

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-19>

УДК 621.35

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: irinaskнар202@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

АМІРУЛЛОЄВА НАТАЛІА

Український державний університет науки і технологій,
 ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
<https://orcid.org/0000-0002-3839-3976>
 e-mail: amirulloeva.natalya@pdaba.edu.ua

ВПЛИВ НАТРІЙ САХАРИНАТУ НА ВНУТРІШНІ НАПРУГИ НІКЕЛЮ, ОДЕРЖАНОГО ЕЛЕКТРОЕКСТРАКЦІЄЮ ІЗ МЕТАНСУЛЬФОНАТНОГО РОЗЧИНУ ВИЛУГОВУВАННЯ

Перероблення жароміцних сплавів становить важливий етап у виробництві стратегічно значущих матеріалів. Особливу роль для оборонної галузі відіграють нікелеві суперсплави, які використовують під час виготовлення елементів авіаційних турбін. Розчинення компонентів сплаву зазвичай проводять у кислому середовищі, після чого з утвореного розчину поетапно вилучають окремі складові. Для отримання металів високого ступеня чистоти одним із найрезультативніших підходів є електроекстракція з розчину вилуговування. Перспективним реагентом для вилуговування, що характеризується високою розчинністю солей компонентів жароміцних сплавів, вважають метансульфонатні розчини. При вилучення нікелю з розчинів вилуговування електроекстракційним методом формуються осади металу із значними внутрішніми напруженнями розтягнення. Для зниження цих напружень використовуються сульфурвмісні модифікатори властивостей нікелю, зокрема натрій сахаринат. В роботі проведено дослідження впливу натрій сахаринату на внутрішні напруження нікелю, одержаного електроекстракцією з метансульфонатного розчину вилуговування. Встановлено, що при збільшенні концентрації натрій сахаринату з 0,95 до 2,5 ммоль/л відбувається зниження внутрішніх напружень нікелю з переходом на внутрішні напруження стиснення. Збільшення густини струму знижує вплив натрій сахаринату на властивості нікелю, і внутрішні напруження розтягнення збільшуються. При зниженні температури електролізу з 333°K до 313°K спостерігається більша залежність внутрішніх напружень від густини струму. Співставлення даних з впливу натрій сахаринату на внутрішні напруження нікелю, одержаного із метансульфонатного і сульфатного розчинів, показало, що метансульфонатний розчин має суттєві переваги. Це пов'язано з можливістю отримувати нікель з мінімальними внутрішніми напруженнями в широкому діапазоні густин струму.

Ключові слова: нікель, електроекстракція, внутрішні напруження, натрій сахаринат, метансульфонатний розчин

SKNAR YURI, SKNAR IRYNA, BUTYRINA TETIANA, AMIRULLOIEVA NATALIA

Ukrainian State University of Science and Technology,
 Research Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology"

INFLUENCE OF SODIUM SACCHARINATE ON THE INTERNAL STRESSES OF NICKEL OBTAINED BY ELECTROEXTRACTION FROM METHANE SULFONATE LEACH SOLUTION

The processing of heat-resistant alloys is an important stage in the production of strategically important materials. Nickel superalloys, which are used in the manufacture of aircraft turbine elements, play a special role in the defense industry. The dissolution of alloy components is usually carried out in an acidic environment, after which individual components are gradually removed from the resulting solution. To obtain metals of high purity, one of the most effective approaches is electroextraction from a leaching solution. Methanesulfonate solutions are considered a promising reagent for leaching, characterized by high solubility of salts of heat-resistant alloy components. When nickel is extracted from leaching solutions by the electroextraction method, metal precipitates with significant internal tensile stresses are formed. To reduce these stresses, sulfur-containing modifiers of nickel properties, in particular sodium saccharinate, are used. The work investigated the effect of sodium saccharinate on the internal stresses of nickel obtained by electroextraction from methanesulfonate leaching solution. It was found that with an increase in the concentration of sodium saccharinate from 0.95 to 2.5 mmol/l, the internal stresses of nickel decrease with a transition to internal compressive stresses. An increase in the current density reduces the effect of sodium saccharinate on the properties of nickel and the internal tensile stresses increase. When the electrolysis temperature decreases from 333 °K to 313 °K, a greater dependence of internal stresses on current density is observed. Comparison of data on the effect of sodium saccharinate on the internal stresses of nickel obtained from methanesulfonate and sulfate solutions showed that the methanesulfonate solution has significant advantages. This is due to the possibility of obtaining nickel with minimal internal stresses in a wide range of current densities.

