

## ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ПЕРЕПЛАВІ (ОГЛЯД)

Г.П. Стовпченко, А.В. Кадильникова

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

Електрошлаковий перепад є провідним процесом спеціальної електрометалургії, який використовують для отримання високоякісних сталей та сплавів. За своїми механічними (особливо пластичними) і експлуатаційними властивостями, щільністю й чистотою метал електрошлакового перепаду значно перевершує аналогічні матеріали, що вироблені способами традиційної металургії. Ступінь рафінування сталі залежить від складу і властивостей шлаку, який визначає теплову ефективність процесу та температурний режим металеві ванни, тож суттєвим чином впливає на умови затвердіння зливка та його структуру. Електроліз не є основним процесом і метою електрошлакового перепаду, тим не менш, оскільки перенесення струму в шлакових розплавах здійснюється переважно іонами, при цьому відбуваються електрохімічні реакції, які змінюють склад шлаку і металу. Проаналізовано сучасні уявлення про природу електрохімічних процесів і можливі катодні і анодні реакції в процесах ЕШП-типу на постійному струмі, в тому числі з погляду на одержання чистого за сіркою і киснем металу. Розглянуто дані щодо впливу полярності постійного струму на швидкість плавлення витратного електрода. Виявлено актуальні напрямки подальших досліджень електрохімічної сторони процесу електрошлакового перепаду для підвищення ефективності та створення нових можливостей його застосування. Бібліогр. 60, рис. 8.

*Ключові слова:* електрошлаковий перепад; шлак; іонний розплав; електрохімічні, катодні та анодні реакції; електрична провідність; в'язкість; полярність електрода

Удосконалення обладнання та технології електрошлакового перепаду (ЕШП) сьогодні спрямовані на зменшення витрат електроенергії і шлаку, покращення техніко-економічних показників і екологічності процесу. Великий внесок у вивчення процесу ЕШП і розвиток цієї технології внесли вітчизняні та зарубіжні вчені — Б.С. Патон, Б.І. Медовар, Ю.В. Латаш, Р. Нафзігер, А. Мітчелл, Дж. Шекелі, Л.Б. Медовар, В. Хольцгрубер та ін. [1–9]. Завдяки їхнім роботам закладено теоретичні основи, виявлено важливі загальні закономірності процесів рафінування і затвердіння металу, розроблено технології та обладнання, які забезпечують високу якість зливок ЕШП і сьогодні.

За своїм призначенням ЕШП не є електрохімічним процесом. Однак шлаки ЕШП є іонними оксидно-фторидними розплавами, що містять переважно  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{CaO}$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Рідше компонентами шлаків є  $\text{SiO}_2$  та  $\text{MgO}$ , а також оксиди елементів змінної валентності (Fe, Cr, Ti, V та ін.), які вводяться навмисно або потрапляють в результаті обмінних реакцій між металом і шлаком.

Проходження електричного струму в розплавлених шлаках в основному відбувається шляхом електрохімічного переносу іонів. Тому електрохімічні явища і реакції можуть значно більше впливати на електричну і теплову ефективність ЕШП, якість виплавленого металу, ніж це зазвичай прийнято вважати.

**Роль шлакової ванни в процесі ЕШП.** Електрошлаковий перепад витратного електрода здійснюється за рахунок тепла, що виділяється в шарі рідкого шлаку при проходженні через нього електричного струму (рис. 1).

Крапельне перенесення рідкого металу через шар нагрітого до високої температури рафінуючого шлаку забезпечує очищення рідкого металу від неметалевих включень і домішок (перш за все сірки), а повільне поступове зменшення рідкометалевої ванни, що має малу глибину у водоохолоджувальному кристалізаторі, формує щільний злинок з дендритною структурою спрямованої кристалізації.

Наведена на рис. 1, в схема заміщення показує, що в печі ЕШП елементи електричного ланцюга підключено послідовно, тож умовою ефективною генерації тепла в місці плавлення електрода є максимальний опір шлакової ванни за мінімального опору інших складових. Тому в електричному ланцюгу електрошлакової печі шлакова ванна раціональної глибини (150...250 мм) повинна мати найвищий опір, завдяки чому саме в ній буде відбуватися максимальне тепловиділення за рахунок перетворення електричної енергії в теплову. Якщо опір шлакової ванни певного складу і глибини при температурах ведення процесу є недостатнім, то для забезпечення плавлення електрода глибину шлакової ванни доводиться збільшувати, що знижує енергоефективність

Г.П. Стовпченко — [orcid.org/0000-0002-6555-5715](https://orcid.org/0000-0002-6555-5715), А.В. Кадильникова — [orcid.org/0000-0003-2516-9825](https://orcid.org/0000-0003-2516-9825)

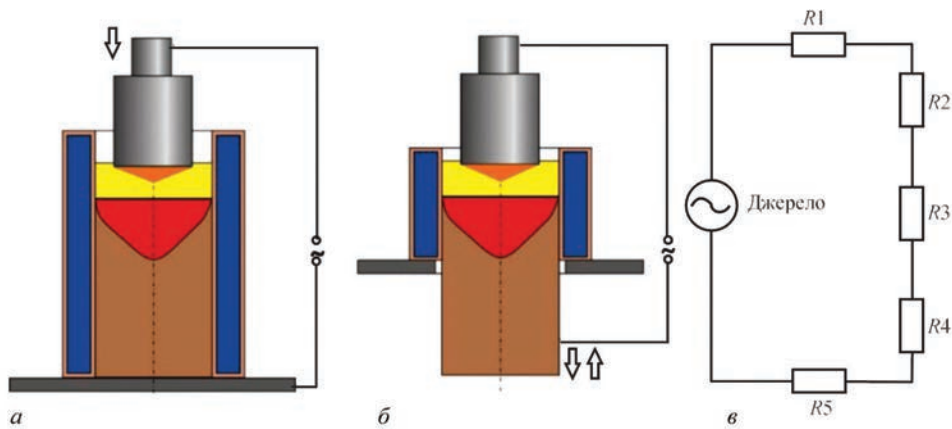


Рис. 1. Схема класичного ЕШП: *а* — в стаціонарному кристалізаторі з його заповненням; *б* — в короткому кристалізаторі; *в* — схема заміщення (*R1* — опір короткої мережі верхньої частини печі; *R2* — опір електрода; *R3* — опір шлакової ванни; *R4* — опір зливка; *R5* — опір короткої мережі нижньої частини печі)

переплаву за рахунок тепловтрат на охолодження в кристалізаторі. На печах з високим опором короткої мережі застосування шлаків з низьким опором призводить до втрати керованості процесом (система управління не реагує на заглиблення електрода) [10]. Тому електричні властивості шлаку є ключовими для забезпечення стабільного і енергоефективного процесу.

Шлак при ЕШП виконує і ряд інших функцій: рафінування металу від неметалевих включень [1–4, 10–12], газів і шкідливих домішок; захист рідкого металу від впливу атмосфери; забезпечення гладкої поверхні зливка; попередження виникнення поверхневих дефектів та ін.

