

РЕЦИКЛІНГ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

Ю.В. Костецький, В.П. Петренко, Є.О. Педченко, Г.О. Полішко, В.А. Зайцев

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua

Розглянуто результати експериментів з рециклінгу нікелевих сплавів способом електрошлакового переплаву з використанням струмопровідного кристалізатора. Дослідження проведено на установці Р-951, де визначено раціональні режими переплаву електродів змінного перетину з відходів нікелевих сплавів. У результаті проведених досліджень підтверджено ефективність рециклінгу технологічних відходів нікелевого сплаву ЕП648 способом електрошлакового переплаву із застосуванням струмопровідного кристалізатора. Встановлено оптимальні режими переплаву витратних електродів змінного перетину, що забезпечують стабільність процесу за раціонального розподілу потужності між електродом і кристалізатором. Хімічний склад отриманих зливків відповідав нормативним вимогам до сплаву ЕП648, а виготовлені з них вироби успішно пройшли контроль якості. Розроблена одностадійна технологія рециклінгу дозволяє безпосередньо повертати відходи нікелевого сплаву у виробничий цикл та має високий практичний потенціал для застосування в промисловості. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення існуючих методів рециклінгу металевих відходів та розробки нових підходів до переробки нікелевих сплавів. Бібліогр. 23, табл. 6, рис. 7.

Ключові слова: рециклінг, нікелевий сплав, електрошлаковий перелав, двоконтурна технологія, струмопровідний кристалізатор, зливки

Вступ. Концепція циркулярної економіки стимулює металургійну промисловість до повторного та більш повного використання техногенних відходів із метою досягнення нульових відходів [1, 2]. Це підвищує конкурентоспроможність виробництва та сприяє екологічній сталості завдяки зниженню споживання первинної сировини. Переробка відходів легованої сталі та нікелевих сплавів в Європі є важливою складовою зеленої металургії, оскільки ефективне повернення легованого брухту в цикл виробництва суттєво скорочує енергетичні й ресурсні витрати [3, 4].

Серед конструкційних матеріалів сталь і нікелеві сплави мають значний потенціал для багаторазового перероблення та повторного використання [5]. Перелав легованого брухту зазвичай здійснюють у електродугових або індукційних печах [6, 7]. Під час плавки важливим завданням є мінімізація втрат цінних компонентів сплаву, що складно забезпечити в умовах електродугової плавки [8]. Індукційні печі забезпечують краще їх засвоєння і менші загальні втрати металу з окисленням [7, 9]. Водночас в умовах індукційної плавки немає можливості реалізувати рафінувальні можливості шлаків, а відтак ефективно рафінувати металевий розплав від небажаних домішок та неметалевих включень. Додатковою проблемою традиційних способів переробки легованих відходів є складність отримання якісних зливків з ви-

соким рівнем фізичної і хімічної однорідності, а також втрати металу від обрізування зливків та з ливниками.

Покращити якість литого металу можна шляхом застосування технології електрошлакового переплаву (ЕШП) [7, 10–12]. Процес ЕШП забезпечує ефективне очищення металу від великих неметалевих включень, гомогенізацію хімічного складу по всьому об'єму зливка, покращення мікро- та макроструктури металу, а також отримання щільних зливків без внутрішніх пор та усадкових порожнин. При цьому хімічний склад металу залишається практично незмінним. Технологію ЕШП широко використовують у промисловості для отримання якісних зливків відповідального призначення з високолегованих сталей та нікелевих сплавів [10].

Однак безпосередня інтеграція технології електрошлакового переплаву у традиційний ланцюжок рециклінгу відходів легованих сталей і сплавів супроводжується додатковими витратами, що обмежує доцільність його застосування. Для мінімізації виробничих витрат запропоновано одноступінчасті процеси переробки на базі електрошлакової технології, які передбачають використання невитратних електродів та тигельної електрошлакової плавки [13, 14]. У першому варіанті дрібний скрап засипають у проміжок між стінкою кристалізатора і невитратним електродом. За певних умов можливе використання

Ю.В. Костецький — <http://orcid.org/0000-0003-0742-0684>, В.П. Петренко — <http://orcid.org/0000-0003-2440-1901>,
Є.О. Педченко — <http://orcid.org/0000-0002-8824-4389>, Г.О. Полішко — <http://orcid.org/0000-0001-7543-280X>,
В.А. Зайцев — <http://orcid.org/0000-0003-2498-8191>

витратного електрода того самого хімічного складу, що й скрап. Проте такий процес має очевидні обмеження щодо розмірів фрагментів скрапу. Тигельна електрошлакова плавка забезпечує більшу гнучкість у вимогах до розмірів скрапу що переплавляється, однак накопичений у плавильному тиглі метал усе одно потрібно зливати у виливниці, що не дозволяє досягти якості зливка на рівні стандартного ЕШП.

Основним обмеженням для використання канонічної технології ЕШП у задачах рециклінгу є вимога застосування витратного електрода з незмінними геометричними параметрами уздовж його довжини [15]. Це пов'язано з необхідністю забезпечення стабільності процесу. Зазвичай для цього використовують спеціально виготовлені литі або деформовані електроди. Очевидно, що реалізація одностадійного процесу рециклінгу на основі класичного ЕШП є вкрай складною.

