

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИТРАТНОГО ЕЛЕКТРОДА ТА РІДКОГО МЕТАЛУ

Г.П. Стовпченко, Г.О. Полішко, Д.В. Коломієць, Л.Б. Медовар

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

Виконано порівняння енергоємності та втрат металу в електрошлакових технологіях з переплавом витратного електрода та використанням рідкого металу, що показало енергетичну ефективність та більший вихід придатного при використанні останньої. При формуванні злитка з рідкого металу з характерною для традиційного процесу ЕШП продуктивністю економія електроенергії складає до 57 %. Можливість збільшення продуктивності на 15 % за рахунок зниження перегріву металу при електрошлаковому перепаві з рідким металом без зміни теплових умов процесу та якості злитка підвищує економію електроенергії до 60 % від витрат традиційного процесу. Втрати металу є також на 14...60 % нижчими завдяки відсутності витратних електродів, що дає суттєвий економічний ефект. Бібліогр. 23, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: електрошлаковий перепад; витратний електрод; електрошлакова технологія з рідким металом; злитки ЕШП; електроенергія; метал; економічна ефективність

Вступ. Ідею переплавлення твердої заготовки в рідкому шлаку для одержання злитків високої якості було сформульовано й реалізовано на початку 50-х років ХХ ст. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [1]. Поштовхом для цього стало винайдення при зварюванні під флюсом особливого бездугового режиму плавлення в рідкому шлаку за рахунок перетворення електричної енергії в теплову через його високий електричний опір [2].

В результаті було створено новий процес спеціальної електрометалургії — електрошлаковий перепад (ЕШП), який і сьогодні широко використовують для одержання злитків високої якості з чистою та гомогенною структурою для найбільш відповідального використання, незважаючи на те, що енергетичні затрати є доволі високими.

Запропонована й впроваджена в промисловість при наплавленні валків прокатних станів, а також широко перевірена в дослідно-промисловому обсязі при виготовленні суцільних та порожнистих злитків нова електрошлакова технологія — електрошлакова переробка рідкого металу (ЕШП РМ) дозволяє суттєво скоротити витрати електроенергії та розширити сортамент продукції [3–5]. Тому в цій роботі для розширення впровадження нової технології виконано порівняння витрат енергії та металу в традиційному електрошлаковому перепаві з витратним електродом з технологією ЕШП РМ.

Технологія виготовлення та обробки сталі, що передує електрошлаковим технологіям.

Зрозуміло, що всі попередні матеріальні й енергетичні затрати первинної й вторинної металургії входять у вартість злитків ЕШП. Тим не менш, цікаво не тільки порівняти класичний ЕШП з ЕШП РМ, але й побачити величини енерговитрат при використанні різних агрегатів та загальні втрати металу при виробництві злитків за різних варіантів організації технологічного процесу.

Електрошлакові технології застосовують до металу, який вже пройшов всі стадії традиційної металургійної обробки. Для сталей та сплавів це виплавка в агрегатах первинної металургії (кисневий конвертор, дугова або індукційна сталеплавильна піч) та позапічна обробка в ковші (піч-ковш, вакууматор).

В агрегатах первинної металургії сьогодні найчастіше виплавляють напівпродукт (раніше — готові сталі заданого хімічного складу), який доводять до заданого хімічного складу й температури в ковші при позапічній обробці. В печі-ковші проводять обробку шлаком, видалення домішок, розкислення й легування для забезпечення заданого хімічного складу та температури. Для видалення газів та вакуум-вуглецевого розкислення метал додатково піддають вакуумуванню, яке сьогодні є вже традиційною операцією у виробництві сталей стандартної якості.

Всі ці етапи є загальними для технологічних ланцюгів обох електрошлакових технологій — ЕШП та ЕШП РМ, що порівнюються (рис. 1).

Г.П. Стовпченко — <https://orcid.org/0000-0002-6555-5715>, Г.О. Полішко — <https://orcid.org/0000-0001-7543-280X>, Л.Б. Медовар — <https://orcid.org/0000-0003-2077-5965>

