

УТИЛІЗАЦІЯ БРУХТУ НІКЕЛЮ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін¹, В.О. Березос¹, О.Г. Єрохін², О.О. Котенко², М.І. Медведєв³, М.Г. Ляшенко⁴

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: ewi:nasy@gmail.com

²ДП «НПЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України».

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

³Український державний університет науки і технологій.

49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2. E-mail: michael.medvedev4747@gmail.com

⁴ТОВ «ДЗСТ». 52035, с. Горянівське, Дніпропетровська обл., вул. Горянівська, 1. E-mail: mirdzst@i.ua

Проведено дослідно-промислові плавки низькосортного брухту нікелю з метою одержання зливоків нікелю маркою не нижче НП2, які в подальшому використовуються для одержання напівфабрикатів у вигляді тепло- і холоднодеформованих безшовних труб, в тому числі капілярних, тонкостінних та особливо тонкостінних, кругів, квадратів, шестигранників та ін. Показано, що під час електронно-променевої плавки відбулося значне видалення з брухту нікелю домішкових елементів і якість металу стала відповідати марці нікелю не нижче НП2. З метою подальшого вивчення якості одержаних зливоків проведено комплексні дослідницькі роботи з виготовлення напівфабрикатів у вигляді тягнутих м'яких прутків діаметром 40 мм та проволочи діаметром 3 мм. Визначено, що механічні властивості напівфабрикатів із нікелю, отриманого способом ЕПП, повністю відповідають вимогам стандартів. Показано, що ефективним способом одержання зливоків нікелю з вторинної сировини є електронно-променева плавка, оскільки дозволяє забезпечити високий рівень якості одержуваного матеріалу, а якість напівфабрикатів за хімічним складом, структурою і механічними властивостями повністю відповідає вимогам стандартів. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променева плавка, електронно-променева установка, нікель, плавка, зливок, брухт, рафінування

Вступ. Нікель відноситься до групи важких кольорових металів, використовується як у виробництві легованих сталей, так і у виготовленні високотехнологічних розробок у сфері літакобудування, медицини та електроніки [1]. Широке використання нікелю в різних галузях промисловості обумовлене його унікальними властивостями. Так, додавання нікелю у сплави підвищує їх міцність, зносостійкість, корозійну стійкість, тепло- і електропровідність, покращує магнітні та каталітичні властивості.

В Україні розвідані запаси родовищ нікелевих руд невеликі або виснажені, нові родовища недостатньо вивчені, але потреба в таких видах сировини зумовлена зростанням попиту і розвитком промисловості [2]. Тому виробництво нікелю в Україні через невеликі ресурси власної сировини має обмежений розвиток і значною мірою залежить від кон'юнктури цін на світовому ринку.

Сьогодні питома вага вторинної сировини під час виробництва кольорових металів постійно зростає. Аналіз тенденцій виробництва та споживання продукції з нікелю та сплавів на його основі показує, що українські підприємства, які працюють у цьому сегменті ринку, все частіше використовують як вихідну сировину металевий брухт.

У перспективі вторинна сировина має стати основним джерелом отримання багатьох кольорових металів, зокрема нікелю, а її ефективна переробка покриватиме дефіцит балансу між споживанням та власним виробництвом. Залучення вторинної сировини в металургійний цикл виробництва має величезне економічне значення, оскільки дозволяє раціонально витрачати природні ресурси, які не відновлюються, знизити техногенне навантаження на навколишнє середовище, отримувати метал більш простими та дешевими способами.

Тому в умовах непередбачуваних змін на світових ринках металургійної продукції перед виробниками елементів конструкцій з нікелю і сплавів на його основі гостро постає питання підвищення ефективності виробництва та забезпечення випуску конкурентної продукції високої якості. Подальше підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції з нікелю і сплавів на його основі за рахунок суттєвого зниження матеріальних та енергетичних витрат на її виробництво є комплексним завданням, актуальність вирішення якого для України визначається як необхідністю утилізації низькосортного вітчизняного металобрухту з нікелю, так і прагненням виробляти кінцеву про-

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>,
О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>, О.О. Котенко — <https://orcid.org/0000-0002-0930-9536>,
М.І. Медведєв — <https://orcid.org/0000-0002-1230-420X>

дукцію, що відповідає світовим вимогам. Адже у теперішній час на світових ринках висуваються жорсткі вимоги до якості продукції, виготовленої з вторинної сировини. Тому одним із основних етапів забезпечення якості кінцевих виробів є отримання якісного зливка як вихідної заготовки для подальшої переробки. При цьому для забезпечення необхідного рівня якості зливка слід детальніше вивчити вплив як властивостей вторинної сировини, так і технологічних параметрів ведення процесу. Від раціональної організації цього процесу багато в чому залежить як вихід придатного, так і якість одержуваного металу. Підвищення якості і зниження вартості зливка можливе за рахунок детального вивчення процесів кристалізації та формування дефектів ливарного походження. При цьому важливу роль відіграють процеси рафінування вторинного нікелю при електронно-променевій плавці (ЕПП), які нині вивчені недостатньо. Це особливо актуально при виробництві зливків нікелю з низькоякісного брухту, кількість домішок у якому може сягати високих значень.