Розроблена в ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України двоконтурна схема електрошлакового переплаву (ЕШП ДС) із застосуванням струмопідвідного кристалізатора [16, 17] спрощує вимоги до геометрії електрода та розширює можливості процесу для вирішення завдань рециклінгу. У цій схемі, на відміну від канонічної, електричний струм подається одночасно двома контурами — витратним електродом–піддоном та струмопідвідним кристалізатором–піддоном (рис. 1). Відповідно шлакова ванна одночасно контактує з двома електродами: витратним, який переплавляють, та неплавким, який є частиною кристалізатора. Температурний режим периферії шлакової ванни визначається неплавким електродом, що дає змогу незалежно

регулювати тепловкладення в шлакову й металеву ванни, а також швидкість наплавлення зливка. Таке керування тепловим балансом практично неможливе у традиційному ЕШП. Технологія ЕШП ДС успішно застосовується для отримання зливоків зі складнолегованих марок сталей, нікелевих суперсплавів та титану [18].

Дослідження показали, що під час ЕШП із застосуванням струмопідвідного кристалізатора розподіл потужності між контурами живлення можливий у широкому діапазоні співвідношень [16]. Використання відповідної системи автоматичного керування процесом дає змогу здійснювати переплав електродів змінної геометрії зі стабільною швидкістю переплаву [19–21]. Це дозволяє спростити вимоги й підготовку витратних електродів до переплаву і реалізувати процес рециклінгу за одностайною схемою з отриманням високоякісного зливка безпосередньо електрошлаковим переплавом металовідходів.

У даній роботі представлені результати експериментальних досліджень з рециклінгу технологічних відходів нікелевого сплаву ЕП648 за одностадійною схемою із застосуванням технології ЕШП ДС з отриманням після переплаву зливка, придатного для безпосереднього використання у виробничому циклі.

Обладнання, матеріали та методика досліджень. Експериментальні дослідження з електрошлакового переплаву відходів нікелевого сплаву з отриманням зливоків круглого перерізу діаметром 180 мм проводили у лабораторії електрошлакових технологій Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на печі Р-951 із застосуванням струмопідвідного кристалізатора за схемою витяжки зливка вниз. Піч оснащена двома незалежними джерелами електроживлення потужністю по 720 кВА кожне (трансформатори ТШП-10000/1 (А-622)), модернізованими для плавного регулювання вихідної напруги. Встановлена на печі система автоматичного керування забезпечує ведення процесу електрошлакового переплаву в автоматичному режимі як із рідким, так і з твердим стартом.

Електрошлаковий переплав дослідного металу здійснювали у короткому струмопідвідному кристалізаторі з діаметром формуючої секції 180 мм (рис. 2, а). Кристалізатор мав секційну конструкцію (рис. 1): верхня секція виконує функцію струмопідвідного (невитратного) електрода, нижня — забезпечує якісне формування поверхні зливка, а розділювальна секція слугує ізолятором, що запобігає пробією між струмопідвідною та формуючою частинами.

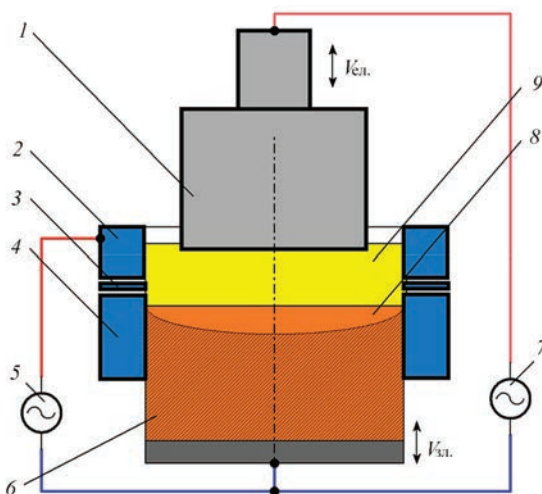


Рис. 1. Схематичне зображення ЕШП у струмопідвідному кристалізаторі за двоконтурною схемою живлення: 1 — витратний електрод; 2 — струмопідвідна секція кристалізатора; 3 — розділювальна секція кристалізатора; 4 — формуюча секція кристалізатора; 5, 7 — джерела живлення; 6 — зливков; 8 — металева ванна; 9 — шлакова ванна