Незважаючи на те, що сучасний ЕШП ведуть на змінному струмі, при проходженні його через шлаковий розплав і затверділий гарнісаж відбувається випрямлення його частини, що сприяє протіканню електрохімічних реакцій. Є відомості, що при електрошлаковому процесі на постійному струмі при зварюванні [13, 14] зміна полярності струму дає можливість зниження концентрації кисню (зворотна полярність) або водню (пряма полярність). Однак, незалежно від полярності, здатність ЕШП на постійному струмі до видалення неметалевих включень є нижчою, що додатково підтверджує доцільність застосування змінного струму [1–3, 15]. Ефекти зниження вмісту кисню на струмі низької частоти також свідчать про протікання при ЕШП електродних реакцій.

Відмінними рисами процесу електрошлакового переплаву є високі температури (1873...2273 К) і щільності струму на електродах. В таких умовах коли катод і анод являють собою рідкі метали практично одного хімічного складу, електродні процеси в шлаку можуть бути оборотними [16]. У той же час при постійному поступовому плавленні витрат-

ного електрода та затвердінні рідкометалевої ванни продукти можливих реакцій в металі видаляються з реакційної зони, а зміни складу шлакової ванни постійно накопичуються (останнє частково компенсують додаванням свіжого шлаку).

Сучасні знання про електрохімічні явища при ЕШП (поляризація, катодні і анодні процеси тощо) є недостатніми для повного розуміння ролі електрохімічних реакцій й процесів електролізу в шлаку, його впливу на параметри процесу і якість металу. Тому вивчення фізико-хімічних властивостей і електрохімічної поведінки високотемпературних оксидно-фторидних і оксидних розплавлених електролітів пристосовано до шлаків процесу ЕШП є актуальним.

**Структурно-чутливі фізико-хімічні властивості фторидно-оксидних шлаків.** У процесах ЕШП найчастіше використовують фторидно-оксидні електропровідні шлаки (найбільші долі займають фторид кальцію ( $\text{CaF}_2$ ) й оксиди кальцію ( $\text{CaO}$ ) і алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )), розплави яких є переважно іонними. Загально прийнято, що під дією електричного струму компоненти шлаків дисоціюють на позитивно заряджені катіони ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) і на негативно заряджені прості ( $\text{F}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$ ) або комплексні ( $\text{AlO}_3^{3-}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_5^{4-}$ ,  $\text{SiO}_4^{4-}$ ) аніони. Саме електрохімічне перенесення іонів визначає електропровідність шлаку, причому найбільший внесок вносять іони малих радіусів, такі як  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$  і  $\text{O}^{2-}$ . Підвищення вмісту в шлаку оксидів, схильних до утворення полімер-подібних структур ( $\text{AlO}_3^{3-}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_5^{4-}$ ,  $\text{SiO}_4^{4-}$ ), зменшує електропровідність за рахунок скорочення рухливості іонів (в тому числі і за причини більшої в'язкості). Автори роботи [17] стверджують, що електропровідність буде більшою саме при більш високій концентрації катіонів малого радіусу (що є дійсним для Li,

Na і K), проте в ряді Ba, Ca і Mg тенденція є зворотною. Ймовірно це пов'язано з ефектами збільшення поляризації зі зменшенням іонного радіусу, які також можуть впливати на рухливість катіонів.

Електропровідність бінарних розплавів на основі  $\text{CaF}_2$  при  $1700^\circ\text{C}$ , виміряна чотириелектродним методом зі змінним струмом авторами роботи [18], наведено на рис. 2.

Питома провідність цих бінарних розплавів зменшувалася зі збільшенням кількості добавок в наступному порядку:  $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{ZrO}_2 > \text{TiO}_2 > \text{BaO} > \text{MgO} > \text{BaF}_2 > \text{MgF}_2$ , за винятком додавання CaO. Помітне зменшення провідності спостерігалось при додаванні кислих оксидів, таких як  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  і  $\text{TiO}_2$ , в той час як добавки CaO провідність розплаву збільшували.

Важливою фізичною властивістю, що також впливає на процеси при ЕШП є в'язкість шлаку, яка також залежить від розміру іонів і електростатичних взаємодій між ними. Добре відомо [19–21], що силікатні, алюмінатні та алюмосилікатні шлаки мають досить високу в'язкість через утворення в них полімер-подібних структур.

Доволі часто властивості шлакових розплавів металургійного виробництва розглядають з початкової позиції, що шлак є склом, що притаманно силікатним розплавом. Так, частина дослідників описує вплив добавок в шлакові розплави, як додавання основних оксидів (наприклад  $\text{Ca}^{2+}$  або  $\text{Na}^+$ ) до силікатних, і, відповідно, стверджує, що при цьому відбувається руйнування силікатної сітки і в'язкість таких шлаків знижується, в тому числі завдяки здатності утворювати зв'язки з мостиковим киснем, з формуванням сітчастих структур з тетраєдрів  $\text{O}^{2-}-\text{Ca}^{2+}$  [22, 23]. За такої початкової позиції аніони кисню в залежності від їх зв'язку з сіткоутворюючими катіонами поділяються на три види: мостиковий аніон кисню, який розташований між двома катіонами кремнію (зв'язок  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ); не мостиковий аніон кисню, який знаходиться між катіоном кремнію і катіоном першої групи (зв'язок  $\text{Si}-\text{O}-\text{Me}$  (1)); вільний аніон кисню, що знаходиться між двома катіонами першої групи (зв'язок  $\text{Me}$  (1)– $\text{O}-\text{Me}$  (1)).

До аналогічного висновку приходять дослідники [24], які розраховували частки мостикового, не мостикового і вільного кисню за інтенсивністю чотирьох смуг комбінаційного раманівського розсіювання і складу скла. Вони узгоджуються з даними термодинамічної моделі для стекел  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ . При вмісті  $\text{CaF}_2$  менше 15...20 мол. % та основності менше одиниці він сприяв розриву зв'язків  $\text{Si}-\text{O}$ .

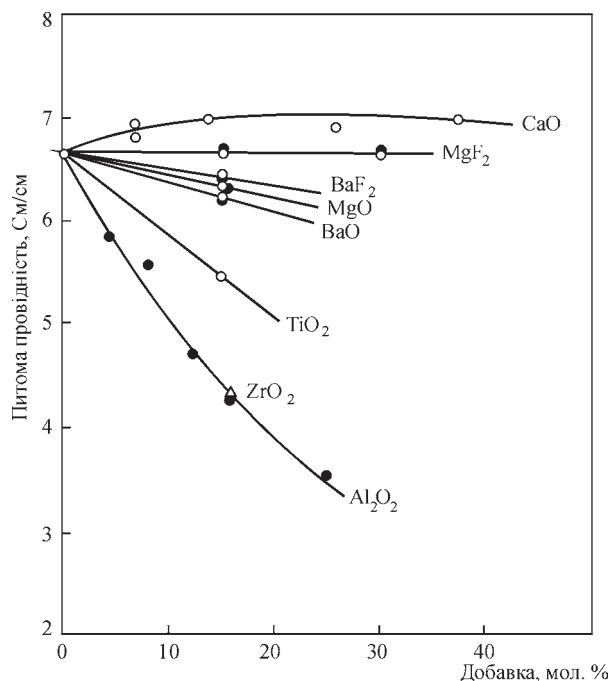


Рис. 2. Електропровідність розплавів фтористого кальцію за різної кількості добавок при  $1700^\circ\text{C}$

