

для навчання за напрямком металургія [3], який розвиває й фінансово підтримує World Steel Association. Окрім інтерактивного навчального контенту платформа містить моделі промислових процесів, що доступні в онлайн режимі.

Ще одним надважливим завданням є розвиток академічної мобільності студентів і викладачів через участь у міжнародних програмах обміну, стажуваннях і конференціях та сталі забезпечення відповідності рівня підготовки фахівців стандартам загальноєвропейського ринку праці [2].

Вирішення зазначених завдань забезпечить подолання кризи у металургійній освіті, підвищення якості освіти в галузі металургії та посилить конкурентоспроможність випускників вітчизняних ВНЗ на ринку праці.

Література

1. Гриценко О. Кадровий дефіцит загрожує майбутньому української металургії: причини та наслідки для економіки. URL: <https://krivbass.city/news/view/kadrovij-defitsit-zagrozhue-majbutnomu-ukrainskoi-metalurgii-prichini-ta-naslidki-dlya-ekonomiki> (дата звернення: 20.09.25).
2. Hayes P.C. The world needs metallurgical process engineers. *JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*. 2019. Vol. 71. № 2. P. 463-468. DOI: 10.1007/s11837-018-03316-4.
3. Steeluniversity – Learning Solutions for the steel industry. URL: <https://steeluniversity.org/> (дата звернення: 10.09.25).

Костецький Ю. В., Полішко Г. О., Педченко Є. О.,

Петренко В. Л., Зайцев В. А., Трикозенко Д. І.

(ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Київ)

РЕЦИКЛІНГ ВІДХОДІВ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ТА НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ ПЕРЕПЛАВОМ

E-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua

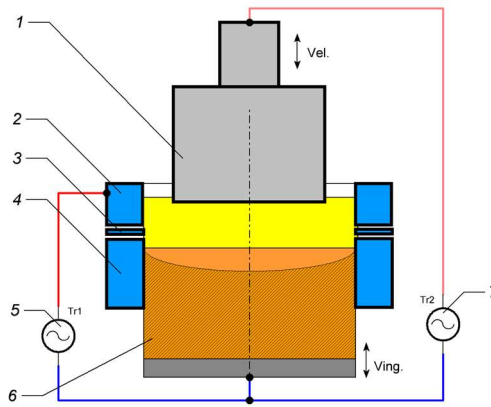
Концепція циркулярної економіки, що зароджується, спонукає металургійну промисловість до інновацій у сфері використання техногенних металевих відходів з метою досягнення амбітної мети «нульових відходів» та забезпечення конкурентоспроможності виробництва [1]. Переробка відходів легованої сталі в

Європі вважається невід'ємною складовою циркулярної економіки та «зеленої» металургії оскільки виробництво легованих сталей і сплавів споживає велику кількість енергії та мінеральних ресурсів на виготовлення феросплавів [2].

Сталь та нікелеві сплави мають значний потенціал для багаторазового перероблення й повернення у виробничий цикл [3]. Традиційний маршрут рециклінгу таких матеріалів зазвичай реалізується шляхом переплаву металобрухту в електродугових або індукційних печах [4]. При цьому важливим завданням є мінімізація втрат цінних компонентів сплаву. Проблемою також є складність отримання якісних зливків із високим рівнем фізичної і хімічної однорідності та втрати частини металу з усадковим обрізуванням й літниками.

Підвищити якість литого металу можна залученням електрошлакового переплаву (ЕШП) [4, 5], який широко застосовується для отримання зливків з високолегованих сталей і нікелевих сплавів відповідального призначення. Проте інтеграція ЕШП у ланцюг рециклінгу супроводжується додатковими витратами, що знижує його економічну доцільність. Основна перешкода полягає у необхідності використання витратного електрода зі сталими геометричними параметрами по всій довжині [6], що забезпечує стабільність процесу. Відповідно для здійснення електрошлакового переплаву зазвичай застосовують спеціально виготовлені литі або деформовані електроди. Отже, реалізація одностадійного рециклінгу на основі класичного процесу ЕШП є проблематичною.