Тому перспективним напрямом розвитку підприємств, що у своєму виробництві використовують нікель, є створення і впровадження високо-ефективних технологій виробництва очищеного нікелю на базі вторинної сировини.

Перспективним напрямком у сучасній металургії є застосування електронно-променевих джерел нагріву для плавки, рафінування, обробки поверхні та інших технологічних процесів [3].

Дослідження процесів рафінування нікелю від шкідливих домішок способом електронно-променевої плавки були розглянуті в роботах [4–7].

За допомогою ЕПП отримують високочисті зливки тугоплавких і високореакційних металів і сплавів. За своєю якістю зливки після ЕПП перевершують вихідний матеріал. При ЕПП нікелю відбувається ефективне видалення газів та інших домішок. Високий вакуум, краплинне перенесен-



Рис. 1. Низькосортний брухт нікелю

ня та перегрів поверхні металевої ванни при електронно-променевій плавці створюють сприятливі умови для практично повного видалення таких домішок, як As, Zn, Se, Cl, Fe, P, Mg та ін. [4].

Зливки електронно-променевого нікелю мають високу пластичність і легко деформуються при кімнатних температурах [7].

З метою вакуумного рафінування ЕПП здійснюється в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі з використанням проміжної ємності шляхом горизонтальної подачі матеріалу, що переплавляється. При цьому шихтові матеріали можуть бути у вигляді зливків, шматкової шихти, стрижнів та різних відходів, наприклад пресованої стружки [3].

Методика досліджень. На виробничих потужностях ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» спільно з ТОВ «ДЗСТ» були проведені дослідно-промислові плавки низькосортного брухту нікелю з метою одержання зливків нікелю маркою не нижче НП2 (вміст нікелю не нижче 99,5 мас. %), які в подальшому використовуються для одержання напівфабрикатів у вигляді тепло- та холоднодеформованих безшовних труб (капілярних, тонкостінних та особливо тонкостінних), кругів, квадратів, шестигранників та ін.

У якості шихтової заготовки було використано низькосортний брухт з середнім вмістом нікелю 98 мас. % (рис. 1), який піддавали двократному ЕПП на електронно-променевій установці УЕ-208М [8].

Технологія отримання зливків в електронно-променевій установці включала: формування заготовки, що витрачається; підготовку обладнання і технологічного оснащення до плавки; процес плавки; контроль якості виплавленого зливка.

Низькосортний брухт нікелю був очищений від різного походження забруднень поверхні, компактно зашихтований в невитратний короб та завантажений в електронно-променеву установку УЕ-208М (рис. 2).

За технологією ЕПП з проміжною ємністю і порційною подачею рідкого металу в водоохолоджуваний кристалізатор (рис. 3) отримували зливки діаметром 150 мм (рис. 4).

В процесі плавки контролювали наступні технологічні параметри: прискорюючу напругу електронно-променевих гармат, струми променів, швидкість подачі вихідної шихти в зону плавки, швидкість витягування зливка із кристалізатора, температуру охолоджуючої води.

Чисельні значення технологічних параметрів плавки, що використовувалися при переплаві брухту нікелю наступні:



Рис. 2. Шихтова заготовка з низькосортного брухту нікелю

швидкість плавки, кг/год 50
висота порцій, що одночасно заливаються
в кристалізатор, мм 10
потужність, кВт:
в кристалізаторі 25
в проміжній ємності 100

В кінці плавки проводили виведення усадки шляхом поступового зниження потужності обігріву верхнього торця зливка в кристалізаторі.

Бічна поверхня виплавлених зливків після охолодження в вакуумі до температури нижче 200 °С чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисленого або альфованого шару відсутня (рис. 4). Глибина поверхневих дефектів типу гофр становить 1...3 мм, дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлень відсутні.