У недавньому моделюванні методом молекулярної динаміки [25] розраховували структуру розплаву з додавкою фтору у трикомпонентні шлакові системи  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$  і  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ . Аналіз координаційного числа сітчастого каркаса показав, що структура тетраедра  $\text{Si}-\text{O}$  більш стабільна, ніж структура тетраедра  $\text{Al}-\text{O}$ . Іони  $\text{F}^-$  в основному координуються з  $\text{Ca}^{2+}$ , існує динамічна рівновага між  $\text{Ca}^{2+}$  і координаційними аніонами ( $\text{O}^{2-}$  і  $\text{F}^-$ ) в обох системах, а загальне координаційне число зберігається між 6 і 7. Розподіл типів кисню показав, що ступінь полімеризації сітчастої структури в системі  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$  нижче, ніж в системі  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ . Хоча додавання  $\text{CaF}_2$  може знизити в'язкість обох систем шлаку, мікроскопічні причини цього зовсім різні. В системі  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$   $\text{CaF}_2$  фактично діє як сітчастий розчинник і створює простір, в якому частинки можуть рухатися довше, але в системі  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$  може деполімеризувати сітчасту структуру розплаву.

Хімічний стан фтору і вплив добавки фториду на ступінь полімеризації силікатної сітки були досліджені для стекел  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$  і  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2-\text{FeO}_x$  [26] (стосується й сталеплавильних шлаків) за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) і месбауерівської спектроскопії. Отримані спектри показали, що фтор в основному координується з кальцієм, а не з кремнієм, і що додавання  $\text{CaF}_2$  не деполімеризує силікатну сітку для обох досліджених систем. Висновки підтверджують наступний гіпотетичний

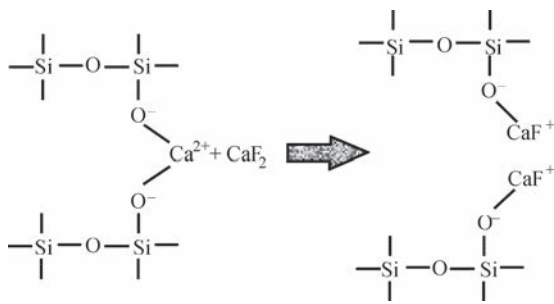


Рис. 3. Гіпотетичний ефект додавання CaF<sub>2</sub> на силікатну сітку [27]

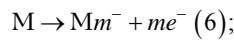
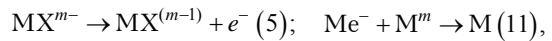
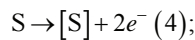
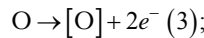
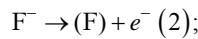
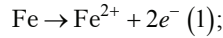
вплив CaF<sub>2</sub> на в'язкість: додавання CaF<sub>2</sub> руйнує електростатичні зв'язки між силікатними аніонами за рахунок дії двовалентних іонів кальцію, так як пари іонів CaF<sup>+</sup> додаються до силікатних аніонів (рис. 3). Оскільки це знижує опір руху, знижується в'язкість [25, 27].

Однак слід відмітити, що шлаки ЕШП можуть бути і склоподібними, і кристалічними в залежності від масової долі переважаючих компонентів. Вміст фтористого кальцію в них зазвичай є меншим за 30 % (частіше 50...75 %), а кількість оксидів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та SiO<sub>2</sub> зазвичай не перевищує 30 % сумарно. Тобто прямо переносити структурні оцінки, які було зроблено для силікатних розплавів з малим вмістом основних оксидів і фтористого кальцію, на шлаки ЕШП є неправильним, оскільки доля сіткоутворюючих оксидів в них зазвичай не перевершує 30 %. Аналогічно, опис властивостей з позиції «руйнації» силікатної сітки є недоконалим, більш природним є розгляд вірогідності її утворення у розплаві фторид–оксид кальцію.

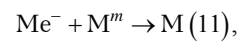
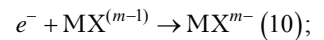
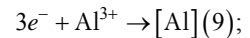
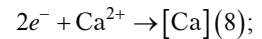
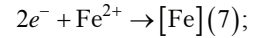
**Електрохімічні ефекти при протіканні струму в розплавах шлаку.** З огляду на іонну природу рідких шлаків [28, 29] взаємодія їх з металом також має електрохімічний характер, оскільки струм проходить через границю поділу двох контактуючих фаз: електронного (металу) і іонного (шлаку) провідників за допомогою реакцій Фарадея. Ос-

новні катодні і анодні реакції представлені нижче за даними А. Мітчелла [9]:

Анодні реакції:



Катодні реакції:



де М — метал; X — оксид або фторид; ( ) — «нейтральний» атом, розчинений в шлаку; [ ] — атом, розчинений в металі.

Так, деяке число частинок Me<sup>z+</sup> перейде з шлаку в метал, поверхня якого отримає надлишковий позитивний заряд. У поверхневому шарі шлаку при цьому з'явиться надлишок негативних іонів (аніонів), і, оскільки система в цілому залишається електронейтральною [30], виникає подвійний електричний шар (ПЕШ). Для опису властивостей ПЕШ використовують ряд теоретичних моделей [31]: Гельмгольца (рис. 4, а — модель конденсатора [32]), Гуї–Чепмена (рис. 4, б — дифузійний подвійний шар; Штерна (рис. 4, в — специфічна адсорбція). Будова ПЕШ визначається складом розплаву (розчину) і потенціалом електрода (його зарядом).

Модель Гельмгольца передбачає наявність шару заряду на поверхні електрода, на якій міцно утримуються іони протилежного заряду в електроліті [20], що еквівалентно простому конденсатору з паралельними пластинами. У випадку моделі Штерна заряди адсорбуються на поверхні електрода і міцно фіксуються на ній завдяки нерухомому шару протилежно заряджених іонів в розплаві (рис. 4, б). Модель Штерна додатково враховує тепловий рух іонів.

Формування ПЕШ на границі шлак–метал відбувається довільно, оскільки супроводжується зниженням енергії Гіббса системи [33]. Це зни-

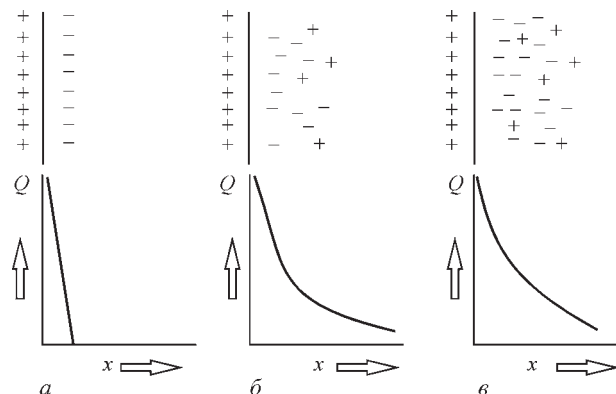


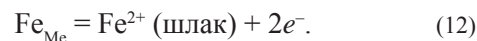
Рис. 4. Схематичне зображення моделей подвійного електричного шару: а — Гельмгольца; б — Гуї–Чепмена; в — Штерна; Q — електричний потенціал по товщині подвійного шару; x — відстань від поверхні електрода

ження проявляється головним чином в зменшенні міжфазного натягу внаслідок адсорбції компонентів металу і шлаку. Так само змінюється швидкість окислювально-відновних реакцій, міжфазного натягу, адгезії фаз і ряд інших характеристик системи. Подвійний електричний шар має велике значення для електрохімічних досліджень. По-перше, він робить можливим будь-які електродні реакції. Коли до границі розділу прикладається напруга 1 В у подвійному електричному шарі виникає надзвичайно сильне електричне поле зі щільністю 108 В/м. Без наявності подвійного шару ніякі іони або молекули не можуть залишатися на границі розділу. По-друге, подвійний шар впливає на динаміку електродних реакцій. Незважаючи на очевидну важливість ПЕШ для електрохімічних процесів, кількість публікацій з даного питання стосовно його ролі в пірометалургійних процесах дуже обмежена, що пов'язано як зі складнощами досліджень, так і активним перемішуванням, що забезпечує ефективний тепло- і масообмін на границі розподілу фаз.