Розроблена в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України двоконтурна схема ЕШП (ЕШП ДС) зі струмопідвідним кристалізатором [7] (рис. 1) дозволяє зменшити вимоги до геометрії витратного електрода. За такої схеми струм подається одночасно по двох контурах, що забезпечує незалежне регулювання температури та швидкості плавлення електрода, а також гнучкий розподіл тепловкладення між шлаковою й металевою ваннами. Технологія ЕШП ДС успішно використовується для виробництва зливків зі складнолегованих сталей, суперсплавів і титану [8].



1 – витратний електрод; 2 – струмопідвідна секція кристалізатора; 3 – розділювальна секція кристалізатора; 4 – формуюча секція кристалізатора; 5, 7 – джерела живлення; 6 – злиток

Рис. 1. Двоконтурна схема електрошлакового переплаву зі струмопідвідним кристалізатором

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України проведено експериментальні дослідження із застосування технології ЕШП ДС зі струмопідвідним кристалізатором для переплаву відходів легованих сталей і нікелевих сплавів за одностадійною схемою рециклінгу. Метою експериментів було визначення особливостей та раціональних режимів електрошлакового переплаву електродів змінного перерізу, виготовлених з металевих відходів, з отриманням зливків високої якості, придатних для подальшого використання у виробничому циклі. Дослідні плавки виконували на установці ЕШП типу Р-951, обладнаній двома незалежними джерелами живлення потужністю по 724 кВА, модернізованими для плавного регулювання напруги. Дослідні зливки виплавляли у струмопідвідному кристалізаторі з діаметром формувальної секції 180 мм за схемою витягування вниз.

Для здійснення експериментальних плавок з металевих відходів відповідного типу виготовляли витратні електроди.

Під час дослідження особливостей рециклінгу відходів інструментальної сталі типу Р6М5 електроди збирали з малогабаритного відпрацьованого

інструменту шляхом зварювання окремих деталей в єдиний електрод. Переплав даних електродів здійснювали під флюсом АНФ-29.

Для моделювання переплавлення відпрацьованих валків машин безперервного лиття використовували сталевий електрод змінного перетину з секціями діаметрами 150, 110 і 80 мм, який імітував переплавлення реальних валків без попереднього відрізання шийок. За даної геометрії електрода в ході переплавлення коефіцієнт заповнення ступінчасто змінювався з 0,69 до 0,37 і до 0,2.

Електроди для переплавлення відходів нікелевого сплаву ЕП648 формували з циліндричної обрізі діаметром 70 мм, яка була забракована через дефекти усадкового походження, та з півкілець з цього ж сплаву. З'єднання окремих фрагментів здійснювали зварюванням з мінімальним внесенням зварювального матеріалу. Така конструкція електрода не дозволяла пропускати крізь нього великий струм. Тому під час переплаву основну електричну потужність підводили до кристалізатора. Переплав проводили під флюсом, який складався з 90 % флюсу АНФ-29 і 10 % CaF_2 із захистом плавильного простору аргонном.

Також було проведено дослідження з переплаву дрібних відходів легованого металу у струмопровідному кристалізаторі без використання витратного електроду, з живленням через один контур. За таких умов нагрівання шлакової ванни відбувається лише за рахунок підведення струму крізь водоохолоджувану струмпідвідну секцію кристалізатора (рис. 1, рис. 2, б). Як шихтовий матеріал використовували дрібні відходи медичного інструменту зі сталі Х18Н10 та подібних марок. Плавку розпочинали з наведення шлакової ванни на основі флюсу АНФ-28, після чого металеву шихту порціями подавали на її поверхню (рис. 2, а). Хід процесу контролювали візуально.