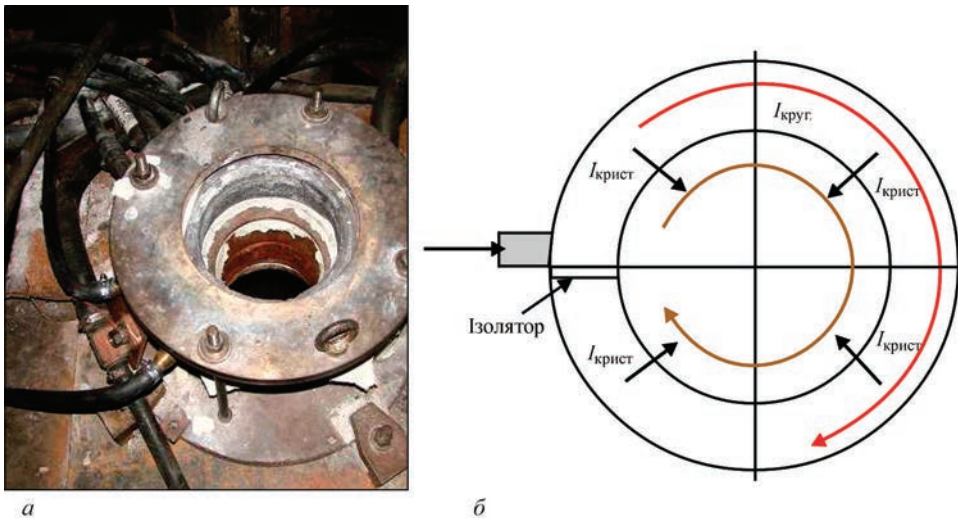


Рис. 2. Загальний вигляд кристалізатора (а) та схема розподілу електричного струму у струмоведучій секції і напрямку обертання шлакової ванни (б)

Конструктивною особливістю струмопідвідної секції є поперечний проріз, заповнений ізоляційним матеріалом, який перетворює її на незамкнене коло (рис. 2, б) [22]. Така конструкція при протіканні основного струму плавки від струмопідвідної секції до зливка зумовлює виникнення кругового електричного струму $I_{\text{круг}}$ у незамкненому кільці та відповідного магнітного поля, спрямованого вздовж вертикальної вісі кристалізатора (згідно з правилом правої руки). Струм $I_{\text{крис}}$, що протікає від струмопідвідної секції до рідкої металеві ванни, створює магнітне поле, орієнтоване перпендикулярно до поля кругового струму. Взаємодія електричного та магнітного полів зумовлює виникнення сили Ампера, яка спричиняє обертальний рух шлакової ванни. Це, у свою чергу, інтенсифікує теплообмін у ній.

Витратні електроди для електрошлакового переплаву формували з технологічних відходів нікелевого сплаву ЕП648 двох типів: циліндричної обрізі діаметром 70 мм та довжиною 160...210 мм, забракованої через усадкові дефекти, та кованих кілець діаметром 510 і 370 мм.

Нормативний хімічний склад сплаву ЕП648 представлено в табл. 1. Результати вибіркового входного контролю хімічного складу відходів представлено в табл. 2. Зразки відбирали з кожної партії входної шихти. Хімічний склад визначали методом спектрального аналізу.

Складені електроди для ЕШП формували шляхом зварювання окремих фрагментів відходів. Для цього застосовували зварювальний дріт з нікелевого сплаву ENiCrMo-3, хімічний склад якого наближений до складу сплаву, що переплавлявся. Витрату зварювального матеріалу обмежували до мінімуму, щоб зменшити вплив на хімічний склад металу та водночас забезпечити достатню міцність з'єднань з урахуванням умов переплаву.

Оскільки конструкція складених електродів не забезпечує пропускання значного струму, переплав здійснювали за схемою з квазіпасивним електродом. У цій схемі основна частина потужності підводиться через контур струмопідвідного кристалізатора.

Розрахункову продуктивність процесу $Q_{\text{пер}}$ визначали за емпіричним співвідношенням [23], кг/год:

Таблиця 1. Нормативний хімічний склад нікелевого сплаву ЕП648 за ТУ 14-1-4103-86, %

Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	W
0,5...1,1	0,5...1,1	32...35	≤4	Основа	0,5...1,1	2,3...3,3	4,3...5,3

Таблиця 2. Результати вибіркового входного контролю хімічного складу відходів сплаву ЕП648, %

Проба	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	W
1	0,61	1,14	35,37	0,75	53,53	1,21	2,37	5,02
2	0,96	1,22	36,46	->-	51,82	0,83	2,26	5,7
3	0,76	0,97	34,23	0,76	55,02	1,19	2,94	4,13
Середнє	0,78	1,11	35,35	0,75	53,46	1,08	2,52	4,95

Таблиця 3. Хімічний склад флюсу АНФ-29 за ТУ У 20.5-00186520-126-2018, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaF ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
10...15	13...17	37...45	24...30	2...6	<0,5

$$Q_{\text{пер}} = kD_{\text{кр}}^2$$

де $D_{\text{кр}}$ — діаметр кристалізатора, мм; k — емпіричний коефіцієнт, кг/(мм·год).

Згідно з промисловим досвідом під час переплаву сталей значення коефіцієнта k обирають у діапазоні 0,4...0,8. Більші значення характерні для низьколегованих сталей, менші — для високолегованих. У випадку нікелевих сплавів, які відрізняються меншою теплоємністю порівняно зі сталями та ширшим інтервалом ліквідус–солідус, процес переплаву слід здійснювати з мінімально можливою продуктивністю. Тож доцільно орієнтуватися на $k = 0,4$. Відповідно, для кристалізатора з формуючою секцією діаметром 180 мм рекомендована продуктивність становить близько 72 кг/год.