**Ефект поляризації електродів і його прояв в процесах ЕШП-типу на постійному струмі.** Процес ЕШП сьогодні ведуть на змінному струмі саме через перемену складу шлаку в результаті електролізу, яка неминуха у разі застосування постійного струму. Однак в ранніх версіях процесу ЕШП застосовувався постійний струм, який може мати анодну (постійний струм прямої полярності (ПСПП)) і катодну (постійний струм зворотної полярності (ПСЗП)) полярності на витратному електроді. Ефекти поляризації при електрошлаковому процесі з використанням змінного струму виявляються менше через регулярну і часту зміну полярності. У практиці ЕШП зазвичай використовують змінний струм промислової (50...60 Гц) або низької (0,1...10 Гц) частот. Однак у зв'язку з тим, що час утворення приелектродного подвійного шару менше напівперіоду змінного струму промислової частоти, електролізні явища характерні і для цього випадку. Оскільки величина приелектродного падіння напруги залежить від густини струму, то при високих її значеннях відбувається інтенсивне виділення теплоти в приелектродній зоні. Дане явище може ініціювати дуговий розряд навіть біля поверхні електроду, який плавиться.

Експериментальні роботи для встановлення природи поляризації електродів в процесах ЕШП-типу на постійному струмі були зроблені А. Мітчеллом зі співавторами [8, 14, 34], які досліджували поляризацію на границі розділу залізо–шлак для ряду складів останнього на основі  $\text{CaF}_2$  й вперше припустили утворення шару

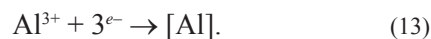
$\text{FeO}$  під електродом зворотної полярності (ЕШП ПСЗП). Тобто анодним процесом при ЕШП ПСЗП є корозія металу електроду (наприклад заліза), що призводить до насичення шару на поверхні катіонами (наприклад,  $\text{Fe}^{2+}$ ):



Відмічають, що окислення є притаманним ЕШП-типу процесам на постійному струмі незалежно від полярності витратного електроду [5].

Так, в роботі [35] відмітили вищий вміст кисню в зливку при ЕШП ПСЗП, ніж за прямої полярності. Крім того, в роботі [36] виявили більший вміст кисню в зливках ЕШП на прямій полярності із використанням шлаку ( $\text{CaF}_2$ –20 мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ніж шлаку ( $\text{CaF}_2$ –20 мас. %  $\text{CaO}$ ).

Вірогідною катодною реакцією вважають й відновлення активних металів (Al або Ca), що розчиняються в основному металі. У випадку сплавів на основі заліза найбільш вірогідним є відновлення Al, а у випадку сплавів на основі нікелю схема осадження включає Ca через його малий коефіцієнт активності в рідкому нікелі:

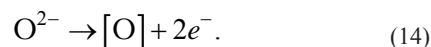


Вище зазначена схема реакції була підтверджена М. Етьєном [37] та К. Швердтфегером [38].

Катодна реакція має протікати дуже швидко [5]. За малих поляризаційних потенціалів дифузія до розділу фаз є швидкою, що є притаманним системі з нескінченною концентрацією катіонів.

Анодний процес супроводжується триступеневою послідовною поляризацією на границі розділу між залізним електродом і шлаками на основі  $\text{CaF}_2$ , оскільки густина струму зростає (рис. 5) [4].

У той же час М. Каваками [39] стверджує, що анодною реакцією має бути перехід кисню в розплав металу:



Результати моделювання переносу іонів, що зроблено авторами роботи [40] за даними [34], представлено на рис. 6.

Весь насичений шар заліза або його частина стає електропровідною і, отже, поверхня розподілу залізо–шлак не є електроактивною, а залізний електрод може поглинати кисень шляхом дифузії [14]. Дифузійне гальмування в шлаку призводить до підвищення приелектродного опору, що викликає перерозподіл джерел джоулевої теплоти в шлаковій ванні таким чином, що основне тепло виділяється в тонкому шарі біля поверхні електроду, тим самим інтенсифікуючи процес плавлення.

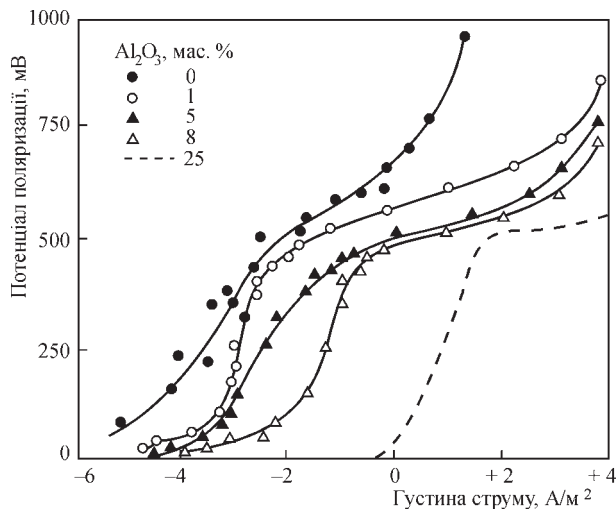


Рис. 5. Анодна поляризаційна поведінка поверхні заліза при гальваностатичних анодних імпульсах під час ЕШП в шлаку на основі  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

Найвища електропровідність шлаку спостерігається поблизу електрода, де величезна кількість  $\text{Fe}^{2+}$  вприскується в шлак.

В роботах [34, 41] показано, що додавання відносно невеликої кількості  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до  $\text{CaF}_2$  може значно знизити електропровідність рідкого шлаку внаслідок утворення складних іонів ( $\text{AlOF}^{-2}$ ), оскільки рухливість  $\text{F}^-$  знижується, що може бути причиною зміни електропровідності шлаку.