Keywords: nickel, electroextraction, internal stresses, sodium saccharinate, methanesulfonate solution

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026
 Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026
 Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Скарн Юрій, Скарн Ірина, Бутиріна Тетяна, Аміроллоєва Наталія

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

Нікель відіграє ключову роль в аерокосмічній галузі завдяки здатності зберігати високі механічні та експлуатаційні характеристики в умовах екстремальних температур, навантажень і агресивних середовищ. На його основі створюють жароміцні суперсплави, які є основними матеріалами для найвідповідальніших деталей газотурбінних авіаційних і ракетних двигунів, зокрема лопаток і дисків турбін, камер згоряння та соплових апаратів, що працюють за температур понад 1000°C і під дією значних механічних напружень. Висока температура плавлення, опір повзучості, стійкість до окиснення та гарячої корозії забезпечують тривалу надійну роботу таких матеріалів у високотемпературних зонах двигунів і силових установок. Нікелеві сплави також застосовують у конструкційних елементах, що зазнають тривалих термомеханічних навантажень, а також як жаростійкі та корозійностійкі покриття, які підвищують ресурс дорогих деталей і захищають їх від руйнування в агресивних середовищах. У ракетно-космічній техніці ці матеріали використовують для виготовлення елементів двигунів, вузлів, що піддаються інтенсивному аеродинамічному нагріву, а також систем, які контактують з компонентами ракетного палива. Сукупність цих властивостей зумовлює стратегічне значення нікелю як одного з базових матеріалів сучасної авіаційної та космічної техніки. Обмежені природні поклади та коштовність нікелю зумовлюють необхідність рециклінгового його використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нікель належить до стратегічно важливих металів і переважно застосовується у виробництві нержавіючих сталей та жароміцних суперсплавів [1–3]. Суперсплави — це матеріали, що характеризуються винятковою міцністю, жаростійкістю та окисністійкістю і здатні працювати в умовах температур понад 1000°C. Завдяки високій температурі плавлення, стійкості до повзучості й корозії їх широко використовують у газотурбінних установках авіаційних двигунів і енергетичних агрегатів [4–6]. Під час виготовлення та експлуатації нікелевих суперсплавів утворюється значна кількість відходів і обрізків. Такий брухт є цінною вторинною сировиною, оскільки містить понад 50% нікелю, а також рідкісні й дорогоцінні метали (зокрема реній, вольфрам, тантал тощо) [7]. Тому відпрацьовані суперсплави доцільно піддавати рециклінгу з подальшим вилученням корисних компонентів сплаву. Гідрометалургійна переробка сплавів на основі нікелю зазвичай проводиться у кислотних розчинах з подальшим відокремленням нікелю і виділенням його у вигляді металу. Високоочищений нікель можна отримати шляхом його електроекстракції з розчину вилуговування [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

При електроекстракції нікелю відбувається формування металевого осаду з високими внутрішніми напруженнями розтягнення [9]. Останні викликають розтріскування нікелевих покривів і відшарування їх від катодної основи. Зменшення внутрішніх напружень розтягнення досягається за використання сульфурвмісних органічних сполук, які модифікують структуру нікелю [10–12]. В [13] повідомляється про дослідження щодо впливу сахарину на електроосадження та властивості нікелю, одержаного із сульфатного електроліту. Показано, що ведення в розчин сахарину у кількості 1,2 г/л призводить до зміни з внутрішніх напружень розтягнення на внутрішні напруження стиснення. В [14] наведено залежності структури та властивостей нікелю від концентрації сахарину та натрій цитрату. Загальноприйнятими електролітами вилуговування нікелю є кислотні розчини на основі сульфатної чи хлоридної кислоти [15]. Надзвичайно перспективними і водночас недостатньо дослідженими є розчини вилуговування на основі метансульфонової кислоти. Метансульфонати багатьох металів, зокрема і нікелю, є добре розчинними у воді [16], що дозволяє інтенсифікувати вилуговування нікельвмісних сплавів. Виходячи зі сказаного, можна виділити невирішене питання, яке полягає у встановленні закономірностей електроекстракції нікелю з метансульфонатного розчину що містить сульфурвмісні модифікатори фізико-механічних властивостей металу.

Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи було з'ясувати вплив натрій сахаринату на внутрішні напруження нікелю, одержаного при електроекстракції з метансульфонатного розчину вилуговування та співставити отримані результати з даними для сульфатного розчину.

Виклад основного матеріалу

Електроекстракція нікелю проводилась з метансульфонатного (1M Ni(CH₃SO₃)₂ + 0,5M NaCl + 0,7M H₃BO₃) та сульфатного (1M NiSO₄ + 0,5M NaCl + 0,7M H₃BO₃) розчинів вилуговування, що містили в якості модифікатора фізико-механічних властивостей нікелю натрій сахаринат. Температура електроекстракції становила 333°K та 313°K. Електроліз проводили із використанням джерела струму використовували прилад BVP Electronics Home Tools. Температуру розчинів підтримували термостатом марки УТ-15 з точністю ±0,5°K. Кислотність розчинів вилуговування дорівнювала рН3. Водневий показник рН вимірювали за допомогою скляного електрода марки ЕСК-10601/7 в комплекті з універсальним іономером ЕВ-74. Внутрішні напруження нікелю визначалася методом гнучкого катода. Верхню частину мідної пластини, ізольованої з одного боку, було жорстко зафіксовано, тоді як нижня залишалася вільною. Під час електролізу внаслідок внутрішніх напружень, що виникали в нікелі, спостерігалася викривлення катода. Формула для обчислення внутрішніх напружень $\sigma_{вн}$ (МПа) має такий вигляд:

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

де E_k – модуль пружності матеріалу катода, МПа; d_k – товщина катода, м; d_{oc} – товщина нікелю, м; l – довжина зануреної в розчин частини катода, м; z – відхилення кінця катода від вихідного положення, м.

Нікель, одержаний електроекстракцією з метилсульфонатного розчину вилуговування без спеціальних модифікаторів фізико-механічних властивостей має високі внутрішні напруги розтягнення (рис. 1). Використання в метилсульфонатному електроліті нікелювання натрій сахаринату в малих концентраціях (0,5–2,5 ммоль/л) призводить до сильного зниження внутрішніх напружень електроосажденного нікелю (рис. 1).

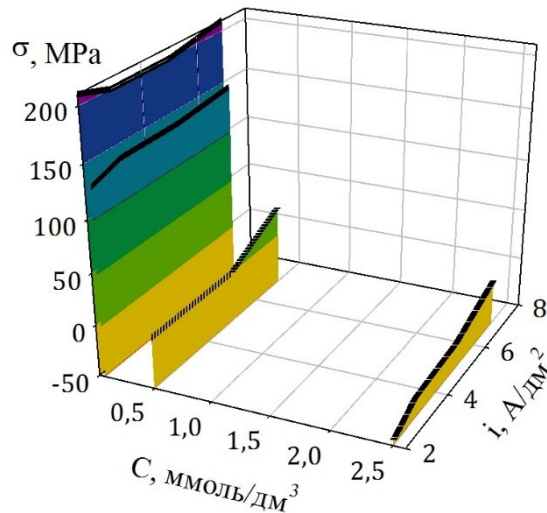


Рис. 1 Вплив концентрації натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, одержаного електроекстракцією з метансульфонатного розчину вилуговування при температурі 333°K

При концентрації натрій сахаринату 0,5 ммоль/л вдається отримати практично ненапружений нікель в діапазоні густин струму від 2 до 5 А/дм². Подальше збільшення густини струму призводить до зростання внутрішніх напруг нікелю. Останній ефект характерний для всіх концентрацій натрій сахаринату. Вочевидь, збільшення густини струму електроосадження супроводжується пришвидшенням оновлення катодної поверхні. Поверхнева концентрація натрій сахаринату зменшується, оскільки дифузійна доставка його до катодної поверхні є обмеженою і збільшення витрати адсорбованої добавки при збільшенні густини струму призводить до виникнення дефіциту натрій сахаринату у приповерхневому шарі. Як наслідок, зменшується вплив натрій сахаринату на структуру нікелю і величину його внутрішніх напруг.