Типові шлаки для ЕШП нікелевих сплавів формують на основі системи CaF₂–CaO–Al₂O₃ з можливим введенням додаткових оксидів, зокрема SiO₂, MgO і TiO₂, залежно від складу сплаву. Оксид титану додають для контролю співвідношення Al/Ti у металі та компенсації можливих втрат Ti. Оксиди кремнію та магнію вводять для регулювання фізико-хімічних властивостей шлаку, зокрема температури плавлення та в'язкості. При цьому кремнезем суттєво впливає на окиснювальний потенціал

шлаку, а отже, і на ступінь окиснення алюмінію та титану в металі під час переплаву. Тому його концентрацію необхідно суворо контролювати в межах технологічного процесу. Негативний вплив SiO₂ зменшують шляхом зниження його активності за рахунок підвищення основності шлаку.

У цьому дослідженні переплав виконували під флюсом, що складався з АНФ-29 (табл. 3) із додаванням чистого CaF₂ у співвідношенні 10:1.

Для забезпечення стабільності хімічного складу нікелевого сплаву шлак попередніх плавок використовували на наступних. Вважалось, що хімічний склад шлаку в ході переплаву змінюється в напрямку рівноважного складу. Шлак на другу плавку брали з першої. Для компенсації втрат шлаку на утворення гарнісажу до нього додавали чистий CaF₂ в кількості 500 г. Шлак третьої плавки формували зі шлаку другої плавки з додаванням 400 г фториду кальцію.

Під час переплаву для зменшення окисного впливу атмосферного повітря крізь кільцевий розподільник у плавильний простір подавали аргон із витратою 15 л/хв. Протягом усього процесу шлакову ванну постійно розкислювали введенням присадок металевого алюмінію у вигляді крупки зі середньою витратою 3 г/хв.

Результати досліджень та їх обговорення. Під час першого експерименту (плавка 1) було здійснено переплав одного витратного електрода, сформованого з циліндричних обрізків нікелевого сплаву (рис. 3, а). Циліндричні фрагменти з'єднали зварюванням із використанням зварювальних електродів діаметром 4 мм у кількості 7 шт. (0,5 % від маси нікелевого сплаву 97 кг).

Плавку розпочали рідким стартом. Загальна витрата шлаку становила 6 кг. Потужність, підведена до витратного електрода, підтримували в межах 40...50 кВА, тоді як до струмопідвідної секції кристалізатора подавали 150 кВА. Таким чином, основна частка енергії вносилася через контур кристалізатора, що забезпечувало стабільність процесу. У результаті переплаву отримано циліндричний зливочок довжиною 490 мм (рис. 4, б). Середня продуктивність процесу склала 80 кг/год.

З головної частини отриманого зливка було відібрано зразок для визначення хімічного складу. Результати хімічного аналізу показали, що склад металу зливка відповідає нормативному складу сплаву ЕП648 (табл. 4). Абсолютна відсоткова втрата високоактивних елементів Al та Ti склала 0,11 і 0,15 % відповідно.

Дослідний зливочок було передано на виробництво, де з нього шляхом кування виготовили кільця двох типорозмірів (рис. 4). Виготовлені кільця



Рис. 3. Процес електрошлакового переплаву витратного електрода (а) та зовнішній вигляд отриманого зливка (б)

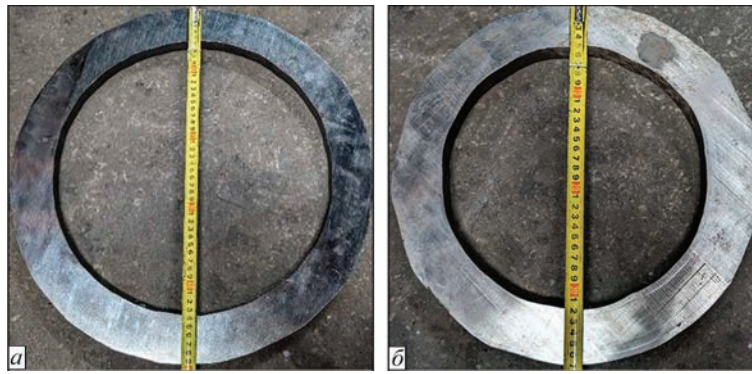


Рис. 4. Відковані кільця зі зливка ЕШП діаметром 510 (а) і 370 мм (б)

Таблиця 4. Хімічний склад металу зливка ЕШП першої плавки, мас. %

Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	W
0,67	0,96	33,66	0,58	52,87	1,04	2,30	4,96

піддали контролю відповідно до діючих виробничих протоколів металографічного та ультразвукового контролю. Було визначено, що якість металу, отриманого шляхом рециклінгу, відповідає вимогам для сплаву ЕП648-Ш згідно з ГОСТ 22838–77.

Залишки кілець, що проходили контроль якості та не були спрямовані у подальше виробництво загальною масою 27 кг, використали для повторного рециклінгу. Шляхом зварювання їх об'єднали у один витратний електрод для подальшого електрошлакового переплаву. Із залишку циліндричної обрізі було виготовлено чотири витратні електроди. Один з них мав спрощену конструкцію

у вигляді довгого циліндра, а решта електродів складалась з циліндричних фрагментів, зібраних пакетом по три на кожному рівні. Загальний вигляд дослідних електродів, підготовлених до переплаву, наведено на рис. 5, а.