Електропровідність шлаку неоднорідна і зменшується зі збільшенням кількості складних іонних комплексів ( $\text{AlF}_3^{-6}$ ,  $\text{AlO}_2\text{F}_3^{-2}$ ,  $\text{AlO}_2\text{F}^{-3}$ ). Збільшення кількості  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаку приводить до подальшого

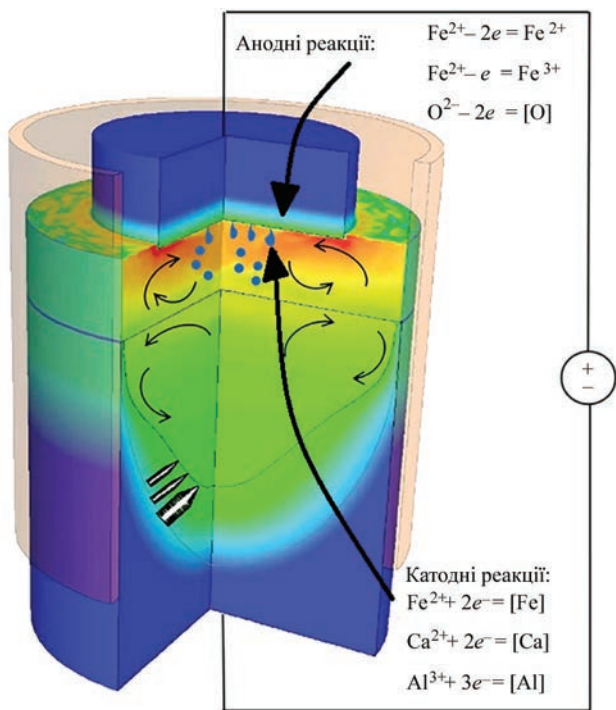


Рис. 6. Моделювання переносу іонів  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  при ЕШП-типу процесах на постійному струмі різної полярності [40]

утворення комплексних іонів, що в свою чергу додатково знижує рухливість  $\text{F}^-$  та електричну провідність [42].

Зі збільшенням температури іонна складова електропровідності шлаків зазвичай збільшується. Зроблені висновки знаходяться в рамках загальних постулатів фізичної хімії: зі збільшенням кількості великих складних (комплексних) аніонів рухливість катіонів зменшується, а опір шлакової ванни і кількість виробленого струмом тепла збільшуються, що дозволяє очікувати поліпшення теплової ефективності, рафінуючої здатності процесу і умов для відновлення легуючих елементів [29].

**Залежність вмісту сірки кисню від полярності струму при ЕШП.** Як було показано вище, при використанні постійного струму в процесі переплаву може відбуватися окислення і, відповідно, небажана втрата активних елементів (Ti, Si, Al), що є серйозною проблемою [37]. Якщо на електрод подається анодний струм, аніони, такі як  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{N}^-$ ,  $\text{OH}^-$ , притягуються до електрода. Ці аніони абсорбуються плівкою рідкого металу на кінці електрода і переносяться разом з краплею металу в металеву ванну під шлаком, що знижує чистоту металу зливка за вмістом кисню і сірки [43].

Подача катодного струму на електрод напроти призводить до хорошого знесірчення і високого рівня чистоти металу. З іншого боку, при катодній полярності швидкість плавлення буде низькою, а питоме енергоспоживання високим, що робить процес ЕШП з катодним струмом економічно не вигідним.

М. Кавакамі [39, 44] перший виявив залежність швидкості плавлення електрода від його полярності (катодна полярність, постійний струм з прямою полярністю). Пояснення явища полягає в тепловому ефекті, який безпосередньо пов'язаний з електрохімічними реакціями на границях розподілу електрод-шлак і шлак-метал, які створюють більше перенапруження на аноді, ніж на катоді. Анодна реакція так само є більш екзотермічною, ніж катодна, що пов'язано з електричним опором приграничних шарів при реакціях Фарадея [34]. При позитивній роботі електрода додаткове тепло виділяється безпосередньо під електродом, що призводить до прискорення швидкості плавлення. Так само автори робіт [36, 45] відзначають, що кількість включень залежить від вмісту глинозему в шлаку при процесах ЕШП постійного струму. Швидкість плавлення електрода ЕШП з позитивною полярністю (анодна, постійний струм зворотної полярності) вища за таку у електрода з негативною полярністю.

Автори робіт [46-48] наводять розрахункові дані, згідно з якими частота змінного струму переплаву

впливає на електрохімічні показники процесу, причому ступінь такого впливу залежить від оборотності циклічного процесу (симетричності анодного і катодного періодів). При зниженні частоти струму відбувається відтік іонів  $Fe^{2+}$  з локальної електрохімічної системи в зоні реакції. Механізми поляризації, що діють при ЕШП на змінному струмі промислової частоти, призводять до набагато менших змін концентрацій, ніж на постійному або змінному струмі зниженої частоти. Зміни характеризуються невеликими, але помітними відхиленнями від термодинамічних розрахунків авторів.

На практиці діапазон частот, в якому електрохімічні ефекти починають активно проявлятися, становить 3...5 Гц. Ефективне випрямлення струму схоже з явищем, яке спостерігається при використанні постійного струму. У цьому випадку присутнє значне випрямлення змінної складової струму, що йде на стінку кристалізатора, що ініціює електрохімічні реакції на ділянках кристалізатор–електрод–зливков [49], точний механізм яких поки не відомий.

Існує можливість зниження концентрації кисню в залежності від зміни полярності струму. Використання позитивної полярності електрода (DC +) призводить до більш низького вмісту кисню в зливку, ніж при негативній полярності (DC –). Те, що концентрації сірки і кисню в зливку сильно залежать від полярності електрода під час переплаву, підтверджує і робота [35]. Кращу десульфуріацію у зливку, отриманому при ЕШП з негативною полярністю електрода, також показано в роботі [50]. Позитивні електроди і електроди без струму дають порівняно невелике видалення сірки. Ступінь десульфуріації при ЕШП на змінному струмі набагато вище, ніж у ЕШП з постійним струмом обох полярностей (рис. 7) [51].

Зворотна полярність сприяє більш високому ступеню десульфуріації при ЕШП, ніж пряма. Ці результати узгоджуються зі спостереженнями авторів роботи [52], які досліджували вплив типу та полярності електричного струму на вміст сірки в зливках ЕШП в сплаві Вуда (рис. 8).

При ЕШП зі струмом зворотної полярності електрони рухаються від сталевго електрода (катада) до зливка через шар шлаку, де відбуваються електролітичні процеси, завдяки чому сірка видаляється з рідкої сталі. На відміну при ЕШП на постійному струмі прямої полярності аніони  $S^{2-}$  притягуються до електрода (анода) [52]. Ці аніони адсорбуються плівками рідкого металу на кінчику електрода і переносяться з краплями металу в ванну рідкого металу, що призводить до високого вмісту сірки. Отже, ступінь знесірчення на постій-

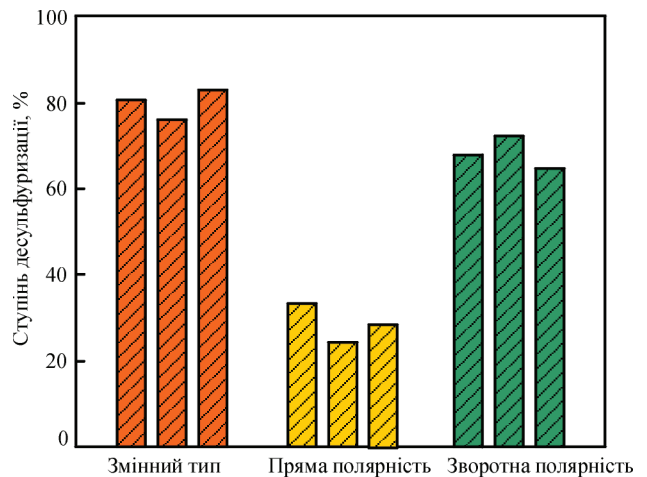


Рис. 7. Вплив типу та полярності електричного струму на ступінь десульфуріації ЕШП

ному струмі прямої полярності набагато нижче, ніж при зворотній (рис. 8).