Зниження температури електролізу сприяє збільшенню внутрішніх напруг нікелю, і при переході від 333°K до 313°K дещо змінюється хід кривих залежності внутрішніх напруг нікелю від концентрації натрій сахаринату (рис. 2).

При цій температурі значення внутрішніх напруг нікелю, одержуваних при співставних концентраціях добавки, виявляються більшими, ніж при $T = 333^{\circ}\text{K}$ і для повного їх нівелювання в інтервалі густин струму 2–7 А/дм² необхідно використовувати значно більшу кількість натрій сахаринату.

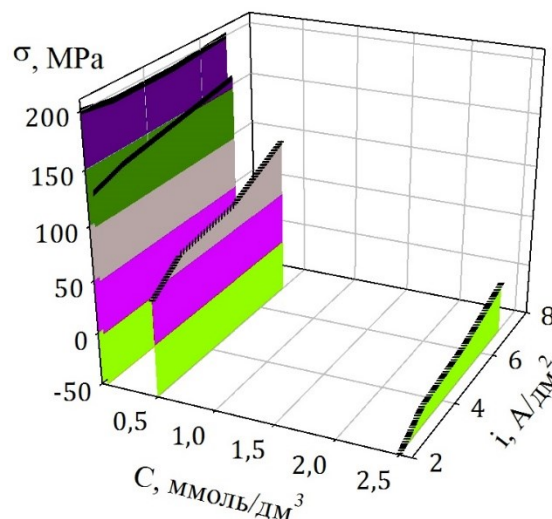


Рис. 2 Вплив концентрації натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, одержаного електроекстракцією з метансульфонатного розчину вилуговування при температурі 313°K

При зниженні температури електролізу спостерігається більш різке збільшення внутрішніх напруг розтягнення при переході від низьких до більш високих значень густини струму. Очевидно, при більш низькій температурі відбувається зменшення концентрації натрій сахаринату в приелектродному шарі внаслідок уповільнення дифузійного процесу.

Для встановлення особливостей впливу натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, електроосажденного з метансульфонатного розчину вилюговування, проведено зіставлення внутрішніх напруг нікелю, одержаного з метансульфонатного і сульфатного розчинів вилюговування.

З рисунку 3 видно, що в діапазоні густин струму від 2 до 7 А/дм² внутрішні напруги розтягнення нікелю, одержаного в сульфатному електроліті за відсутності органічних добавок, знаходяться в інтервалі від 130 до 160 МПа, що менше внутрішніх напруг, що виникають в нікелі, одержаному з вільного від сульфурвмісних органічних добавок метансульфонатного розчину вилюговування.

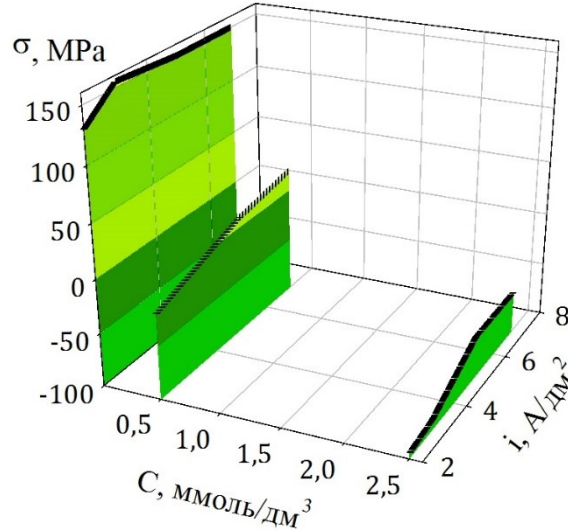


Рис. 3 Вплив концентрації натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, одержаного електроекстракцією з сульфатного розчину вилюговування при температурі 333°K

Введення в сульфатний розчин вилюговування натрій сахаринату, так само, як і в метансульфонатному розчині призводить до зниження внутрішніх напруг розтягнення нікелю. За присутності натрій сахаринату в сульфатному розчині одержати нікель без внутрішніх напруг в широкому діапазоні густин струму не вдається. Так, якщо в області низьких густин струму спостерігаються внутрішні напруги стискання, то в області високих густин струму – внутрішні напруги розтягнення. Зниження температури електролізу, так само як і в метансульфонатному розчині сприяє більш різкій зміні внутрішніх напруг при підвищенні густини струму (рис.4).