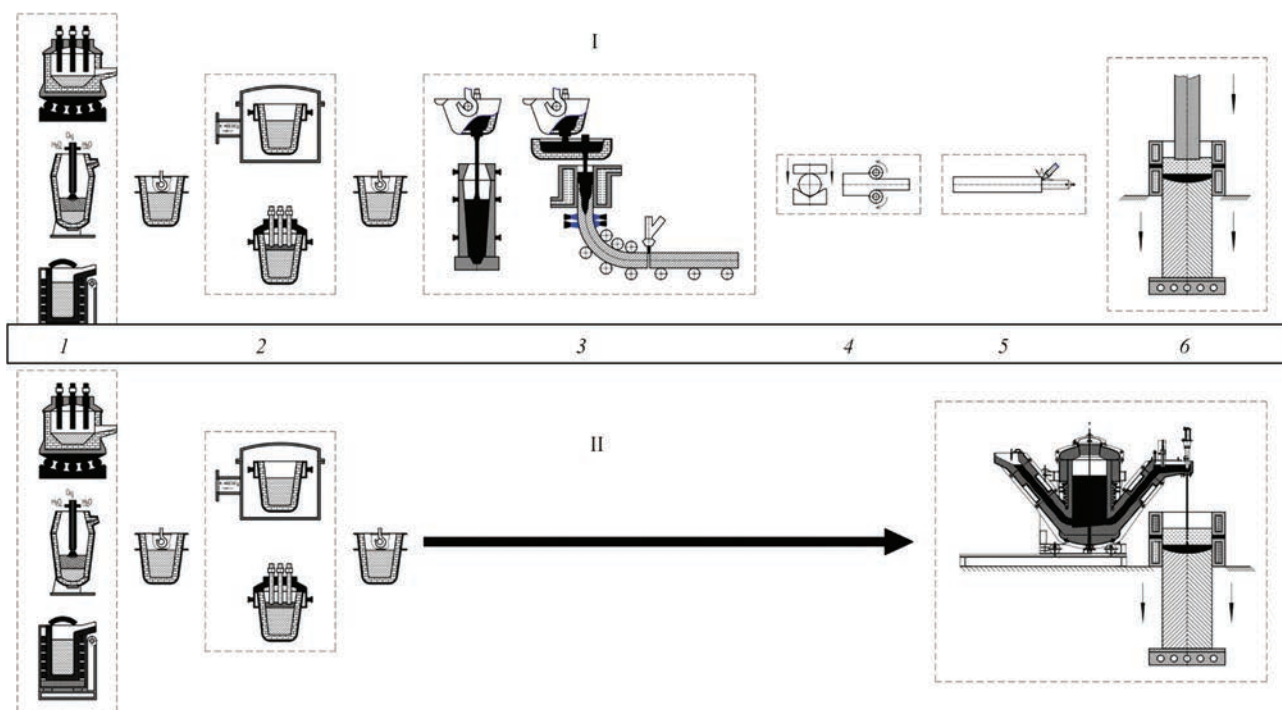


Рис. 1. Технологічний ланцюг виготовлення злитків ЕШП з витратними електродами (I) та ЕШП РМ (II): 1 — ДСП, КК, ІП; 2 — позапічна обробка; 3 — розливка в злитки або заготовки МБЛЗ; 4 — деформація заготовки/злитка; 5 — приварювання злитка або катаної/кованої заготовки до інвентарної головки електродотримача; 6 — ЕШП/ЕШП РМ

Для отримання напівпродукту з його подальшим доведенням позапічною обробкою найбільш широко використовують кисневий конвертер (КК) та дугові сталеплавильні печі (ДСП). Шихтою конвертерної плавки є чавун і основне тепло процесу утворюється при згорянні вуглецю та домішок, тож витрати електроенергії в КК є мінімальними (на роботу приводів та агрегатів вдування кисню). Витрата електроенергії на виплавку однієї тонни сталі в КК становить 70...80 кВт·год/т [6].

Традиційно печі ДСП ємністю від 1 до 200 т споживають від 392 до 525 кВт·год/т електроенергії. За даними звіту Міжнародної організації UNIDO [7] питомі витрати електроенергії при виплавці сталі в дуговій печі можуть сягати 600...640 кВт·год/т. За даними авторів робіт [8, 9] витрата електроенергії в дугових печах малого тоннажу становить 700 кВт·год/т. Слід відмітити, що малі печі є менш економічними за причини більших тепловтрат, однак додатковим фактором тут є й те, що в малих печах найчастіше випускають вже готову сталь і, відповідно, подальших витрат на позапічну обробку вже немає.