В роботі [53] також показано, що вміст сірки при плавленні на постійному струмі обох полярностей нижче, ніж в разі змінного струму. Автори прийшли до висновку, що максимальне знесірчення в процесі ЕШП на змінному струмі становить 83 %, а на постійному струмі прямої і зворотної полярностей — 33 і 72 % відповідно. В роботі [54] показано, що ступінь видалення сірки збільшується з 82 до 88 % при зміні струму з 1200 до 1500 А, а потім знижується до 65%, якщо струм постійно збільшується до 2400 А.

Швидкість електрохімічного переносу на границі розділу металева ванна–шлак більша при переплаві з ПСЗП [55], в той час як при переплаві з ПСПП швидкість електрохімічного переносу на цій границі мала. Таким чином, процес знесірчення при ЕШП ПСЗП становить близько 70 %, а при ЕШП ПСПП — 40 %.

Тип джерела струму (постійного струму, перемінного струму на промисловій та понижений час-

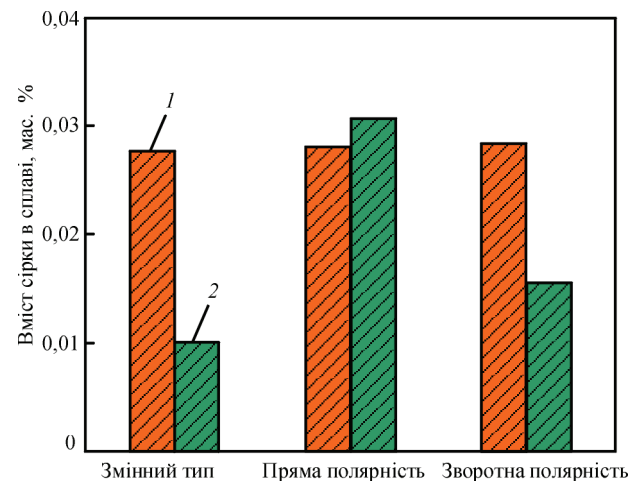


Рис. 8. Вплив типу і полярності електричного струму на вміст сірки в зливках ЕШП: 1 — електрод; 2 — зливков ЕШП [53]

татах) чинить суттєвий вплив на вміст неметалевих включень в зливках ЕШП. Найбільш яскраво спостережені відмінності виражені для оксидних включень. В роботі [56] показано, що при переплаві на постійному струмі негативної полярності кількість переважаючих в електроді оксидів типу (Al, Mg)-шпінелі зберігається, а при переплаві на струмі позитивної полярності вони змінюються на включення типу  $Al_2O_3$ , кількість яких дещо збільшується. При переплаві на перемінному струмі 1 Гц доля (Al, Ca, Mg)-(Al, Ca)-оксидів збільшилась, а (Al, Mg)-оксидів зменшилась.

Зміна типу оксисульфідних включень є практично однаковою для всіх видів струму: притаманні електроду Al- (35 %) й Ca- і Mg-оксисульфідів, змінилися на 90 % Al-оксисульфідів. Після переплаву доля сульфідів кальцію (70 % CaS в металі електроду) зменшилась й натомість виросла доля MnS й (Ca, Mn)-сульфідів. Цей ефект найбільш проявився при переплаві на постійному струмі.

Рафінуючий ефект для обох полярностей постійного струму (катодна і анодна) більш виражений, ніж при застосуванні низькочастотного джерела живлення змінного струму. В той час, при використанні катодної полярності постійного струму рівень чистоти вищий, ніж при анодній [56].

Автори роботи [57] вивчали ефекти зміни частоти від 1,0 до 4,5 Гц на поведінку при переплаві та розподіл неметалевих включень при ЕШП інструментальної сталі для гарячої обробки. Було встановлено, що вміст оксидних неметалевих включень значно зменшується зі збільшенням частоти, що добре корелює з вмістом кисню. У той же час збільшується кількість оксисульфідів. Склад неметалевих включень залежить також від застосовуваної частоти. Починаючи з багатих  $Al_2O_3$  оксидів при частоті 1 Гц, склад зміщується в бік більш високого вмісту MgO (тип шпінелі) і оксидів, багатих CaO, при більш високій частоті.

Дослідники роботи [58] показали, що вміст крупних включень у зливку ЕШП штампової сталі Н13 залежить від умов ведення процесу, зокрема, він зменшився приблизно на 66,18 %, коли кількість шлаку збільшили з 17,85 до 20,50 кг. Крім того, при збільшенні середнього струму з 4 до 5 кА вміст великих неметалевих включень в зливку ЕШП Н13 знизився приблизно на 51,38 %.

Дослідження [44] переплаву на постійному струмі навпаки показали, що вміст неметалевих включень значно збільшився, коли сталевий стрижень з Fe-Ni переплавляли способом ЕШП. При цьому трохи збільшився вміст кремнію, а вміст марганцю і сірки не змінився. Загальний вміст алюмінію в зливку не перевищував 0,7 %, тоді як

в електроді було лише 0,001 %. Вміст включень залежав і від вмісту глинозему в шлаку. Однак при переплаві електрода з простої вуглецевої сталі збільшення вмісту неметалевих включень становило всього одну десяту від такого для Fe-Ni електрода, й в обох випадках кількість неметалевих включень від полярності електрода не залежала.

Автори у своїй роботі [46] також показали, що зі зменшенням частоти електромагнітні сили стають більш потужними, температура в шлаковій ванні більш однорідною, глибина ванни розплавленого металу зменшується. Зі зменшенням частоти струму відбуваються електрохімічні реакції і атомарний кисень, який утворився в результаті електролізу, розчиняється у ванні розплавленого металу, що веде до збільшення вмісту дисперсних (2...3 мкм) рівномірно розподілених в зливку неметалевих включень.

Таким чином, аналіз результатів розрахунків і експериментальних досліджень показує можливість електрохімічного легування металу при переплаві на постійному струмі, а також використання ефекту зниження вмісту кисню і сірки при цьому. Зниження вмісту кисню і неметалевих включень під час процесу ЕШП має велике значення, оскільки ЕШП часто є останньою технологічною процедурою рафінування рідкої сталі в процесі виробництва високоякісних металовиробів.

Слід відмітити, що електроліз оксидних розплавів [59, 60] сьогодні вважають перспективним клімат-нейтральним процесом, що здатен змінити майбутнє металургійного виробництва. Тому наші подальші дослідження буде зосереджено на моделюванні електрохімічних явищ в шлаках з метою підвищення ефективності ЕШП та, можливо, створення нового гібридного процесу, який би дозволив використати переваги електрохімічного відновлення, легування та/або рафінування для одержання високоякісної сталевих продукції.