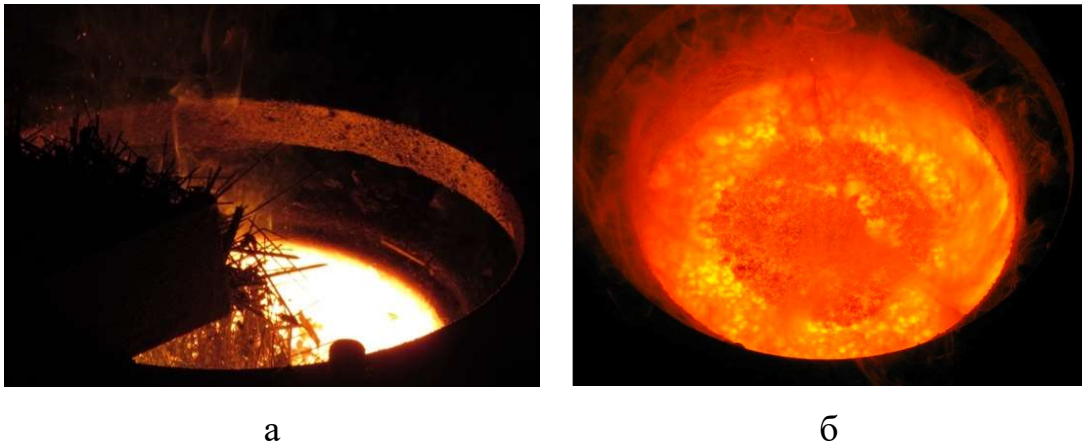


Рис. 2. Загальний вигляд процесу переплавлення дрібних відходів легованого металу у струмопровідному кристалізаторі (а) та поверхні шлакової ванни за пристінкового тепловиділення (б)

З контрольних зливків вирізали зразки для визначення їх внутрішньої якості, дослідження макроструктури та хімічного аналізу.

Експерименти з переплавом електродів, виготовлених з відходів інструментальної сталі, за різних режимів показали, що конфігурація збірного електроду напряму впливає на стабільність процесу та якість отриманого зливку. Визначено, що переплав складених електродів з нерегулярною геометрією слід здійснювати з підведенням основної потужності ($\geq 75\%$) до кристалізатора. Це дозволяє стабільно і з постійною продуктивністю переплавляти електрод та отримувати злиток високої якості. Хімічний склад металу контрольного зливка вагою 129 кг, отриманого з відходів інструментальної сталі, відповідав хімічному складу сталі Р6М5 [9].

Переплав електродів змінного перерізу з регулярною геометрією, що моделювали відпрацьовані валки машин безперервного лиття, здійснювали з метою визначення умов за яких забезпечується підтримання стабільної глибини й профілю ванни рідкого металу протягом усього переплаву – а відтак стабільної якості металу зливка по його довжині. Було визначено, що продуктивність переплаву регулюється потужністю, що подається на витратний електрод. При цьому вплив потужності у ланцюгу кристалізатора на продуктивність переплаву не

значний, але він сильно впливає на форму ванни рідкого металу. Для підтримки стабільних параметрів ванни рідкого металу необхідно вести процес з постійною продуктивністю та стабільною щільністю струму на периферії шлакової ванни [10].

За результатами переплаву витратних електродів з відходів нікелевого сплаву визначено, що раціональний розподіл потужності між електродом і кристалізатором під час процесу становить $1/3$. При цьому швидкість переплаву в середньому становила 80 кг/год. За розробленими режимами були виготовлені контрольні зливки довжиною 1,10 м і 1,25 м. Хімічний склад металу після ЕШП відповідав хімічному складу вихідного сплаву ЕП648. Втрати з окисненням високоактивних елементів Al й Ti в умовах експерименту не перевищували 0,10 % і 0,15 % відповідно. Дослідні зливки були передані у виробництво де куванням з них виготовили кільця, які успішно пройшли контроль на відповідність чинним промисловим стандартам за якістю.

Експерименти з переплаву дрібних відходів легованого металу у струмопровідному кристалізаторі за безелектродною схемою показали, що за відсутності центрального електроду у шлаковій ванні має місце кільцевий пристінковий характер тепловиділення (рис. 2, б). Однак, за правильного вибору режиму переплаву температурне поле шлакової ванни всередині кристалізатора ефективно осереднюється за рахунок перемішування під впливом електромагнітного поля. За використання спеціальних засобів швидкістю руху ванни можна керувати зі зміною напрямку обертання. В ході експериментів була досягнута швидкості переплаву близько 45 кг/год. Висока якість поверхні зливків була досягнута за підведеної електричної потужності 175-200 кВА. Після переплаву сталь містила 17-18 % Cr та 9,0-9,3 % Ni.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність та довели доцільність застосування технології електрошлакового переплаву за двоконтурною схемою живлення зі струмопідвідним кристалізатором для рециклінгу відходів легованих сталей і нікелевих сплавів. Отримані в процесі досліджень зливки вирізняються високою якістю та придатні для подальшого використання у виробничому циклі.