Для оцінки глибини рафінування низькоякісного брухту нікелю під час ЕПП проводили дослідження металу одержаних зливків. Визначення хімічного



Рис. 3. Процес електронно-променевого переплаву нікелю



Рис. 4. Зливков діаметром 150 мм з нікелю електронно-променевого переплаву

складу зразків, відібраних за їх довжиною з верхньої, середньої та нижньої частин проводили методом оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES) на ICP-спектрометрі ICAP 6500 DUO. Результати аналізу металу отриманих зливків показали, що під час ЕПП відбулося значне видалення з брухту нікелю домішкових еле-

Таблиця 1. Вміст елементів в зливку діаметром 150 мм з нікелю ЕПП, мас. %

Не більше									
Метал	As	Bi	C	Cd	Cu	Fe	Mg	Mn	P
Після двократного ЕПП	0,0001	0,0001	0,015	0,0001	0,01	0,04	0,0012	0,0023	0,0001
Норма з ДСТУ ГОСТ 492:2007	0,002	0,002	0,1	0,002	0,1	0,1	0,1	0,05	0,002

Закінчення табл. 1

Не більше								Не менше
Метал	Pb	S	Sb	Si	Sn	Zn	Co	Ni+Co
Після двократного ЕПП	0,0001	0,0043	0,0003	0,006	0,0016	0,0001	0,021	99,90
Норма з ДСТУ ГОСТ 492:2007	0,002	0,005	0,002	0,15	0,002	0,007	0,2	99,5



Рис. 5. Напівфабрикати з нікелю марки НП2, одержаного способом ЕПП: а — проволочка діаметром 3 мм; б — тягнуті м’які прутки діаметром 40 мм

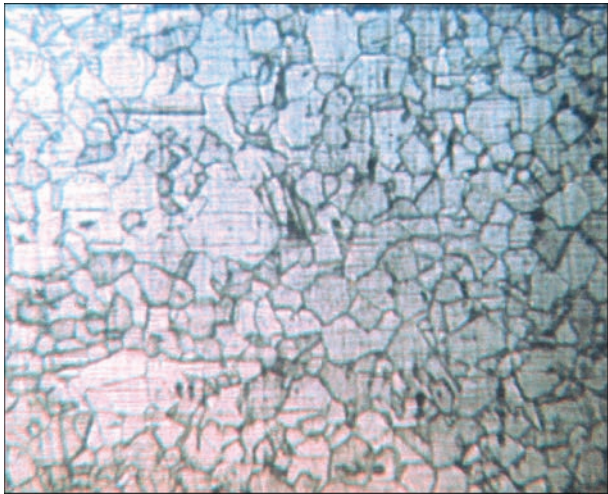


Рис. 6. Макроструктура прутка діаметром 40 мм з нікелю марки НП2, одержаного способом ЕПП

ментів (табл. 1), при цьому якість металу стала відповідати марці нікелю не нижче НП2.

З метою подальшого вивчення якості одержаних зливків проведено комплексні дослідницькі роботи з виготовлення напівфабрикатів на ТОВ «ДЗСТ». Зі зливків нікелю діаметром 150 мм, одержаних способом ЕПП, були виготовлені тягнуті м’які прутки діаметром 40 мм та проволочка діаметром 3 мм (рис. 5).

Отримані прутки були піддані термічній обробці (ТО) за наступним режимом: нагрівання до температури 800 °С у вакуумному середовищі; витримка 0,5 год; охолодження з піччю. Після ТО

Таблиця 2. Механічні характеристики тягнутих м’яких прутків діаметром 40 мм

Марка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ_{10} , %	δ_5 , %
Нікель НП2 ЕПП	375...390	28...32	37...40
ГОСТ 13083–77	>370	>26	>30

прутки були механічно оброблені до необхідних розмірів. З отриманих прутків відібрані проби для дослідження макроструктури. У макроструктурі металу отриманих прутків тріщин, розшарування, порожнин, металевих і неметалевих включень не виявлено. Величина макрозерна відповідає 3–4 балу згідно з ГОСТ 26492–85.

Механічні властивості металу прутків визначали при температурі 20 °С після проведеної термічної обробки. У табл. 2 наведено механічні властивості тягнутих м’яких прутків діаметром 40 мм. Як видно із таблиці, значення механічних характеристик одержаних зразків повністю відповідають вимогам ГОСТ 13083–77 [9], що свідчить про високу якість одержуваного металу за розробленою технологією. Ці дані дозволяють зробити висновок, що механічні властивості напівфабрикатів із нікелю, отриманого способом ЕПП, повністю відповідають вимогам стандартів.

Висновки

Таким чином, за результатами проведеної роботи було показано, що ефективним способом одержан-

ня зливків нікелю з вторинної сировини є електронно-променева плавка, оскільки вона дозволяє забезпечити високий рівень якості одержуваного матеріалу, а якість напівфабрикатів за хімічним складом, структурою та механічними властивостями повністю відповідає вимогам стандартів.

