сформованих осадів. Встановлено, що при густині струму 4 А/дм² і концентрації сахарину 0,1–1,2 г/л внутрішні напруги змінюються з розтягувальних на стискальні. Автори [15] також вивчали залежність структури та властивостей нікелю від складу електроліту, що містив сахарин і цитрат натрію. У праці [16] проаналізовано вплив органічних добавок кумарину та тринатрієвої солі 1,3,6-нафталінтрисульфокислоти на структуру і фізико-хімічні властивості нікелю, осажденного із сульфатного електроліту. Показано, що кумарин сприяє включенню водню в осад і зростанню внутрішніх напружень розтягнення, тоді як тринатрієва сіль 1,3,6-нафталінтрисульфокислоти викликає формування напружень стиснення. Це пояснюється інкорпорацією сульфуру в кристалічну ґратку нікелю, джерелом якого є зазначена сіль.

Вилуговування суперсплавів зазвичай здійснюють із застосуванням сульфатної, хлоридної або нітратної кислот [17]. Водночас розвиток сучасних технологій забезпечив промислове виробництво метансульфонової кислоти, яка утворює добре розчинні у воді солі металів [18].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є встановлення впливу натрій сахаринату на мікротвердість та структуру нікелю, осажденного з електроліту на основі метансульфонової кислоти, а також порівняння одержаних результатів із даними для сульфатного електроліту.

Для досягнення мети було сформульовано наступні задачі:

- дослідити вплив умов електролізу на мікротвердість нікелю, одержаного із метансульфонатних та сульфатних розчинів;
- дослідити вплив складу розчину та режимів електролізу на структуру нікелю, одержаного із метансульфонатних та сульфатних розчинів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Електроекстракція нікелю проводилась з розчинів вилуговування, що містили 1М Ni(CH₃SO₃)₂ + 0,5М NaCl + 0,7М Н₃ВО₃ та 1М NiSO₄ + 0,5М NaCl + 0,7М Н₃ВО₃. В якості сульфурвмісної органічної сполуки, що знижує внутрішні напруги нікелю, використано натрій сахаринат. Температура процесу складала 333°К та 313°К. Кислотність всіх розчинів дорівнювала рН3. Рентгеноструктурні дослідження здійснювали з використанням дифрактометра ДРОН-3 у монохроматизованому Cu-K_α випромінюванні. Мікротвердість нікелю вимірювалася за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні P = 100 г та товщині нікелю 25 мкм. При вимірюванні мікротвердості в якості індентору використовували правильну чотиригранну алмазну пірамідку з кутом при вершині 136° (рис. 1).

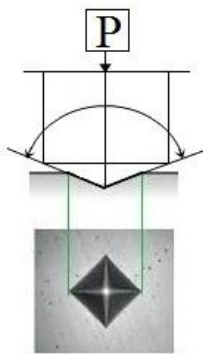


Рис. 1. Схема визначення мікротвердості за Вікерсом

Значення мікротвердості визначали за формулою:

$$H = \frac{1854 \cdot P}{l^2}, \quad (1)$$

де l – довжина діагоналі відбитка алмазної пірамідки, мкм.

Органічні сульфурвмісні речовини, що вводяться в електроліти електроекстракції нікелю чинять значний вплив на фізико-механічні властивості металу. Вони знижують внутрішні напруги розтягнення і змінюють мікротвердість нікелю. Як видно із рис. 2 збільшення концентрації натрій сахаринату в метансульфонатному електроліті призводить до збільшення мікротвердості нікелю. Зі збільшенням густини струму мікротвердість нікелю знижується.