Виплавка напівпродукту у сучасних електродугових печах великої потужності й об'єму є менш енерговитратною, оскільки використовують різноманітні засоби інтенсифікації плавки: вдування палива (вуглецевих матеріалів) або застосування в металевій шихті рідкого чавуну, робота з «болотом» на спіненому шлаку (що зменшує

втрати тепла), продування киснем (застосування паливо-кисневих пальників, кисневих фурм), продування ванни інертним газом для інтенсифікації перемішування тощо. Використання методів інтенсифікації плавки дозволяє скоротити її тривалість та знизити питомі витрати електроенергії до 300...400 кВт·год/т [10]. Світовий рівень витрат електроенергії при виробництві 1-єї т рідкої сталі в ДСП за даними Всесвітньої асоціації виробників сталі (World Steel Association) оцінюють на рівні 340 кВт·год/т. Слід відмітити, що засоби інтенсифікації плавки добавками вуглецю призводять до збільшення викидів CO_2 , які в усьому світі скорочують всіма способами, тож цей напрямок зменшення витрат електроенергії може відійти у минуле. Можна вважати, що у середньому витрата електроенергії при виплавці однієї тонни сталі в середніх ДСП становить 400...500 кВт·год/т.

В індукційних печах, які найчастіше використовують в заготівельному виробництві невеликих машинобудівних заводів, витрата електроенергії становить 660...880 кВт·год/т за даними авторів роботи [11], а за даними інших спеціалістів — 470...500 та 500...540 кВт·год/т [12, 13]. Можна прийняти, що в середньому витрата електроенергії в індукційній печі становить 500...600 кВт·год/т.

Є ще декілька різновидів плавильного обладнання, що використовується для виплавки спеціальних сталей, які ми не будемо розглядати, але які можуть передувати ЕШП. Вакуумно-індукцій-

ну плавку (ВП) використовують для спеціальних сталей і сплавів, де критичним є низький вміст газів, в тому числі нікелевих суперсплавів. ВП застосовують для отримання витратного електрода в литому вигляді з його подальшим переплавом ЕШП. Витрати електроенергії при ВП сягають 1000...1100 кВт·год/т [14, 15]. Виплавку корозійно-стійких сталей можуть здійснювати в конвертерах аргоно-кисневого рафінування (АКР) місткістю від 1 до 175 т (рідше — газокисневого рафінування (ГКР) [16]. Метод АКР дозволяє отримувати високохромисті сталі безпосередньо з чавуну з використанням в якості шихтового матеріалу хромової руди. Як і в КК витрата електроенергії є невисокою (30...40 кВт·год/т), однак обидва процеси продукують CO_2 , що в найближчому майбутньому потребуватиме введення додаткових операцій для його поглинання.

Позапічна обробка в даний час є стандартною ланкою сучасного сталеплавильного виробництва, яку здійснюють в ковші на установках доведення металу в агрегатах ковш-піч, а при необхідності використовують і вакууматор (циркуляційний, порційний або камерний). Вибір способу позапічної обробки визначається вимогами до хімічного складу і чистоти сталі, але для більшості випадків є загальним етапом для обох технологічних ланцюгів ЕШП і ЕШП РМ.

За різними джерелами витрата електроенергії на установці ковш-піч становить від 20 до 50 кВт·год/т [17, 18.]

Вакуумування металу здійснюють головним чином для забезпечення підвищених вимог щодо вмісту газів і неметалевих включень. Після інтенсивної дегазації в метал з бункера, що розміщений у вакуумній камері, можуть вводити феросплави елементів, які мікролегуєть та розкиснюють сталь. Витрата електроенергії при обробці вакуумом становить 20...30 кВт·год/т [19]. В цілому при позапічній обробці витрати електроенергії складають 40...80 кВт·год/т.

Після позапічної обробки технологічні ланцюги ЕШП і ЕШП РМ відрізняються.

При класичному ЕШП сталь після позапічної обробки направляється на розливання до машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) або у виливниці (з отриманням злитків). Сталь з ковша надходить в проміжний ковш, звідки через стопорний пристрій або стакан-дозатор її подають в кристалізатор МБЛЗ, стінки якого змащують шлакоутворювальними сумішами або парафіном/маслами. На цій стадії матеріальні витрати йдуть на футеровку промковців, розливальні су-

міші й змащення, інертний газ, розливні стакани, обслуговування та заміну кристалізаторів. Витрата електроенергії в сталь-ковші становить 30...40 кВт·год/т, в промковші — 50...60 кВт·год/т, а втрати металу — 1,5...3,0 % (наморожування на стінки ковша, заливини, виливки тощо). При розливанні сталі на МБЛЗ витрати електроенергії складають від 40...50 до 50...60 кВт·год/т [19]. Витрати електроенергії за середніми показниками — 40...55 кВт·год/т й загальні втрати металу при розливанні сталі на МБЛЗ — 5...10 %.