## Висновки

В даний час розуміння основ електрохімії, механізму реакцій і ролі електролізу при ЕШП ще не є повним, але постійно ведуться все нові дослідження цих феноменів. Виконаний огляд і аналіз літературних даних дозволяє зробити наступні висновки.

1. ЕШП не є електролітичним процесом за призначенням і катодне виділення металу не є його основним завданням. Проте електрохімічні явища, які відбуваються в шлаку і при його взаємодії з металом слід враховувати, оскільки вони можуть чинити серйозний вплив на стабільність процесу, склад і властивості одержуваного металу.



2. У світі ведуться дослідження явищ електролізу пристосовано до процесу та шлаків ЕШП на постійному струмі. Дослідження впливу полярності електрода та частоти струму дозволяє поглибити наукові знання про електрохімічну природу явищ в процесі ЕШП, механізм і прояви електрохімічних реакцій, вплив умов організації процесу переплаву на швидкість плавлення витратного електрода та чистоту металу за вмістом домішок і неметалевих включень.

3. Проведений аналіз свідчить про додаткові можливості електрохімічного відновлення, легування і рафінування металу при застосуванні постійного струму, що створює передумови розробки нового гібридного клімат-нейтрального процесу, який би суміщав електроліз шлаку і переплав металу для досягнення максимальної ефективності одержання металу високої якості.

### Список літератури/References

1. Paton, B.E., Medovar, B.I. (1981) *Electroslag metal*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Medovar, B.I., Shevtsov, V.L., Marinsky, G.S. et al. (1978) *Thermal processes in ESR*. Ed. by B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgy [in Russian].
4. Nafziger, R.H. (1976) *The electroslag melting process*. United States Bureau of Mines, Bulletin 669, Washington.
5. Medovar, L.B., Saenko, V.Ya., Stovpchenko, A.P. et al. (2010) Electroslag technologies for producing large forging ingots. *Modern Electrometallurgy*, **3**, 5–10 [in Russian].
6. Holzgruber, V. (1977) Possibilities and limitations of the impact on the structure and properties of ESR ingots. *Electroslag remelting*. Kiev, Naukova Dumka, 60–75 [in Russian].
7. Mitchell, A., Bell, M. (1972) Origin of Oxide Inclusions in Ingots Made by the Electroslag Process. *Canadian Met. Quart.*, **11**(2), 363–369.
8. Mitchell, A., Jackson, R.O., Balantine, A.S. (1975) Macro-segregation, fluid motion and heat transfer in the ESR process. *Electroslag remelting*. Kiev, Naukova Dumka, 29–38 [in Russian].
9. Klyuev, M.M., Volkov, S.E. (1984) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgy [in Russian].
10. Medovar, L., Petrenko, V., Sybir, A., Stovpchenko, G. (2014) Quality and efficiency of ESR ingots production. In: *Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Ingot Casting Rolling and Forging (ICRF-2014)*, Milan, 7–9 May 2014, Italy.
11. Stovpchenko, G.P., Lisova, L.O., Goncharov, I.O., Gusiev, I.V. (2018) Physico-chemical properties of the ESR slags system  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}(\text{MgO}, \text{TiO}_2)$ . *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **89**(2), 64–72.
12. Mitchell, A. (2005) Slag functions in the ESR process. LMPC 2005 — Proceedings of the 2005. *Inter. Symp. on Liquid Metal Processing and Casting*, 195–200.
13. Paton B.E. (1974) *Technology of electric welding of metals and alloys by fusion*. Moscow, Mechanical engineering [in Russian].
14. Mitchell, A., Beynon, G. (1971) Electrode polarization in the DC electroslag melting of pure iron. *Metall. Transact.*, **2**, 3333–3345.
15. Medovar, B.I., Tsykulyenko, A.K., Dyachenko, D.M. (1990) *The quality of electroslag metal*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova dumka [in Russian].
16. Lepinskikh, B.M., Istomin, C.A. (1984) *Electrochemical alloying and modification of metal*. Moscow, Nauka [in Russian].
17. Farahat, R., Eissa, M., Megahed, G. et al. (2019) Effect of EAF Slag Temperature and Composition on its Electrical Conductivity. *ISIJ Intern.*, **59**(2), 216–220.
18. Hara, Sh., Hashimoto, H., Ogino, K. (1983) Electrical Conductivity of Molten Slags for Electroslag Remelting. *Transact. ISIJ*, **23**, 1053–1058.
19. Kenneth, C., Mills, K.C. (1993) The Influence of Structure on the Physico-chemical Properties of Slags. *ISIJ Inter.*, **33**(1), 148–155.
20. Mills, K.C. Yuan, L., Jones, R.T. (2011) Estimating the physical properties of slags. *J. of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, **111**, 649–658.
21. Mills, K.C., Yuchu, S.U., Zushu, L.I., Brooks, R.F. (2004) Equations for the Calculation of the Thermo-physical Properties of Stainless Steel. *ISIJ Intern.*, **44**(10), 1661–1668.
22. Park, J.H., Dong, J.M., Joon, M., Song, H.S. (2002) The effect of  $\text{CaF}_2$  on the viscosities and structures of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-}(\text{MgO})\text{-CaF}_2$  slags. *Metallurgical and Materials Transactions. Process Metallurgy and Materials Processing Science*, **B. 33B**(5), 723–729.
23. Schwenk, M., Bernd, F. (2016) *Role and effects of slag components in ESR processes*.
24. Tsunawaki, Y., Iwamoto, N., Hattori, T., Mitsuishi, A. (1981) Analysis of  $\text{CaO-SiO}_2$  and  $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$  glasses by Raman spectroscopy. *J. of Non-Crystalline Solids*, **44**(2–3), 369–378.
25. Zhang, X., Liu, Ch. (2020) Effect of Fluorine on Melt Structure for  $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$  and  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$  by Molecular Dynamics Simulations. *ISIJ Inter.*, **60**, 2176–2182.
26. Hayashi, M., Nabeshima, N., Fukuyama, H., Nagata, K. (2002) Effect of Fluorine on Silicate Network for  $\text{CaO-CaF}_2\text{-SiO}_2$  and  $\text{CaO-CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-FeO}_x$  Glasses. *Ibid.*, **42**, 352–358.
27. Seetharaman, S., Teng, L., Hayashi, M., Wang, L. (2013) Understanding the Properties of Slags. *Ibid.*, **3**, 1–8.
28. Yesin, O.A. (1946) *The electrical nature of liquid slag*. Sverdlovsk, Publishing house of the House of Technology of the Ural Industrial Institute by Kirov [in Russian].
29. Esin, O.A., Geld, P.V. (1966) *Physical chemistry of pyrometallurgical processes*. 2<sup>nd</sup> ed. Rev. and additional. Moscow, Metallurgy [in Russian].
30. Frumkin, A.N., Bagotsky, V.S., Iofa, Z.A., Kabanov, B.N. (1952) *Kinetics of electrode processes*. Moscow, Moscow University Press [in Russian].
31. Hamann, W. (1985) Vielstich: Elektrochemie I — Elektrolytische Leitfähigkeit, Potentiale, Phasengrenzen, aus der Reihe: taschentext, 2. überarbeitete Auflage. VCH-Verlagsgesellschaft. *Weinheim*, **90**(2), 20–25.
32. Rieger, P. H. (1994) *Electrochemistry*. Chapman and Hall, One Penn Plaza. New York, London.
33. Popel, S.I., Sotnikov, A.I., Boronenkov, V.N. (1986) *Theory of metallurgical processes*. Moscow, Metallurgy [in Russian].
34. Mitchell, A. (2016) Electrochemical Aspects of the ESR Process. IOP Conference Series. *Materials Sci. and Engineering*, 143–156.
35. Kato, M., Hasegawa, K., Nomura, S., Inouye, M. (1983) Transfer of Oxygen and Sulfur during Direct Current Electroslag Remelting. *Transact. ISIJ*, **23**(7), 618–627.
36. Kojima, Y., Kato, M., Nomura, S., Inouye, M. (1977) On the Oxygen Transfer during Direct Current Electroslag Remelting of Carbon Steel. *J. Stage*, **63**(13), 2191–2197.