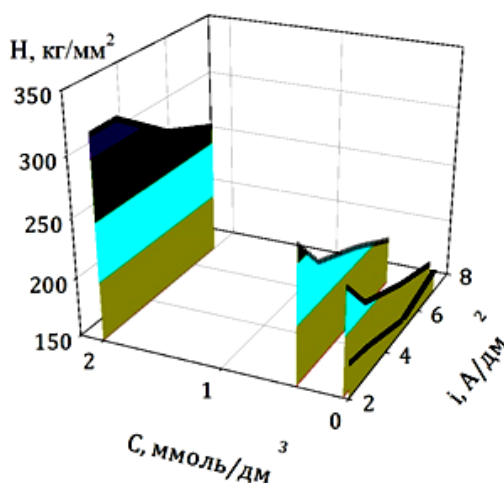


Рис. 2. Вплив густини струму осадження на мікротвердість нікелю, одержаного з метансульфонатного розчину при температурі 333°K

Вочевидь, збільшення густини струму призводить до прискорення оновлення поверхні металу і зменшенню поверхневої концентрації натрій сахаринату. Останнє, своєю чергою, відбивається на інтенсивності впливу добавки на мікротвердість нікелю.

Зменшення температури електролізу призводить до збільшення в цілому мікротвердості електроосадженого нікелю (рис. 3). При зниженні температури електролізу з 333 °K до 313 °K у присутності натрій сахаринату спостерігається більш різке зменшення мікротвердості при переході від низьких до вищих значень густини струму. Очевидно, при нижчій температурі відбувається зменшення концентрації натрій сахаринату у приелектродному просторі внаслідок уповільнення дифузійного процесу, і відповідно, впливу його на фізико-механічні властивості нікелю.

Для встановлення особливостей впливу натрій сахаринату на мікротвердість нікелю, електроосадженого з метансульфонатного розчину, проведено зіставлення мікротвердості нікелю, отриманого з метансульфонатного та сульфатного розчинів. Характерно, що для нікелю, отриманого з сульфатного розчину в присутності цієї речовини, спостерігаються менші значення мікротвердості порівняно з метансульфонатним розчином (рис. 4).

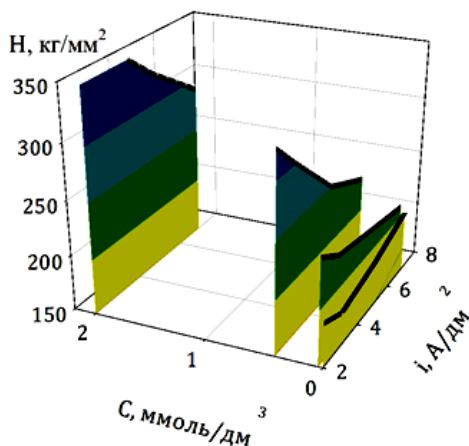


Рис. 3. Вплив густини струму осадження на мікротвердість нікелю, одержаного з метансульфонатного розчину при температурі 313°K

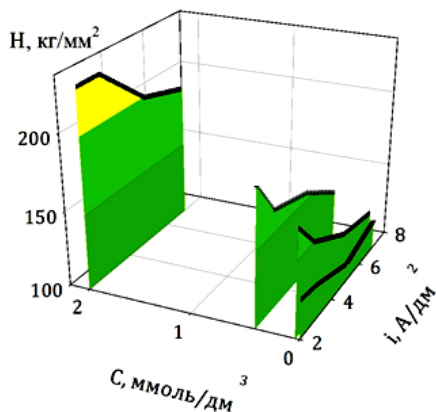


Рис. 4. Вплив густини струму осадження на мікротвердість нікелю, одержаного з сульфатного електроліту при температурі 333°K

Щодо залежності мікротвердості нікелю від температури процесу електроекстракції, то загальні закономірності, встановлені для метансульфонатного розчину, зберігаються і в сульфатному розчині. Тобто, зменшення температури провокує підвищення мікротвердості нікелю і викликає більш різке її зниження при збільшенні густини струму порівняно з електролізом при 333°K (рис. 5).