На ряді металургійних заводів для отримання витратних електродів для ЕШП сталь розливають у виливниці на злитки, які можуть використовуватися в литому вигляді або бути кованими (рідше — катаними). Питомі витрати електроенергії при розливанні в злитки складають 50...55 кВт·год/т [19] (на нашу думку ця цифра є дещо завищеною, оскільки при розливанні у виливниці проводять переважно кранові операції). В той же час, головний та донний обріз металу при розливанні в злитки сягає 25 %. Окрім того є втрати на литники, вирубку та зачищення поверхневих дефектів тощо [20].

Після розливання сталі в заготовки МБЛЗ/злитки для отримання витратного електрода відповідного розміру і якості інколи необхідно провести їх нагрівання і деформацію (прокатку/ковку). Питомі витрати електроенергії на нагрів перед деформацією становлять 50...60 кВт·год/т [21].

Деформацію заготовки/злитка проводять на прокатному стані або пресі. Так, наприклад, в технологічному циклі ПрАТ «Дніпрспецсталь» (м. Запоріжжя, Україна) метал прокатують на стані 1050/950 з витратами електроенергії 30...60 кВт·год/т і втратами металу 5...30 %. Великогабаритні поковки круглого, квадратного і прямокутного перерізу з різних марок сталі обробляють в ковальсько-пресовому цеху з витратами електроенергії 20...50 кВт·год/т і втратами металу 10...15 % [20, 21].

Наступною технологічною операцією перед традиційним процесом ЕШП є приварка злитка або катаної/кованої заготовки до інвентарної головки електродотримача, щоб створити витратний електрод. Зазвичай для одержання електрода використовують напівавтоматичне дугове зварювання дротом в середовищі CO_2 або суміші газів (CO_2 , Ar). Для 100 т електрода маса зварного шва катетом 20 мм (що є необхідним для гарантування міцності шва) становить 1,4 т. При напівавтоматичному дуговому зварюванні в середовищі CO_2 або суміші газів витрати електроенергії на зварювання

на 1 т злитка ЕШП складають 28...30 кВт·год/т, а витрати зварювальних матеріалів 1,3...1,4 %.

Після всіх підготовчих робіт витратний електрод подають на піч ЕШП. Середній рівень питомих витрат електроенергії на сучасних печах ЕШП знаходиться в межах 1100...1200 кВт·год/т [22], печах застарілих конструкцій — понад 1500...1700 кВт·год/т [23], а за деякими оцінками досягає навіть 2000 кВт·год/т. Суттєвим є й те, що частина електрода біля інвентарної головки (як найменш 30...50 мм) завжди залишається непереплавленою. Наприклад, для злитка 100 т діаметром 1700 мм, якого виплавлено з одного електрода з коефіцієнтом заповнення 0,7, маса огарка становить 1,73...2,88 т (0,27...0,45 %).

В технологічному ланцюгу виробництва злитків ЕШП РМ метал після позапічної обробки надходить безпосередньо в підігрівальний розливальний пристрій (ПРП) і далі в кристалізатор для формування злитка, минаючи операції виготовлення витратного електрода. Витрати електроенергії в ПРП складають 200...300 кВт·год/т,

а втрати металу не перевищують 1 %. З ПРП рідкий метал подають безперервно або порційно в струмопідвідний кристалізатор ЕШП із заданою продуктивністю для формування якісного злитка. Струмопідвідний кристалізатор є не тільки пристроєм, який формує злиток, а й виконує роль невитратного електрода, що здатен підтримувати електрошлаковий процес за відсутності витратного електрода. Задокументована витрата електроенергії на формування однієї тонни наплавки при ЕШП РМ для виробництва композитних прокатних валків становить 800...900 кВт·год/т [3]. Витрати електроенергії при виплавці суцільного злитка способом ЕШП РМ будуть дещо більшими, а при виплавці порожнистого злитка — меншими через вищу швидкість його формування в зазорі між двома кристалізаторами.