На другому етапі досліджень було здійснено дві плавки (2 і 3) за результатами яких отримали зливки довжиною 1,1 та 1,25 м відповідно (рис. 5, в).

Під час плавки 2 було послідовно переплавлено три електроди різної конструкції, зовнішній вигляд яких показано на рис. 5, а. Електрод 1 складався з фрагментів циліндричної обрізі, послідовно з'єднаних зварюванням у циліндричний



Рис. 5. Загальний вигляд електродів, підготовлених до плавки 2 (а); процес електрошлакового переплаву електрода, сформованого із залишків кілець (б); зливки, отримані після переплаву дослідних електродів, довжиною 1100 мм (плавка 2) та 1250 мм (плавка 3) (в)

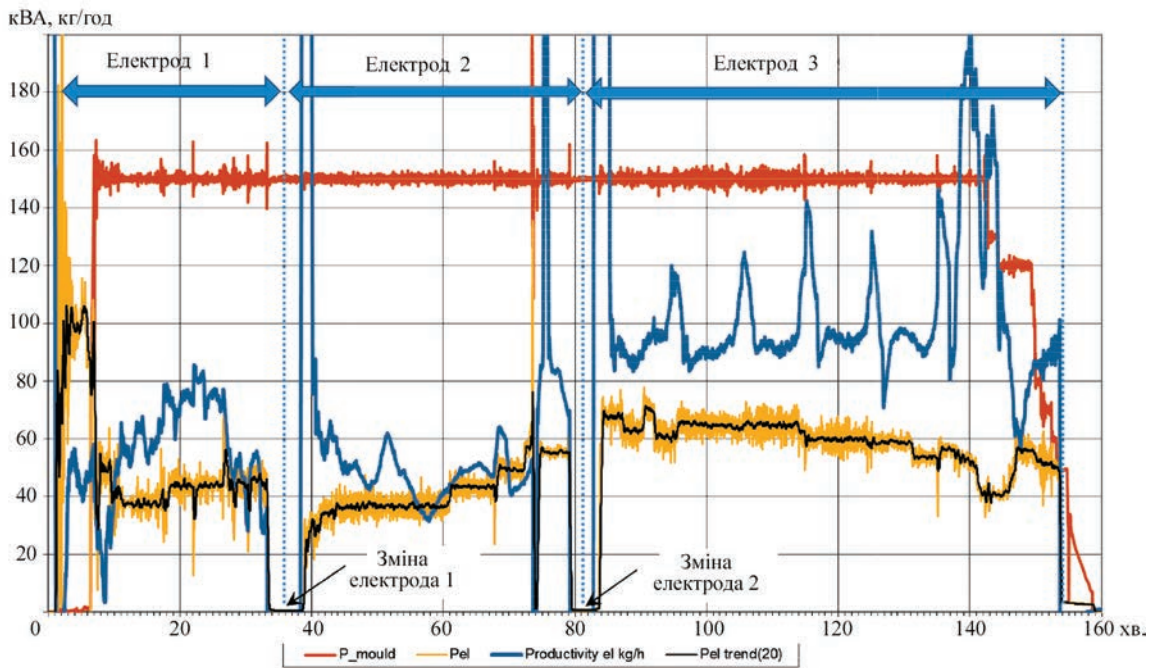


Рис. 6. Графік параметрів перебігу плавки 2: P_mould — потужність, підведена до струмопідвідної секції кристалізатора; Pel — потужність, підведена до електрода; Productivity el kg/h — продуктивність по електроду в кг/год; Pel trend(20) — тренд потужності електрода з лінійною фільтрацією по 20 значенням

електрод. Електрод 2 був зібраний з фрагментів кованих кілець. А електрод 3 сформували з циліндричної обрізі, згрупованої по три фрагменти на кожному рівні, щоб збільшити коефіцієнт заповнення кристалізатора. Різноманітність конструкцій витратних електродів у межах цієї плавки дала змогу оцінити особливості їх переплаву та визначити оптимальні підходи до формування електродів із відходів нікелевого сплаву.

На рис. 5, б представлено процес електрошлакового переплаву електрода 2, сформованого з фрагментів кованих кілець. Така конструкція електрода дала змогу перевірити ефективність залучення у рециклінг відходів складної форми та оцінити можливість їх переплаву без втрати якості металу.

На рис. 6 наведено графіки зміни параметрів, що ілюструють особливості перебігу плавки. Зокре-

ма, добре простежується зміна режимів переплаву залежно від етапу плавки та конструкції електрода (табл. 5). Завдяки збільшенню коефіцієнта заповнення під час переплаву електрода 3 вдалося досягти більшої продуктивності порівняно з електродом 1, також зібраним із циліндричної обрізі (табл. 5). При цьому на графіку чітко видно стрибки продуктивності, зумовлені переходами від однієї групи циліндричних фрагментів, з'єднаних зварюванням, до наступної, за відносної стабільності підведеної потужності. У процесі переплаву електрода 2 (рис. 5, б), сформованого з фрагментів кілець, також спостерігалися коливання продуктивності, проте без вираженої ритмічності, що пояснюється особливостями його конструкції. Водночас слід зазначити, що внаслідок теплової інерційності процесу та стабільності електричного режиму короточасні зміни продуктивності