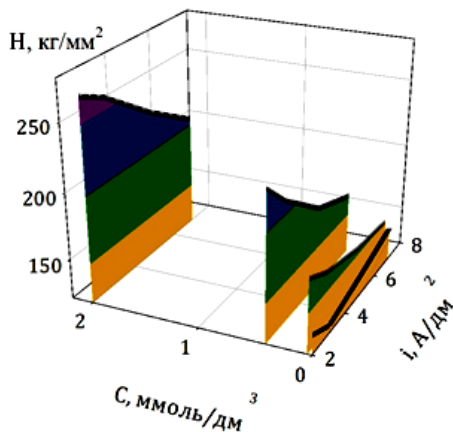


Рис. 5. Вплив густини струму осадження на мікротвердість нікелю, одержаного з сульфатного розчину при температурі 313°K

Встановлені закономірності впливу натрій сахаринату на мікротвердість нікелю зумовлені впливом цієї сполуки на електрокристалізацію та структуру осадів.

Електроосадження нікелю з розчинів, що не містять органічні добавки призводить до формування мікрокристалічних осадів (рис. 6). Причому розмір зерен нікелю, одержаного з метансульфонатного розчину, виявився меншим у порівнянні з розміром зерен осаду, одержаного з сульфатного розчину.

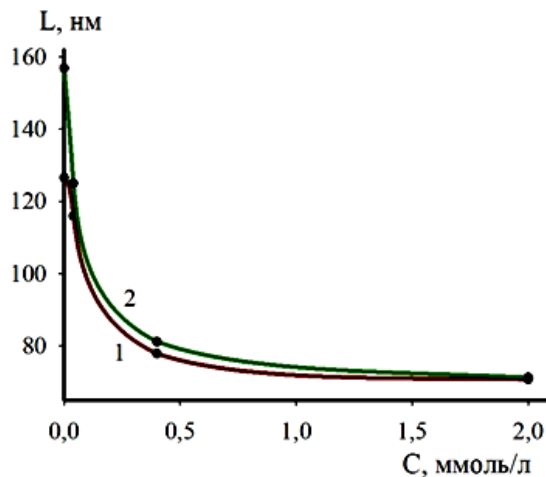


Рис. 6. Вплив концентрації натрій сахаринату на середній розмір кристаліту нікелю, одержаного з метансульфонатного (1) та сульфатного (2) розчинів

Введення в метансульфонатний розчин органічної добавки призводить до зменшення розмірів кристалітів. Виходячи з наведених даних, можна зробити висновок про те, що натрій сахаринат чинить більший вплив на структуру нікелю, електроосадженого з метансульфонатного розчину в порівнянні з сульфатним розчином.

На структурно залежні властивості нікелю впливають зміни кристалічної структури, які пов'язані з дією натрій сахаринату. Зменшення розміру кристалітів, викликане дією цієї речовини призводить до збільшення мікротвердості нікелю відповідно до рівняння Холла-Петча [18]:

$$H = 3\sigma_y \quad (2)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-0.5}, \quad (3)$$

де σ_y – межа плинності;

σ_0 – напруга тертя решітки;

d – розмір кристалітів;

k – константа, що враховує вплив структури границь, ступеня закріплення дислокацій та легування.

Як видно з рівнянь (2) і (3), мікротвердість металевих осадів залежить від розміру кристалітів. Зменшення d , виявлене для нікелю, електроосадженого за присутності натрій сахаринату, повинно призводити до підвищення мікротвердості осаду, що дійсно спостерігається в експерименті.

Висновки

Встановлено вплив умов електролізу на мікротвердість нікелю, одержаного із метансульфонатних та сульфатних розчинів. Показано, що збільшення концентрації натрій сахаринату в метансульфонатному розчині електроекстракції нікелю призводить до збільшення його мікротвердості і при концентрації 2 ммоль/л натрій сахаринату мікротвердість сягає 310-340 кг/см². Встановлено, що зменшення температури електролізу з 333°К до 313°К викликає деяке збільшення мікротвердості. Натомість, збільшення густини струму електроосадження призводить до її зменшення. Показано, що мікротвердість нікелю, одержаного з метансульфонатного розчину є вищою за мікротвердість нікелю, одержаного з сульфатного розчину.