Оскільки перші операції в технологічних ланцюгах ЕШП та ЕШП РМ є однаковими (виплавка вихідної сталі в ДСП та позапічна обробка (установка піч-ковш та вакууматор)), то витратами електроенергії (470...820 кВт·год/т) та втратами

Техніко-економічні показники ЕШП та ЕШП РМ

Технологічна операція	Витрати електроенергії, кВт·год/т (середні значення)		Втрати металу, доля одиниці		Стаття втрат металу
	ЕШП	ЕШП РМ	ЕШП	ЕШП РМ	
Виплавка сталі в ДСП	550		–		–
Позапічна обробка (піч-ковш та вакууматор)	60		–		–
Проміжний розливальний ковш	55	250	0,015	0,01	Залишки в ПРП
МБЛЗ/злиток	→–	–	0,05...0,10 МБЛЗ/0,15...0,25 злиток	–	Обріз заготовки/втрати металу при розливанні
Нагрівання перед деформацією	→–	–	0,02...0,03	–	Втрати на окалину
Прокатування/кування	40	–	0,05...0,30	–	Обріз при куванні/прокатуванні
Кріплення (приварювання) електрода	29	–	0,013...0,014	–	Витрати електроенергії та дроту при зварюванні
Електрошлакова переробка	1500	850	0,05...0,15		Головний та донний обріз злитка ЕШП
			0,0027...0,0045*	–	
Усього	2289	1100	1,20...1,76	1,06...1,16	Втрати металу на огарок електрода
Економія, кВт·год/т	–	1189	–	1,14...0,60	–
Економія, тис. грн (євро) на тонні злитка**	4,5 (112)		Теплостійкі сталі 35...150 (875...3750)		–
При підвищеній на 15 % продуктивності	5,2 (129)		–		–

*Розрахунок для злитка 100 т діаметром 1700 мм, що виплавлено з одного електрода з коефіцієнтом заповнення 0,7.
**Розрахунок наведено за цінами на початку 2022 р.: електроенергія для промислових підприємств — 3,8 грн/кВт·год; середня ціна теплостійкої сталі — 250 тис. грн./т.

металу при цьому в подальших розрахунках нехтуємо. Вихідну кількість металу після позапічної обробки приймаємо за одиницю.

Дані щодо енергоемності різних стадій обробки при виробництві електрошлакового металу та результати техніко-економічних розрахунків стосовно двох процесів ЕШП, що розглядаються, зведено в таблицю.

Показано, що витрати електроенергії в середньому для отримання однієї тонни злитка ЕШП класичним технологічним процесом переплаву витратного електрода становлять 2289 кВт·год/т (для кованого електрода більша величина), а при ЕШП РМ за аналогічної продуктивності формування злитка — 1100 кВт·год/т. Відповідно ЕШП РМ дозволяє заощадити до 57 % (1189 кВт·год) електроенергії на кожній тонні сталі, що в грошовому еквіваленті становить 4,52 тис. грн (112 євро)/т.

Значна економічна ефективність використання ЕШП РМ проявляється і у зменшенні втрат металу на 14...60 % порівняно з традиційним ЕШП, що на прикладі теплостійких марок сталей дає економію 35...150 тис. грн (875...3750 євро) на тонні сталі.

Додатковим резервом покращення економічних показників процесу ЕШП РМ є обґрунтована можливість підвищення його продуктивності до 1,15 продуктивності традиційного ЕШП з витратним електродом (що є виправданим через відсутність витрат тепла на додатковий перегрів металу при плавленні витратного електрода) економія електроенергії збільшується до 1354 кВт·год/т (60 % від такої при ЕШП), що в грошовому еквіваленті становить 5,2 тис. грн/т (129 євро/т).

Висновки

1. Показано енергетичну ефективність та менші втрати металу при використанні електрошлакової технології з рідким металом у порівнянні з класичним ЕШП з витратним електродом.

2. Економія електроенергії при формуванні злитка з рідкого металу з характерною для традиційного процесу ЕШП продуктивністю складає до 57 % останньої. За рахунок зниження перегріву металу при ЕШП РМ без зміни теплових умов процесу та якості злитка його продуктивність може бути збільшено на 15 %, що додатково дає економію електроенергії до 60 % такої в традиційному процесі ЕШП.

3. Завдяки відсутності витратних електродів при використанні технології з рідким металом втрати металу скорочуються порівняно з традиційним ЕШП на 14...60 %, що дає суттєвий економічний ефект, який складає 35..150 тис. грн.

(875...3750 євро) на тонні сталі (на прикладі сталей теплостійких марок).