Таблиця 5. Хронометраж зміни режимів під час дослідної плавки 2 (відповідно до рис. 6)

Проміжок часу, хв	Режим процесу
0...6	Стартовий режим. Електрична потужність прикладена до електрода
7...34	Переплав електрода 1. Двоконтурний режим. Розподіл потужності електрод/кристалізатор — приблизно 50/150 кВА. Продуктивність 70...80 кг/г
35...39	Зміна електрода
40...79	Переплав електрода 2. Двоконтурний режим. Розподіл потужності електрод/кристалізатор — приблизно 40...50/150 кВА. Продуктивність 50...70 кг/г
80...84	Зміна електрода
85...154	Переплав електрода 3. Двоконтурний режим. Співвідношенням потужності електрод/кристалізатор — приблизно 50...70/150 кВА. Продуктивність 100...110 кг/г

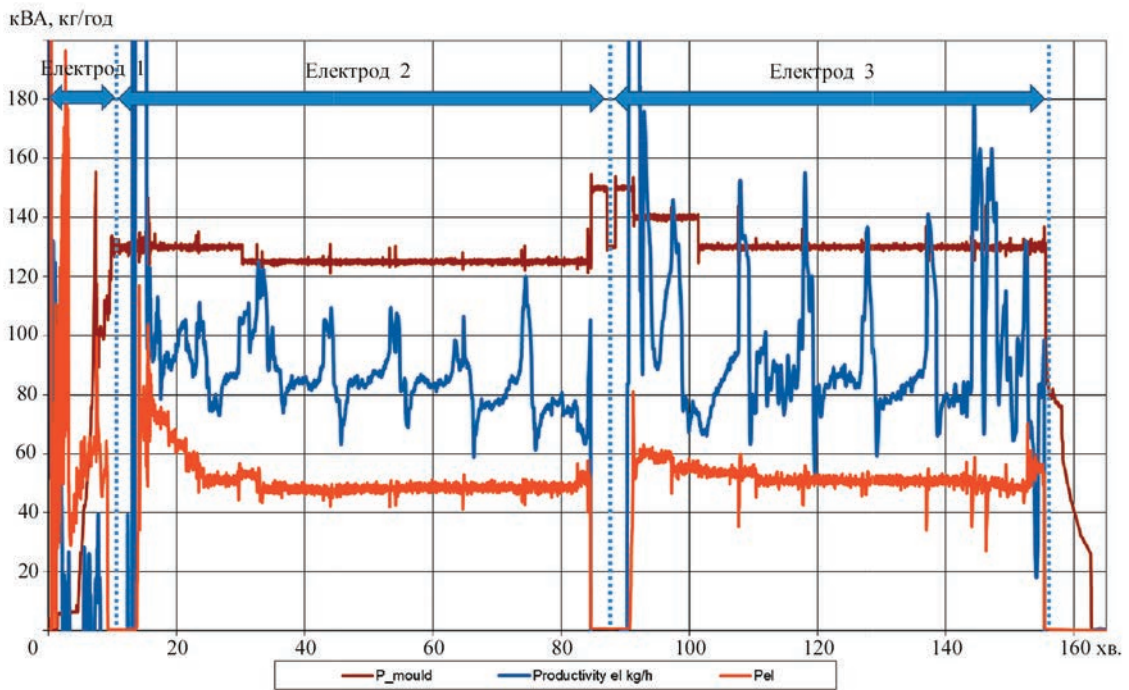


Рис. 7. Графік параметрів перебігу дослідної плавки 3: P_mould — потужність, підведена до струмопідвідної секції кристалізатора; Pel — потужність, підведена до електрода; Productivity el kg/h — продуктивність по електроду в кг/год

Таблиця 6. Хімічний склад металу дослідних зливків, мас. %

Зразок	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	W
1-1	0,65	1,01	33,5	0,47	основа	0,75	3,3	4,9
1-2	0,62	1,08	34,05	0,41	→→	0,68	3,1	4,4
2-1	0,55	0,93	33,6	0,5	→→	0,58	3,0	4,6
2-2	0,52	1,09	34,7	0,45	→→	0,66	3,3	4,7

ті не вплинули на якість зливка. Це підтверджується виглядом поверхні дослідних зливків (рис. 5, в).

Отже, конструкція електрода безпосередньо впливає на стабільність процесу та рівень продуктивності електрошлакового переплаву. Водночас використання технології ЕШП ДС із струмопідвідним кристалізатором дозволяє значною мірою компенсувати дестабілізуючий вплив як непередбачених змін коефіцієнта заповнення в процесі переплаву, так і неоднорідностей електрода, забезпечуючи рівномірний і контрольований перебіг процесу.

Під час дослідної плавки 3 послідовно переплавили два електрода, конструкція яких повторювала третій електрод з другої плавки (рис. 5, а). Режими переплаву визначали на основі результатів попередньої плавки. Плавку починали сухим стартом із застосуванням графітового електрода для формування ванни рідкого шлаку в кристалізаторі, після чого увімкнули контур струмопідвідного кристалізатора і замінили графітовий електрод на витратний. Далі плавку проводили з підтриманням стабільного електричного режиму (рис. 7). Аналіз

графіка продуктивності показав чітку кореляцію зі структурою складеного електрода: короткочасні стрибки продуктивності виникали у моменти переходу між окремими зварними фрагментами.