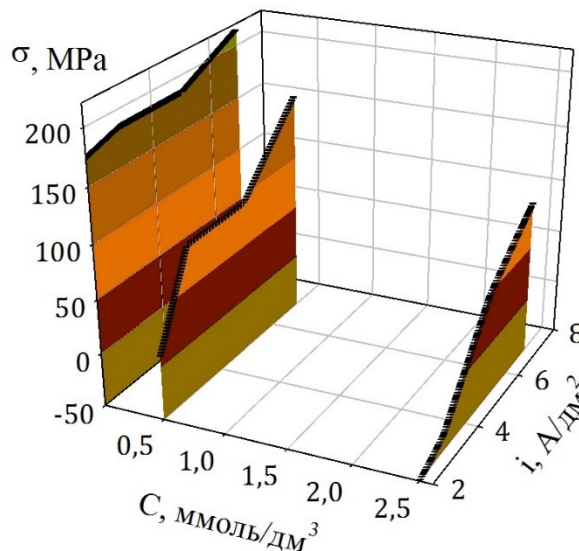


Рис. 4 Вплив концентрації натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, одержаного електроекстракцією з сульфатного розчину вилюговування при температурі 313°K

Характерно, що для нікелю, одержаного з сульфатного розчину вилюговування в присутності натрій сахаринату, спостерігається більша залежність внутрішніх напруг від густини струму, ніж в метансульфонатному розчині.

Варто підкреслити, що під час нанесення товстих металевих шарів визначальну роль відіграє рівень внутрішніх напруг. Зокрема, для нікелю, осажденного на плоскі поверхні, допустимі напруги стискання не повинні перевищувати 5 МПа; на увігнутих ділянках стискальні напруги є неприпустимими, тоді як на опуклих необхідно уникати напруг розтягнення. У зв'язку з цим істотна залежність внутрішніх напруг у нікелі від густини струму,

характерна для сульфатних розчинів, що містять натрій сахаринат, може спричинити появу стискальних напруг за низьких густин струму та напруг розтягнення за високих густин струму. Така особливість суттєво ускладнює використання подібних розчинів під час електроекстракції нікелю. Натомість метансульфонатний розчин у цьому аспекті має переваги над сульфатним розчином, оскільки забезпечує формування нікелю із мінімальними внутрішніми напругами в широкому інтервалі густин струму.

Висновки

Встановлено вплив концентрації натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, одержаного електроекстракцією з метансульфонатного розчину вилуговування. Показано, що збільшення концентрації натрій сахаринату призводить до зменшення в нікелі внутрішніх напруг розтягнення і при концентрації понад 0,5 ммоль/л виникненню внутрішніх напруг стиснення. Встановлено, що зниження температури електролізу з 333°K до 313°K призводить до ослаблення впливу натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, що пов'язано зі зменшенням поверхневої концентрації добавки внаслідок дифузійних обмежень.

Проведено порівняльний аналіз впливу натрій сахаринату на внутрішні напруги нікелю, одержаного з метансульфонатного і сульфатного розчинів вилуговування. Показано, що метансульфонатний розчин має переваги над сульфатним розчином в сенсі електроекстракції нікелю із мінімальними внутрішніми напругами в широкому інтервалі густин струму.

Отримані в роботі дані дозволяють керувати внутрішніми напругами нікелю, одержаного електроекстракцією при застосуванні метансульфонатного розчину вилуговування, що містить модифікатор властивостей нікелю – натрій сахаринат концентрацією 0,5 – 2,5 ммоль/л при температурі електролізу 333°K.