За використання рівняння Холла-Петча пояснено вплив натрій сахаринату на мікротвердість нікелю. Зменшення розміру кристалітів викликає збільшення мікротвердості металу. Більш інтенсивне подрібнення кристалітів, спостережуване в метансульфонатному розчині, що містить натрій сахаринат, забезпечує більшу мікротвердість нікелю, одержаного з метансульфонатного розчину порівняно з сульфатним розчином.

Список використаної літератури

1. Tian Q., Gan X., Cui F., Yu D., Guo X. Selective Extraction of Ni from Superalloy Scraps by Molten Mg-Zn. *Metals*. Vol. 11(6). 2021. P. 993. <https://doi.org/10.3390/met11060993>
2. Horst O., Adler D., Adler P., Wang H., Streitberger J., Streitberger M., Jöns N., Singer R. F., Körner C., Eggeler G. Exploring the fundamentals of Ni-based superalloy single crystal (SX) alloy design: Chemical composition vs. microstructure. *Materials & Design*. Vol. 195. 2020. P. 108976. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108976>
3. Srivastava R. R., Kim M., Lee J., Jha M. K., Kim B. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of Materials Science*. № 14. 2014. P. 4671-4686. DOI:10.1007/s10853-014-8219-y
4. Xia W., Zhao X., Yue L., Zhang Z. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys. *Journal of Materials Science & Technology*. Vol. 44. 2020. P. 76-95. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.026>
5. Liu J., Tang J., Sun Y., Zhou Y., Shi F. Recovery of Ni and Co Elements from Superalloy Leaching Solution by Sodium Roasting and Water Leaching. *Journal of Materials Science & Technology*. Vol. 76. 2024. P. 3393-3401.
6. Alvial-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*. Vol. 297. 2021. P. 126592. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126592>
7. Cui F., Wang G., Yu D., Gan X., Tian Q., Guo X. Towards “zero waste” extraction of nickel from scrap nickel-based superalloy using magnesium. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 262. 2020. P. 121275.
8. Kollová A., Pauerová K. Superalloys – characterization, usage and recycling. *Manufacturing technology*. Vol. 22 (5). 2022. P. 550-557. DOI: 10.21062/mft.2022.070
9. 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*. Vol. 25. 2021. P. 1699-1725. DOI:10.1007/s10008-021-04950-w
10. Mohanty U. S., Tripathy B. C., Singh P., Keshavarz A., Iglauer, S. Roles of organic and inorganic additives on the surface quality, morphology, and polarization behavior during nickel electrodeposition from various baths: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 49. 2019. P. 847–870. <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01335-w>
11. Baraniak M.; Lota G., Wojciechowski J., Walkiewicz F., Regel-Rosocka M. Effect of Versenium Hydrogensulfate on Properties of Nickel Coatings. *Materials*. Vol. 16. 2023. P. 4101. <https://doi.org/10.3390/ma16114101>
12. Mbugua N. S., Kang M., Zhang Y., Ndiithi N. J., V Bertrand G, Yao L. Electrochemical Deposition of Ni, NiCo Alloy and NiCo-Ceramic Composite Coatings-A Critical Review. *Materials*. Vol. 13(16). 2020. P. 3475. doi: 10.3390/ma13163475
13. 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*. Vol. 2. 2016. P. 123. <http://dx.doi.org/10.15344/2455-2372/2016/123>
14. Kolonits T., Jenei P., Péter L, Bakonyi I., Czigány Z., Gubicza J. Effect of bath additives on the microstructure, lattice defect density and hardness of electrodeposited nanocrystalline Ni films. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 349. 2018. P. 611-621. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.06.052
15. Kim S. M., Jin S. H., Lee Y. J., Lee M. H. Design of nickel electrodes by electrodeposition: effect of internal stress on hydrogen evolution reaction in alkaline solutions. *Electrochimica Acta*. Vol. 252. 2017. P. 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.08.157>
16. Ganji D. K., & Rajyalakshmi G. 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: Springer, 2020. P. 537-555. DOI: 10.1007/978-981-15-1071-7_44
17. Gernon M. D., Wu M., Buszta T., Janney P. Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages. *Green Chemistry*. № 3. 1999. P. 127-140.
18. Chen W., He Y., Gao W. Electrodeposition of sol-enhanced nanostructured Ni-TiO₂ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 204. 2010. P. 2487–2492.