Список літератури

1. Грицай В.П., Бредихін В.М., Червоний І.Ф. та ін. (2010) *Металургія кольорових металів. Підручник. Ч. 5. Металургія кольорових металів. Книга 2. Технологія міді та нікелю.* Червоний І.Ф. (ред.). Запоріжжя, ЗДІА.
2. Пожуєв В.І., Івашченко В.І., Червоний І.Ф., Грицай В.П. (2007) *Металургія кольорових металів. Підручник. 4.1.* Червоний І.Ф. (ред.). Ч. І. Запоріжжя, ЗДІА.
3. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Електронно-лучевая плавка титана.* Киев, Наукова думка.
4. Дмитренко А.Е., Кожевников О.Е., Пелых В.Н. (2003) Применение метода электронно-лучевой плавки для рафинирования никеля. *Вопросы атомной науки и техники*, **5**, 162–166.
5. Ажажа В.М., Зейдлиц М.П., Шевченко С.В., Амоненко В.М. (1973) Влияние химически активных элементов на свойства никеля электронно-лучевой плавки. *Известия АН СССР. Металлы*, **4**, 157–159.
6. Тригуб Н.П., Березос В.А., Корнийчук В.Д., Мосунов Ю.А. (2011) Получение высококачественных слитков-слябов никеля способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, **2**, 16–18.
7. Мовчан Б.А., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А. (1973) *Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов.* Киев, Наукова думка.

8. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Современная электрометаллургия*, **3**, 15–22.
9. ГОСТ 13083–77: *Прутки из никеля и кремнистого никеля.* Технические условия.

References

1. Grytsai, V.P., Bredykhin, V.M., Chervonyi, I.F. et al. (2010) *Metallurgy of nonferrous metals: Manual. Pt 5. Book 2, Technology of copper and nickel.* Ed. by I.F. Chervonyi. Zaporizhziya, ZDIA [in Ukrainian].
2. Pozhuev, V.I., Ivashchenko, V.I., Chervonyi, I.F., Grytsai, V.P. (2007) *Metallurgy of nonferrous metals: Manual. Pt 1.* Ed. by I.F. Chervonyi. Zaporizhziya, ZDIA [in Ukrainian].
3. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium.* Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Dmitrenko, A.E., Kozhevnikov, O.E., Pelykh, V.N. (2003) Application of method of electron beam melting for refining of nickel. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, **5**, 162–166 [in Russian].
5. Azhazha, V.M., Zejdlics, M.P., Shevchenko, S.V., Amonenko, V.M. (1973) Influence of chemically active elements on properties of nickel of electron beam melting. *Izv. AN SSSR. Metall*, **4**, 157–159 [in Russian].
6. Trigub, N.P., Berezos, V.A., Kornijchuk, V.D., Mosunov, Yu.A. (2011) Producing of high-quality nickel ingots-slabs by electron beam melting. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 78–81.
7. Movchan, B.A., Tikhonovsky, A.L., Kurapov, Yu.A. (1973) *Electron beam melting and refining of metals and alloys.* Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
8. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Sovrem. Elektrometal.*, **3**, 15–22 [in Russian].
9. GOST 13083–77: *Rods from nickel and silicon nickel. Specifications.*

NICKEL SCRAP RECYCLING BY ELECTRON BEAM MELTING METHOD

S.V. Akhonin¹, V.O. Berezos¹, O.G. Erokhin², O.O. Kotenko², M.I. Medvedev³, M.G. Lyashenko⁴

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: ewi:nasy@gmail.com

²SC «SPC «Titan» of the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine».

26 Raketna Str., 03028, Kyiv, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

³Ukrainian State University of Science and Technologies.

2 Lazaryan Str., 49010, Dnipro, Ukraine. E-mail: michael.medvedev4747@gmail.com

⁴«DZST» Ltd.

1 Horyanivska Str., Horyanivske Vil., 52035, Dnipropetrovsk Region, Ukraine. E-mail: mirdzst@i.ua

Experimental-industrial melting of low-grade nickel scrap was conducted to obtain nickel ingots of not lower than NP2 grade, which are further used to produce semi-finished products in the form of hot- and cold-formed seamless pipes, including capillary, thin-walled and particularly thick-walled, rings, squares, hexagons, etc. It is shown that during electron beam melting a significant removal of impurity elements from the nickel scrap occurred, and metal quality began to correspond to nickel grade not lower than NP2. In order to further study the produced ingot quality, comprehensive research work was performed on manufacturing semi-finished products in the form of elongated soft rods of 40 mm diameter and wire of 3 mm diameter. It was determined that mechanical properties of semi-finished products from EBM nickel fully meet the standard requirements. It is shown that electron beam melting is an efficient method of producing nickel ingots from secondary raw materials, as it allows ensuring a high level of the produced material quality, and the semi-finished product quality fully meets the standard requirements by chemical composition, structure and mechanical properties. 9 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: electron beam melting, electron beam unit, nickel, melting, ingot, scrap, refining

Надійшла до редакції 31.10.2023