З головної та донної частин отриманих зливків відібрано зразки для визначення їх хімічного складу методом рентгено-спектрального аналізу. Результати представлені в табл. 6: зразки 1-1 і 2-1 відповідають донній частині зливків, а 1-2 і 2-2 — головній.

Аналіз хімічного складу металу отриманих дослідних зливків (табл. 3) підтвердив повну відповідність вимогам до нікелевого сплаву ЕП648 згідно з ТУ 14-1-4103-86 (табл. 1). Дослідні зливки було передано у виробництво, де з них способом кування виготовили кільця. Готові вироби пройшли контроль якості та були допущені до подальшого використання за призначенням.

Таким чином, розроблена і випробувана в ході дослідження одностадійна технологія рециклінгу технологічних відходів нікелевого сплаву ЕП648 на основі процесу ЕШП забезпечує отримання

зливка, придатного для безпосереднього використання у виробничому циклі.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість здійснення рециклінгу нікелевих сплавів за одностадійною схемою на основі технології ЕШП із застосуванням струмопровідного кристалізатора. Технологія ЕШП ДС із використанням струмопровідного кристалізатора дозволяє компенсувати дестабілізуючі фактори, пов'язані з неоднорідністю та змінною геометрією витратних електродів, а загальні енергетичні та технологічні характеристики процесу залишаються прийнятними для промислового застосування.

На установці ЕШП Р-951 детально досліджено особливості переплаву витратних електродів змінного перетину, сформованих із технологічних відходів нікелевого сплаву ЕП648 двох типів. Визначено раціональні параметри процесу, зокрема, оптимальний розподіл потужності між витратним електродом і струмопровідним кристалізатором на рівні 1/3, що забезпечує стабільність переплаву. Продуктивність переплаву у цих умовах становила близько 80 кг/год.

Аналіз хімічного складу металу отриманих зливок показав їх повну відповідність нормативним вимогам до сплаву ЕП648, що свідчить про ефективність розробленого підходу щодо збереження легувальних елементів навіть при використанні складених електродів. Визначено, що отримані шляхом рециклінгу зливки ЕШП придатні для безпосереднього використання у виробничому циклі.

Таким чином, випробувана технологія забезпечує повернення технологічних відходів нікелевого сплаву ЕП648 у виробничий цикл, що відкриває перспективи зниження собівартості продукції за рахунок більш раціонального використання дорогоцінних легуваних сплавів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу різних схем складання електродів на стабільність процесу та на розширення технології на інші марки нікелевих і високолегованих сплавів.

Список літератури/References

1. Branca, T., Colla, V., Algermissen, D. et al. (2020) Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. *Metals*, 10(345). DOI: <https://doi.org/10.3390/met10030345>
2. Domenech, T., Bahn-Walkowiak, B. (2019) Transition towards a resource efficient circular economy in Europe: Policy lessons from the EU and the member states. *Ecological Economics*, 155, 7–19. Elsevier, Amsterdam. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.001>
3. Xie, J., Xia, Z., Tian, X., Liu, Y. (2023) Nexus and synergy between the low-carbon economy and circular economy: A systematic and critical review. *Environmental Impact Assessment Review*, 100, 107077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107077>
4. Feng, H., Chen, L., Liu, X., Xie, Z. (2017) Construction design for an iron and steel production process based on the objectives of steel yield and useful energy. *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*, 111, 1192–1205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.096>
5. Watari, T., McLellan, B. (2024) Decarbonizing the global steel industry in a resource-constrained future — A systems perspective. *Philosophical Transact. of the Royal Society A*, 382(2284), 20230233. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0233>
6. Diener, D.L., Tillman, A.M. (2016) Scrapping steel components for recycling — Isn't that good enough? Seeking improvements in automotive component end-of-life. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 48–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.001>
7. Wu, L., Liu, K., Mei, H. et al. (2022) Thermodynamics analysis and pilot study of reusing medium and high alloy steel scrap using induction melting and electroslag remelting process. *Metals*, 12(6), 944. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12060944>
8. Varvara, D.A.I., Tintelecan, M., Aciu, C. et al. (2019) An assessment of the substance losses from charge composition used to the steelmaking — Key factor for sustainable steel manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 32, 15–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.177>
9. Gandhewar, V.R., Bansod, S.V., Borade, A.B. (2011) Induction furnace — A review. *Inter. J. of Eng. and Techn.*, 3(4), 277–284.
10. Arh, B., Podgornik, B., Burja, J. (2016) Electroslag remelting: a process overview. *Materials and Technology*, 50(6), 971–978. DOI: <https://doi.org/10.17222/mit.2016.108>
11. Mitchell, A. (2008) Electroslag technology for aerospace alloys. *Advances in Electrometallurgy*, 4, 31–36 [in Russian].
12. Walek, J., Odehnalová, A., Kocich, R. (2024) Analysis of thermophysical properties of electroslag remelting and evaluation of metallographic cleanliness of steel. *Materials*, 17(18), 4613. DOI 10.3390/ma17184613
13. Biktagirow, F.K., Veretilnyk, O.V., Shapovalov, V.O. et al. (2021) Comparative indices of different methods of processing shavings of high-alloyed steels and alloys. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 4, 11–15 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.01>
14. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentyugov, I.P. (2020) *Electroslag technologies of surfacing and recycling of metal and metal-containing waste*. Kyiv, Interservice.
15. Mitchell, A. (2021) Electrode manufacture for the remelting processes. *Ironmaking & Steelmaking*, 48(5), 505–513, DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1855690>
16. Tsykulenko, A.K., Lantsmann, I.A., Medovar, L.B. et al. (2000) Two-circuit method of electroslag remelting consumable electrodes. *Advances in Special Electrometallurgy*, 3, 141–144.
17. Dong, Y., Jiang, Z., Cao, H. et al. (2016) Study of single-power, two-circuit ESR process with current-carrying mold. Development of the technique and its physical simulation. *Metallurgical and Materials Transact. B*, 47(6), 3575–3581. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0813-8>
18. Medovar, L., Stovpchenko, G., Jianjun, G. (2024) State of the art of electroslag refining and challenges in the control of ingot cleanness. In: *Proc. of 12th Inter. Conf. on Molten*