4. Переваги електрошлакової технології з рідким металом дозволяють рекомендувати її використання для виробництва високоякісних великовагових злитків з високолегованих сталей, особливо зважаючи на постійне зростання вимог до збереження енергії та довкілля.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Патон В.Е. (2008) *Новый способ электрической отливки слитков*. Избранные труды. Киев, Наукова думка, сс. 610–619.
2. Волошкевич Г.З. (1953) Электрошлаковая сварка. *Автоматическая сварка*, **6**, 6–10.
3. Медовар Б.И., Чернец А.В., Медовар Л.Б. и др. (1995) Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 6–11.
4. Полишко А.А. (2012) Укрупнение слитков последовательным кольцевым электрошлаковым наплавлением. *Современная электрометаллургия*, **2**, 14–16.
5. Medovar L., Polishko G., Stovpchenko G. et al. (2018) Electroslag refining with liquid metal for composite rotor manufacturing. *Archives of Materials Science and Engineering*, **91(2)**, 49–55.
6. Li Xiaoling, Sun Wenqiang, Sun Wenqiang et al. (2018) Material metabolism and environmental emissions of BF-BOF and EAF steel production routes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **39(1)**, 50–58.
7. Holappa L. (2014) Secondary steelmaking. *Treatise on Process Metallurgy*, **3**. Industrial Processes, 301–345.
8. (2014) Industrial Energy Efficiency Benchmarking Report for Iron and Steel Sector. United Nations Industrial Development Organization. <https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-05/Benchmarking%20Report%20Steel%20Sector.pdf>
9. Mohsen M.S., Akash B. (1998) Energy analysis of the steel making industry. *Inter. J. of Energy Research*, **22**, 1049–1054. DOI: 10.1002/(SICI)1099-114X(19981010)22:12<1049::AID-ER422>3.3.CO;2-N https://www.researchgate.net/publication/298959074_Energy_analysis_of_the_steel_making_industry
10. Демидик В.Н., Колодная Т.П. (2010) Электродуговая плавка стали как необходимая составляющая обновления металлургии Украины. *Металл и литье Украины*, **5**, 34–39.
11. He Kun, Wang Li, Li Xiaoyan. (2020) Review of the energy consumption and production structure of China's steel industry: Current situation and future development. *Metals*, **10**, 302–320. DOI: doi:10.3390/met10030302
12. Bublík J., Abraham M. (2011) *Specific energy consumption of induction crucible furnace*. Intensive Programme «Renewable Energy Sources». Železná Ruda-Špičák, University of West Bohemia. Czech Republic, 130–133.
13. Abhilash E., Joseph M.A. (2008) Studies on energy consumption of melting furnaces and energy conservation options in foundries. *Conf. Energy 2008, Calicut, Kerala, India, 2018, January*. https://www.researchgate.net/publication/292616091_Studies_on_Energy_Consumption_of_Melting_Furnaces_and_Energy_Conservation_Options_in_Foundries