37. Etienne, M. (1970) *The loss of reactive elements during electroslag processing of iron-base alloys*. Ph.D. Thesis, University of British Columbia.
38. Schwerdtfeger, K., Norbert, N., Detief, K. (1982) Archiv fur das Eisenhüttenwesen. *Wiley Online Library*, **53**, 463–468.
39. Kawakami, M., Nagata, K., Murayama, M. et al. (1973) Tet-su-to-Hagane. *J. Iron Steel Inst.*, **63**, 2161–2171.
40. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. et al. (2017) Toward Modeling of Electrochemical Reactions during Electroslag Remelting (ESR) Process. *Steel Research Inter.*, **88(5)**, 1–8.
41. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. et al. (2019) Modeling electrochemical transport of ions in the molten  $\text{CaF}_2\text{-FeO}$  slag operating under a DC voltage. *Applied Mathematics and Computation, Elsevier*, **357(C)**, 357–373.
42. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. et al. (2020) A Numerical Investigation on the Electrochemical Behavior of  $\text{CaO}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the ESR Slags. *Metallurgical and Materials Transact. B*, 871–879.
43. Matthew, J.M., Krane, A., Jardy, Williamson, L., Beaman, J. (2013) *Proceedings of the 2013 Inter. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Edited, Springer International Publishing.
44. Kawakami, M., Takenaka, T., Ishikawa, M. (2002) Ironmaking Steelmaking Electrode reactions in dc electroslag remelting of steel rod. *Ironmaking & Steelmaking*, **29(4)**, 287–292.
45. Kharicha, Ab., Wu, M., Ludwig, A. et al. (2012) Influence of the Frequency of the Applied AC Current on the Electroslag Remelting Process. *Modeling and Simulation in Materials Processing*, 13–19.
46. Chang, L. et al. (2009) Effect of low-frequency AC power supply during electroslagremelting on qualities of alloy steel. *J. of Iron and Steel Research Inter.*, **16**, 7–11.
47. Mitchell, A., Nafziger, R. H. et al. (1977) Electrochemical Reactions in Electroslag Process. Bulletin 669, *The Electroslag Melting Process*, Albany Metallurgy Research Center, Albany, Oreg., CH.2, 15–25.
48. Kharicha, A., Ludwig, A., Wu., M. (2005) Simulation of droplet formation during DC Electroslag remelting process. In: *Proc. of 1st Inter. Conf. Brno, 25–27 October 2005*, 343–360.
49. Kharicha, A., Alemany, A., Bornas, D. (2005) Hydrodynamic Study of a Rotating MHD Flow in a Cylindrical Cavity by Ultrasound Doppler Shift Method. *Inter. J. of Engineering Sci.*, 589–615.
50. Minh, N.O., King, T.B. (1979) The contribution of electrochemical reactions to sulfur transfer from electrode to slag in electroslag remelting. *Metall. Transact. B*, **10**, 623.
51. Zhang, J.W., Guo, P.M., Li, Z.B. (2000) Study on electro-capillary oscillation in ESR system. *Iron Steel*, **35(5)**, 23–26.
52. Shi, Cheng-bin, Huang, Yi, Zhang, Jian-xiao, Li, Jing, Zheng, Xin. (2021) Review on desulfurization in electroslag remelting. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **28(1)**, 18–29.
53. Aksenov, I.A., Matveeva, M.A., Chumanov, I.V. (2019) Influence of the ESR parameters on the removal of sulfur. *Russ. Metall.*, **6**, 601–607.
54. Wang, Q., Liu, Yu, He, Zhu et al. (2017) Numerical Analysis of Effect of Current on Desulfurization in Electroslag Remelting Process. *ISIJ Inter.*, **57**, 329–336.
55. Wang, Q., Liu, Yu, Wang, F. et al. (2017) Numerical Study on the Effect of Electrode Polarity on Desulfurization in Direct Current Electroslag Remelting Process. *Metallurgical and Materials Transact. B*, **48(5)**, 2649–2663.
56. Paar, A., Schneider, R., Zeller, P. et al. (2013) Influence of the Polarity on the Cleanliness Level and the Inclusion Types in the ESR Process. In: *Proc. of Int. Symp. on Liquid Metal Processing*, 29–36.
57. Reinhold, S. E., Schneider, M., Müller, P. et al. (2016) Effects of Low Frequency Alternating Currents on the Electro-Slag Remelting Process. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, **1**, 20–26.
58. Du, G., Li, J., Wang, Zhong-Bing (2018) Effect of Operating Conditions on Inclusion of Die Steel during Electroslag Remelting. *ISIJ Inter.*, **58(1)**, 78–87.
59. Wang, H., Jang, Y.I., Huang, B. et al. (1999) TEM study of electrochemical cycling-induced damage and disorder in  $\text{LiCoO}_2$  cathodes for rechargeable lithium batteries. *J. of Electrochemical Society*, **146(2)**, 473–480.
60. Wang, D, Gmitter A., Sadoway D. (2011) Production of oxygen gas and liquid metal by electrochemical decomposition of molten iron oxide. *Ibid.*, **158(6)**, 51–54.

## ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN ELECTROSLAG MELTING (REVIEW)

G.P. Stovpchenko, A.V. Kadilnikova

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

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

Electroslag remelting is the leading processes of special melting for high-quality steels and alloys production. In terms of mechanical (especially plasticity), service properties, density and cleanness, the ESR steels significantly shift the similar materials produced by methods of traditional metallurgy. The degree of steel composition refining depends on slag chemistry and properties, which determine the thermal efficiency and affects the temperature regime of a metal bath and conditions of an ingot solidification. Electrolysis is not the primary process and purpose of ESR; however, since the transfer of electric current in molten slags is carried out by ions mainly, the electrochemical reactions change the composition of both the slag and metal. The article analyzes state-of-the-art research revealing the nature of electrochemical processes and the main cathodic and anodic reactions at the ESR-type processes using direct current, in view of the possibilities of obtaining less sulphur and oxygen content in the steel. The effect of direct current polarity onto an electrode melting rate are considered. The topical issues for further research on the electrochemical side of the ESR process have been outlined in order to increase its efficiency and create new applications of the process. Ref. 60, Fig. 8.

*Keywords:* electroslag remelting; slag; ionic melt; electrochemical; cathodic and anodic reactions; electrical conductivity; viscosity; electrode polarity

Надійшла до редакції 23.06.2021