Література

1. Henckens M. L. C. M. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates / M.L.C.M. Henckens, E. Worrell // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Volume 264. – P. 121460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>
2. Tian Q. Selective Extraction of Ni from Superalloy Scraps by Molten Mg-Zn / Q. Tian, X. Gan, F. Cui, D. Yu, X. Guo // *Metals*. – 2021. – № 11. – P. 993. <https://doi.org/10.3390/met11060993>
3. Meshram P. Advanced review on extraction of nickel from primary and secondary sources / P. Meshram, Abhilash, B. D. Pandey // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2018. – Volume 40(3). – P. 157–193. doi: 10.1080/08827508.2018.1514300
4. Srivastava R. R. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. / R. R. Srivastava, M. Kim, J. Lee, M. K. Jha, B. Kim // *Journal of Materials Science*. – 2014. – Volume 49. – P. 4671–4686. doi 10.1007/s10853-014-8219-y
5. Xia W. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys. / W. Xia, X. Zhao, L. Yue, Z. Zhang // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – Volume 44. – P. 76–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.026>.
6. Horst O. Exploring the fundamentals of Ni-based superalloy single crystal (SX) alloy design: Chemical composition vs. microstructure / O. Horst, D. Adler, P. Adler, H. Wang, J. Streitberger, M. Streitberger, N. Jöns, R.F. Singer, C. Körner, G. Eggeler // *Materials & Design*. – 2020. – Volume 195. – P. 108976. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108976>
7. Yu D.W. Dissolution behavior of nickel-based superalloy in molten zinc: Its mechanism and kinetics. / D.W. Yu, X.D. Gan, F.H. Cui, X.Y. Guo, Q.H. Tian // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. Volume 878. – P. 160338.
8. Kollová A. Superalloys – characterization, usage and recycling / A. Kollová, K. Pauzerová, // *Manufacturing technology*. – 2022. – Volume 22 (5). – P. 550-557. doi: 10.21062/mft.2022.070
9. Mieszkowska M. Electrochemical deposition of nickel targets from aqueous electrolytes for medical radioisotope production in accelerators: a review / M. Mieszkowska, M. Grdeń // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2021. – Volume 2. – P. 1699–1725.
10. Mohanty U. S. Roles of organic and inorganic additives on the surface quality, morphology, and polarization behavior during nickel electrodeposition from various baths: a review. / U. S. Mohanty, B. C. Tripathy, P. Singh, A. Keshavarz, S. Iglauer // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2019. – Volume 49. – P. 847–870. <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01335-w>
11. Baraniak M. Effect of Versenium Hydrogensulfate on Properties of Nickel Coatings / M. Baraniak, G. Lota, J. Wojciechowski, F. Walkiewicz, M. Regel-Rosocka // *Materials*. – 2023 – Volume 16. – P. 4101. <https://doi.org/10.3390/ma16114101>
12. Mbugua N. S. Electrochemical Deposition of Ni, NiCo Alloy and NiCo-Ceramic Composite Coatings-A Critical Review./ N. S. Mbugua, M. Kang, Y. Zhang, N. J. Ndiithi, G. V. Bertrand, L. Yao // *Materials*. – 2020. – Volume 13(16). – P. 3475. doi: 10.3390/ma13163475
13. Li Y. Effect of Saccharin on the Process and Properties of Nickel Electrodeposition from Sulfate Electrolyte / Y. Li, J. Yao, X. Huang // *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*. – 2016. – Volume 2. – P. 123. <http://dx.doi.org/10.15344/2455-2372/2016/123>