14. Chaabet M., Doetsch E. (2015) ABP-Inductive melting in steelworks. Messe, Düsseldorf, Germany, 16–20 June, 2015. TERMPROCESSES 2015. *Heat Processing*, **1**, 63–68.
15. Moyer J.M., Jackman L.A., Adaszczik C.B. et al. (1994) Advances in triple melting superalloys 718, 706, and 720. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 39–48.
16. Choudhury A. (1992) State of the art of superalloy production for aerospace and other application using VIM/VAR or VIM/ESR. *ISIJ Inter.*, **32(5)**, 563–574.
17. Каплан В.Н., Вакула В.С., Садовник Ю.В., Ян Х. (2009) Внедрение автоматизированных технологических комплексов конвертеров ГКР для производства коррозионно-стойких сталей на металлургических предприятиях КНР. *Металл и литье Украины*, **1–2**, 41–42.
18. Смирнов А., Сафонов В. (2008) После конвертера и ДСП. О современной концепции применения технологии обработки стали в установках «ковш-печь». *Интернет-журнал Металл*. URL: <https://readmetal.com/?p=1091>.
19. Большаков В.И., Тубольцев Л.Г. (2006) Состояние и перспективы развития черной металлургии Украины на основе энергосберегающих технологий. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **2**, 1–8.
20. (1977) *Разливка стали*. Баптизманский Б.И. (ред.). Киев–Донецк, Вища школа.
21. URL: <http://www.dss-ua.com/rus/company/production/rolling-production/>
22. Паламарь Д.Г., Раздобреев В.Г., Бадюк С.И. (2011) Анализ состояния сортопрокатного производства на металлургических предприятиях Украины. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, **23**, 185–194. Дніпропетровськ, ІЧМ НАН України.
23. Медовар Л.Б., Лебедь В.А., Стовпченко А.П. и др. (2012) О реконструкции печей ЭШП. *Современная электрометаллургия*, **4**, 3–6.
24. Медовар Б.И., Чернец А.В., Медовар Л.Б. и др. (1995) Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 61–71.
9. Mohsen, M.S., Akash, B. (1998) Energy analysis of the steel making industry. *Inter. J. of Energy Research*, **22**, 1049–1054. DOI: 10.1002/(SICI)1099-114X(19981010)22:12<1049::AID-ER422>3.3.CO;2-N https://www.researchgate.net/publication/298959074_Energy_analysis_of_the_steel_making_industry
10. Demidik, V.N., Kolodnaya, T.P. (2010) Electric arc melting of steel as a necessary component of metallurgy upgrading of Ukraine. *Metall i Litio Ukrainy*, **5**, 34–39 [in Russian].
11. He Kun, Wang Li, Li Xiaoyan. (2020) Review of the energy consumption and production structure of China's steel industry: Current situation and future development. *Metals*, **10**, 302–320. DOI: doi:10.3390/met10030302
12. Bublík, J., Abraham, M. (2011) *Specific energy consumption of induction crucible furnace*. Intensive Programme «Renewable Energy Sources». Železná Ruda-Špičák, University of West Bohemia. Czech Republic, 130–133.
13. Abhilash E., Joseph M.A. (2008) Studies on energy consumption of melting furnaces and energy conservation options in foundries. *Conf. Energy 2008, Calicut, Kerala, India, 2018, January*. https://www.researchgate.net/publication/292616091_Studies_on_Energy_Consumption_of_Melting_Furnaces_and_Energy_Conservation_Options_in_Foundries
14. Chaabet, M., Doetsch, E. (2015) ABP-Inductive melting in steelworks. Messe, Düsseldorf, Germany, 16–20 June, 2015. TERMPROCESSES 2015. *Heat Processing*, **1**, 63–68.
15. Moyer, J.M., Jackman, L.A., Adaszczik, C.B. et al. (1994) *Advances in triple melting superalloys 718, 706, and 720*. The Minerals, Metals & Materials Society, 39–48.
16. Choudhury, A. (1992) State of the art of superalloy production for aerospace and other application using VIM/VAR or VIM/ESR. *ISIJ Inter.*, **32(5)**, 563–574.
17. Kaplan, V.N., Vakula, V.S., Sadovnik, Yu.V., Yan, Kh. (2009) Implementation of automated technological complexes GOR converters for production of corrosion-resistant steels at metallurgical works of PRC. *Metall i Litio Ukrainy*, **1–2**, 41–42 [in Russian].
18. Smirnov, A., Safonov, V. (2008) After converter and ASMF. On the modern concept of application of the technology of steel treatment in “ladle-furnace” installations. *Internet-J. Metall* [in Russian]. URL: <https://readmetal.com/?p=1091>.
19. Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G. (2006) State-of-the-art and prospects of development of ferrous metallurgy of Ukraine on the base of energy-saving technologies. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **2**, 1–8 [in Russian].
20. (1977) *Steel pouring*. Ed. by B.I. Baptizmansky. Kyiv-Donetsk, Vyshcha Shkola [in Russian].
21. URL: <http://www.dss-ua.com/rus/company/production/rolling-production/>
22. Palamar, D.G., Razdobreev, V.G., Badyuk, S.I. (2011) Analysis of state of section-rolling production at metallurgical works of Ukraine. *Fundamentalnye i Prikladnye Problemy Chyornoj Metallurgii*, **23**, 185–194, Dnipropetrovsk, IFM [in Russian].
23. Medovary, L.B., Lebedev, V.A., Stovpchenko, A.P. et al. (2012) Reconstruction of electroslag remelting furnaces. *Advances in Electrometallurgy*, **10(4)**, 233–237

References

1. Paton, B.E., Medovar, B.I., Paton, V.E. (2008) *New method of electric casting of ingots: Selected works*. Kyiv, Naukova Dumka, 610–619 [in Russian].
2. Voloshkevich, G.Z. (1953) Electroslag welding. *Avtomatic. Svarka*, **6**, 6–10 [in Russian].
3. Medovar, B.I., Chernets, A.V., Medovar, L.B. et al. (1995) Electroslag cladding by liquid filler material. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 6–11 [in Russian].
4. Polishko, A.A. (2012) Enlargement of ingots by successive circumferential surfacing. *Advances in Electrometallurgy*, **10(2)**, 95–98.
5. Medovar, L., Polishko, G., Stovpchenko, G. et al. (2018) Electroslag refining with liquid metal for composite rotor manufacturing. *Archives of Materials Sci. and Engin.*, **91(2)**, 49–55.
6. Li Xiaoling, Sun Wenqiang, Sun Wenqiang et al. (2018) Material metabolism and environmental emissions of BF-BOF and EAF steel production routes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **39(1)**, 50–58.
7. Holappa, L. (2014) *Secondary steelmaking. Treatise on Process Metallurgy*. Vol. 3. Industrial Processes, 301–345.
8. (2014) Industrial Energy Efficiency Benchmarking Report for Iron and Steel Sector. United Nations Industrial Develop-