Література:

1. Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe / T. Branca, V. Colla, D. Algermissen, H. Granbom, U. Martini, A. Morillon, R. Pietruck, S. Rosendahl // *Metals*. – 2020. – Vol. 10. – 345. doi: 10.3390/met10030345
2. Xie J., Xia Z., Tian X., Liu Y. Nexus and synergy between the low-carbon economy and circular economy: A systematic and critical review // *Environmental Impact Assessment Review*. – 2023. – Vol. 100. – 107077. doi: 10.1016/j.eiar.2023.107077
3. What Do We Know About Metal Recycling Rates? / T. E. Graedel, J. Allwood, J. Birat, M. Buchert, C. Hagelüken, B. K. Reck, S. F. Sibley, G. Sonnemann // *Journal of Industrial Ecology*. – 2011. – Vol. 15. – N 3. – P. 355-366. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x
4. Thermodynamics Analysis and Pilot Study of Reusing Medium and High Alloy Steel Scrap Using Induction Melting and Electroslag Remelting Process / L. Wu, K. Liu, H. Mei, G. Bao, Y. Zhou, H. Wang // *Metals*. – 2022. – Vol.12. – N 6. – 944. doi:10.3390/met12060944
5. Arh B., Podgornik B., Burja J. Electroslag remelting: a process overview // *Materials and technology*. – 2016. – Vol. 50. – N 6. – P. 971–978. doi: 10.17222/mit.2016.108
6. Mitchell A. Electrode manufacture for the remelting processes // *Ironmaking & Steelmaking*. – 2021. – Vol. 48. – N 5 – P. 505-513. doi: 10.1080/03019233.2020.1855690
7. Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходуемого электрода / А.К. Цикуленко, И.А. Ланцман, Л.Б. Медовар, А.В. Чернец, В.Е. Шевченко, Б.Б. Федоровский, Ц.Ф. Грабовский, В.И. // *Проблемы специальной электрометаллургии*. – 2000. – № 3. – С. 16-20.
8. Medovar L., Stovpchenko G., Jianjun G. State of the art of electroslag refining and challenges in the control of ingot cleanness // *2th International Conference of Molten*

Slags, Fluxes and Salts MOLTEN 2024 Proceedings. – Brisbane, AusIMM, 2024. – ID: P-04120-D5P7M3.

9. Рециклінг відпрацьованого некомпактного інструменту зі швидкоріжучої сталі способом електрошлакового переплаву / Є.О. Педченко, Ю.В. Костецький, Л. Петренко, Л.Б. Медовар // Сучасна електromеталургія. – 2022. – №3. – С.23-28. doi: 10.37434/sem2022.03.04

10. Electroslag remelting of variable cross-section electrodes using a two-circuit scheme / Ye. O. Pedchenko, V. L. Petrenko, Yu. V. Kostetskyi, G. O. Polishko, V. A. Zaitsev // Proceedings of the VIIth International Conference on Welding and Related Technologies WRT 2024, Yaremche. – CRC Press, 2025. – P. 25-28. doi: 10.1201/9781003518518-5

Кудін В. В.¹, Єфременко В. Г.², Бойчук Р. В.¹, Шалдін О. М.¹

Голтвяниця В. С.¹, Матвейшин М. В.¹, Кармазін М. О.¹

(¹НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя;

²Словацька академія наук, м. Кошице)

**ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛОПАТОК
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ІЗ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ**

E-mail: kudin@zp.edu.ua

Розвиток авіаційного газотурбобудування направлений на зростання робочих параметрів газотурбінних двигунів (ГТД) [1], яке супроводжується збільшенням рівня температур, питомої потужності, економічності та навантаженості деталей турбіни з одночасним підвищенням вимог до надійності та ресурсу роботи ГТД [2]. Надійність і тривалість роботи ГТД залежать від експлуатаційної довговічності деталей гарячого тракту турбіни: лопатки та соплові апарати. Основними сплавами для виготовлення цих деталей є високолеговані жароміцні сплави на нікелевій основі [3].

В сучасних авіаційних двигунах з тривалим ресурсом роботи (більше 10000 годин) використовуються лопатки з жароміцних нікелевих сплавів. Лопатки в процесі експлуатації зазнають впливу високих температур 760-975 °С, статичних та динамічних напружень до 250 МПа. В складних умовах реальна експлуатаційна