References

1. Tian Q., Gan X., Cui F., Yu D., Guo X. (2021) Selective Extraction of Ni from Superalloy Scraps by Molten Mg-Zn. *Metals*, Vol. 11(6), p. 993. <https://doi.org/10.3390/met11060993>
2. 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*, Vol. 195, p. 108976. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108976>
3. Srivastava R. R., Kim M., Lee J., Jha M. K., Kim B. (2014) Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of Materials Science*, no. 14, pp. 4671-4686. DOI:10.1007/s10853-014-8219-y
4. 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*, Vol. 44, pp. 76-95. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.026>

5. 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*, Vol. 76, pp. 3393-3401.
6. 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*, Vol. 297, p. 126592. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126592>
7. 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*, Vol. 262, pp. 121275.
8. Kollová A., Pauerová K. (2022) Superalloys – characterization, usage and recycling. *Manufacturing technology*, Vol. 22 (5), pp. 550-557. DOI: 10.21062/mft.2022.070
9. 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*, Vol. 25, pp. 1699-1725. DOI:10.1007/s10008-021-04950-w
10. Mohanty U. S., Tripathy B. C., Singh P., Keshavarz A., Iglauer, S. (2019) Roles of organic and inorganic additives on the surface quality, morphology, and polarization behavior during nickel electrodeposition from various baths: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 49, pp. 847–870. <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01335-w>
11. Baraniak M.; Lota G., Wojciechowski J., Walkiewicz F., Regel-Rosocka M. (2023) Effect of Versenium Hydrogensulfate on Properties of Nickel Coatings. *Materials*, Vol. 16, p. 4101. <https://doi.org/10.3390/ma16114101>
12. Mbugua N. S., Kang M., Zhang Y., Ndiithi N. J., V Bertrand G., Yao L. (2020) Electrochemical Deposition of Ni, NiCo Alloy and NiCo-Ceramic Composite Coatings-A Critical Review. *Materials*, Vol. 13(16), p. 3475. doi: 10.3390/ma13163475
13. 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.*, Vol. 2, p. 123. <http://dx.doi.org/10.15344/2455-2372/2016/123>
14. Kolonits T., Jenei P., Péter L., Bakonyi I., Czigány Z., Gubicza J. (2018) Effect of bath additives on the microstructure, lattice defect density and hardness of electrodeposited nanocrystalline Ni films. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 349, pp. 611-621. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.06.052
15. Kim S. M., Jin S. H., Lee Y. J., Lee M. H. (2017) Design of nickel electrodes by electrodeposition: effect of internal stress on hydrogen evolution reaction in alkaline solutions. *Electrochimica Acta*, Vol. 252, pp. 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.08.157>
16. 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: Springer, pp. 537-555. DOI: 10.1007/978-981-15-1071-7_44
17. Gernon M. D., Wu M., Buszta T., Janney P. (1999) Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages. *Green Chemistry*, no. 3, pp. 127-140.
18. Chen W., He Y., Gao W. (2010) Electrodeposition of sol-enhanced nanostructured Ni-TiO₂ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, pp. 2487–2492.

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026