- Slags, Fluxes and Salts MOLTEN 2024*. Brisbane, AusIMM, ID: P-04120-D5P7M3.
19. Medovar, L., Fedorovsky, B., Petrenko, V. (2005) ESR with two power sources and process control. In: *Proc. of Inter. Symp. on Liquid Metal Processing and Casting, Santa-Fe, New Mexico*, 131–135.
 20. Pedchenko, Ye., Medovar, L., Kostetsky, Yu. (2022) Electroslag remelting as a method of recycling non-compact high-speed steel tools. In: *Proc. of 31st Inter. Conf. on Metallurgy and Materials*. Brno, TANGER Ltd, 142–148. DOI: <https://doi.org/10.37904/METAL.2022.4455>
 21. Pedchenko, Ye.O., Petrenko, V.L., Kostetskyi, Yu.V. et al. (2025) Electroslag remelting of variable cross-section electrodes using a two-circuit scheme. In: *Proc. of the VII Inter. Conf. on Welding and Related Technologies WRT 2024*. Yaremche, CRC Press, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518-5>
 22. Kuskov, Yu.M., Solovyov, V.G. (2018) Experimental study of slag and metal bath rotation during electroslag process in current-feeding mould. *Avtomaticheskaya Svarka*, 7, 41–43 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.07.07>
 23. Reitz J., Wietbrock B., Richter S. et al. (2011) Enhanced homogenization strategy by electroslag remelting of high-manganese TRIP and TWIP steels. *Advanced Eng. Materials*, 13(5), 395–399. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201000322>

RECYCLING OF NICKEL ALLOYS BY ELECTROSLAG REMELTING

Yu.V. Kostetskyi, V.P. Petrenko, E.O. Pedchenko, G.O. Polishko, V.A. Zaitsev
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua

The paper presents the results of experiments on recycling of nickel alloys through electroslag remelting (ESR) using a current supplying mould. The research was conducted in the P-951 furnace, where rational modes of remelting electrodes of a variable cross-section from nickel alloy waste were determined. The study confirmed the effectiveness of recycling technological waste of EP648 nickel alloy by electroslag remelting using a current-supplying mould. Optimal modes of remelting variable cross-section consumable electrodes were established to ensure process stability through rational power distribution between the electrode and the current-supplying mould. The chemical composition of the produced ingots met the regulatory requirements for the EP648 alloy, and the products made from these ingots successfully passed quality control. The developed single-stage recycling technology allows nickel alloy waste to be returned directly to the production cycle, demonstrating high practical potential for industrial application. The research results can be used to improve the existing metal waste recycling methods and to develop new approaches to processing nickel alloys waste. 23 Ref., 6 Tabl., 7 Fig.

Keywords: recycling, nickel alloy, electroslag remelting, dual-circuit ESR technology, current-supplying mould, ingot

Отримано 15.09.2025

Отримано у переглянутому вигляді 14.10.2025

Прийнято 12.11.2025

НОВА КНИГА



Ахонін С.В., Березос В.О., Брехін О.Г. Отримання високоміцних титанових сплавів методом електронно-променевої плавки. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2025. — 128 с.

У монографії розглянуто особливості виробництва зливків складнолегованих сплавів титану методом електронно-променевої плавки. Досліджено механізми та закономірності поведінки легуючих елементів під час отримання зливків складнолегованих високоміцних сплавів титану методом електронно-променевої плавки з використанням проміжної ємності. З урахуванням виявлених залежностей на прикладі титанового сплаву ВТ9 запропоновано оптимальні технологічні режими отримання зливків складнолегованих сплавів титану методом електронно-променевої плавки, які забезпечують високий рівень якісних і техніко-економічних показників. Наведено характеристики хімічного складу, стану поверхні, макро- та мікроструктури зливків промислових і нових вітчизняних складнолегованих сплавів титану. Розглянуто питання деформаційної обробки отриманих сплавів і наведено механічні характеристики напівфабрикатів зі зливків, отриманих методом електронно-променевої плавки.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей.

Бібліогр. 178, табл. 23, рис. 91.