14. Kolonits T. Effect of bath additives on the microstructure, lattice defect density and hardness of electrodeposited nanocrystalline Ni films / T. Kolonits, P. Jenei, L. Péter, I. Bakonyi, Z. Czigány, J. Gubicza // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Volume 349(15). – P. 611-621. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.06.052
15. Ganji D. K. Influence of Alloying Compositions on the Properties of Nickel-Based Superalloys: A Review / D. K. Ganji, G. Rajyalakshmi // *Recent Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. / Eds. In H. Kumar & P. Jain – (Singapore): Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1071-7-44>
16. 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. Henckens M. L. C. M. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates / M.L.C.M. Henckens, E. Worrell // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Volume 264. – P. 121460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>
2. Tian Q. Selective Extraction of Ni from Superalloy Scraps by Molten Mg-Zn / Q. Tian, X. Gan, F. Cui, D. Yu, X. Guo // *Metals*. – 2021. – № 11. – P. 993. <https://doi.org/10.3390/met11060993>
3. Meshram P. Advanced review on extraction of nickel from primary and secondary sources / P. Meshram, Abhilash, B. D. Pandey // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2018. – Volume 40(3). – P. 157–193. doi: 10.1080/08827508.2018.1514300
4. Srivastava R. R. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. / R. R. Srivastava, M. Kim, J. Lee, M. K. Jha, B. Kim // *Journal of Materials Science*. – 2014. – Volume 49. – P. 4671–4686. doi 10.1007/s10853-014-8219-y
5. Xia W. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys. / W. Xia, X. Zhao, L. Yue, Z. Zhang // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – Volume 44. – P. 76–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.026>
6. Horst O. Exploring the fundamentals of Ni-based superalloy single crystal (SX) alloy design: Chemical composition vs. microstructure / O. Horst, D. Adler, P. Adler, H. Wang, J. Streitberger, M. Streitberger, N. Jöns, R.F. Singer, C. Körner, G. Eggeler // *Materials & Design*. – 2020. – Volume 195. – P. 108976. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108976>
7. Yu D.W. Dissolution behavior of nickel-based superalloy in molten zinc: Its mechanism and kinetics. / D.W. Yu, X.D. Gan, F.H. Cui, X.Y. Guo, Q.H. Tian // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. Volume 878. – P. 160338.
8. Kollová A. Superalloys – characterization, usage and recycling / A. Kollová, K. Pauerová, // *Manufacturing technology*. – 2022. – Volume 22 (5). – P. 550-557. doi: 10.21062/mft.2022.070
9. Mieszkowska M. Electrochemical deposition of nickel targets from aqueous electrolytes for medical radioisotope production in accelerators: a review / M. Mieszkowska, M. Grdeń // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2021. – Volume 2. – P. 1699–1725.
10. Mohanty U. S. Roles of organic and inorganic additives on the surface quality, morphology, and polarization behavior during nickel electrodeposition from various baths: a review. / U. S. Mohanty, B. C. Tripathy, P. Singh, A. Keshavarz, S. Iglauer // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2019. – Volume 49. – P. 847–870. <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01335-w>
11. Baraniak M. Effect of Versenium Hydrogensulfate on Properties of Nickel Coatings / M. Baraniak, G. Lota, J. Wojciechowski, F. Walkiewicz, M. Regel-Rosocka // *Materials*. – 2023 – Volume 16. – P. 4101. <https://doi.org/10.3390/ma16114101>
12. Mbugua N. S. Electrochemical Deposition of Ni, NiCo Alloy and NiCo-Ceramic Composite Coatings-A Critical Review./ N. S. Mbugua, M. Kang, Y. Zhang, N. J. Ndiithi, G. V. Bertrand, L. Yao // *Materials*. – 2020. – Volume 13(16). – P. 3475. doi: 10.3390/ma13163475
13. Li Y. Effect of Saccharin on the Process and Properties of Nickel Electrodeposition from Sulfate Electrolyte / Y. Li, J. Yao, X. Huang // *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*. – 2016. – Volume 2. – P. 123. <http://dx.doi.org/10.15344/2455-2372/2016/123>
14. Kolonits T. Effect of bath additives on the microstructure, lattice defect density and hardness of electrodeposited nanocrystalline Ni films / T. Kolonits, P. Jenei, L. Péter, I. Bakonyi, Z. Czigány, J. Gubicza // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Volume 349(15). – P. 611-621. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.06.052
15. Ganji D. K. Influence of Alloying Compositions on the Properties of Nickel-Based Superalloys: A Review / D. K. Ganji, G. Rajyalakshmi // *Recent Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. / Eds. In H. Kumar & P. Jain – (Singapore): Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1071-7-44>
16. 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.