ASSESSMENT OF ECONOMIC EFFECTIVENESS OF ELECTROSLAG TECHNOLOGIES, USING CONSUMABLE ELECTRODE AND LIQUID METAL

G.P. Stovpchenko, G.O. Polishko, D.V. Kolomiets, L.B. Medovar
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

Comparison of energy intensity and metal losses in electroslag technologies with consumable electrode remelting and use of liquid metal was performed, which showed the energy effectiveness and higher metal yield at application of the latter. At formation of an ingot from liquid metal with the efficiency characteristic for the traditional ESR process, the power saving is equal to 57 %. The possibility of increasing the efficiency by 15 %, by reducing metal overheating at electroslag remelting with liquid metal without a change of the process thermal conditions and ingot quality increases the power saving to 60 % of the losses in the traditional process. Metal losses are also by 14...60 % lower due to absence of consumable electrodes that gives a significant cost effect. Ref. 23, Tabl. 1, Fig. 1.

Key words: electroslag remelting; consumable electrode; electroslag technology with liquid metal; ESR ingots; electric power; metal; cost-effectiveness

Надійшла до редакції 15.09.2022

НОВІ КНИГИ



Ахонін С.В., Березос В.О. Електронно-променева плавка зливків псевдо-β титанових сплавів. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2021. — 88 с.

В монографії розглянуто особливості виробництва зливків псевдо-β сплавів титану методом електронно-променевої плавки. Детально досліджено механізми та закономірності поведінки легуючих елементів під час виготовлення зливків псевдо-β сплавів титану методом електронно-променевої плавки з використанням проміжної смості. Показано особливості кристалізації рідкого металу зливків псевдо-β сплавів титану в умовах дії електронно-променевого нагріву. З урахуванням виявлених залежностей, на прикладі титанових сплавів VT19 та VT22 запропоновано оптимальні технологічні режими їх виготовлення методом електронно-променевої плавки, які забезпечують високий рівень якісних та техніко-економічних показників. Наведено характеристики хімічного складу, стану поверхні, макро- та мікроструктури зливків псевдо-β сплавів титану. Розглянуто питання деформаційної обробки сплавів та наведено механічні характеристики напівфабрикатів із псевдо-β сплавів титану, виготовлених методом електронно-променевої плавки. Представлено особливості конструкції промислових електронно-променевих устано-

вок та дано опис технологічних схем плавки зливків діаметром 110...600 мм псевдо-β сплавів титану. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей. Бібліогр. 107, Табл. 17, Рис. 55.

Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. Аргонодугове та електронно-променеве зварювання псевдо-β титанового сплаву VT19. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2022. — 128 с.

В монографії розглянуто особливості зварювання псевдо-β титанових сплавів методами аргонодугового (АДЗ) та електронно-променевого (ЕПЗ) зварювання. Методами математичного моделювання визначено вплив термічного циклу зварювання на фазовий склад металу зварного шва і зони термічного впливу зварного з'єднання при АДЗ вольфрамовим електродом псевдо-β титанового сплаву VT19. Побудовано діаграму анізотермічних перетворень при охолодженні псевдо-β титанового сплаву та розрахунково-експериментальним методом визначено залежність залишкової кількості β-фази від швидкості охолодження. Розроблено технологію АДЗ із застосуванням присадного дроту або безкисневих флюсів та технологію ЕПЗ с попереднім підігрівом і локальною термічною обробкою. Встановлено залежність міцності з'єднань сплаву VT19, виконаних ЕПЗ, від кількості β-фази в металі шва. Наведено результати досліджень впливу різних видів пічної термічної обробки зварних з'єднань сплаву VT19 на їх структурно-фазовий склад та механічні характеристики. Застосування зазначених технологій зварювання сприятиме більш широкому використанню зварних конструкцій з псевдо-β титанових сплавів в енергетичному та хімічному машинобудуванні, а також в авіакосмічній галузі промисловості. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також студентів металургійних спеціальностей. Бібліогр. 88, табл. 24, рис. 98.



Замовлення на книги надсилати на пошту:

E-mail: journal@paton.kiev.ua