

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЛЕГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ ВИСОКОХРОМИСТОЇ БОРВМІСНОЇ СТАЛІ

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

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

Представлено результати дослідження у лабораторних умовах поведінки легувальних елементів у високохромистій борвмісній сталі під час електрошлакового переплаву із використанням безкремністих флюсів. Вивчено вплив складу шлаку та окисного потенціалу атмосфери на втрати елементів. Захист плавильного простору аргоном в процесі електрошлакового переплаву дозволив суттєво знизити втрати металом бору та інших активних елементів. Показано, що переплав із застосуванням безкремністого флюсу 33 % CaF_2 – 33 % CaO – 33 % Al_2O_3 – 1 % V_2O_5 у поєднанні із захистом плавильного простору аргоном забезпечує стабільність вмісту в металі нікелю, молібдену, кобальту та ніобію, але супроводжується втратами марганцю, хрому, кремнію та бору. Додавання 1 % оксиду бору до шлаку зменшило втрати бору металом удвічі. Встановлено, що нестабільний електричний режим переплаву призводить до зростання втрат елементів, схильних до окиснення. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації складу шлаків і режимів переплаву з метою мінімізації втрат легувальних елементів у борвмісних сталях під час електрошлакового переплаву. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: електрошлаковий переплав, борвмісна сталь, безкремністий флюс, окиснення домішок, хімічний склад металу

Вступ. Додавання невеликих кількостей бору до складу жароміцних корозійностійких високолегованих сталей розглядається як ефективний підхід до підвищення їх механічних властивостей [1, 2]. Бор у малих концентраціях стабілізує карбіди та сповільнює ріст зерна, що сприяє збереженню дрібнозернистої структури і підвищенню тривалої міцності [3]. Водночас у процесі виробництва необхідно забезпечувати утримання бору у вузькому цільовому діапазоні, оскільки відхилення від оптимального вмісту може зумовити деградацію механічних та експлуатаційних характеристик сталі.

Бор у сталях є елементом, схильним до ліквідації, оскільки має дуже малу розчинність у фериті та аустеніті й низький коефіцієнт розподілу між твердою та рідкою фазами ($k < 0,05$) [1, 4]. У процесі кристалізації він концентрується у залишковому розплаві, що призводить до локального збагачення й утворення боридних фаз у кінцевих ділянках затвердіння. Це може спричинити зниження пластичності та в'язкості. Тому в жароміцних і конструкційних сталях вміст бору зазвичай обмежують (0,005...0,02 %) та компенсують ліквідацію легування елементами, які зв'язують бор у стабільні сполуки.

Електрошлаковий переплав є провідним методом отримання високоякісних сталевих злитків, який майже повністю усуває прояви грубої макросегрегації та усадкових дефектів у великих сталевих злитках, забезпечує кращу мікроструктуру металу, меншу кількість, розміри та більш рівномірне розподілення неметалевих включень, ніж у литих

злитках [5, 6]. Однак в процесі переплаву легованих сталей виникають певні труднощі з точки зору забезпечення цільового хімічного складу злитка. Під час електрошлакового переплаву можливе окиснення компонентів сплаву з високою спорідненістю до кисню — Al, B, Si, Nb та Mn. Ці особливості слід враховувати при виборі шлакової системи для електрошлакового переплаву. Хімічний склад шлаку визначає характер і напрямок протікання фізико-хімічних процесів та характеристики неметалевих включень. Фізичні властивості шлаку також впливають на формування поверхні злитка. Отже, рідкий шлак відіграє провідну роль у формуванні металургійних властивостей злитка, отриманого в процесі електрошлакового переплаву [5].

Вплив хімічного складу шлаків та його властивостей на якість злитків ЕШП був предметом чисельних досліджень [6–10]. Для переплаву хромо-молібденових сталей зазвичай використовують шлаки системи CaF_2 – CaO – Al_2O_3 – SiO_2 (– MgO) [11].

Одним з ефективних способів зменшення втрат хімічно активних елементів, розчинених в металі, під час електрошлакового переплаву є додавання до складу шлаку певної кількості сполук, що беруть участь у відповідних окислювально-відновних реакціях. Основна ідея полягає у підтриманні під час плавки рівноваги між окисно-відновними реакціями у системі метал–шлак. За таких умов концентрація хімічно активних елементів в металі злитка залишається стабільною.

Ю.В. Костецький — <https://orcid.org/0000-0003-0742-0684>, Є.О. Педченко — <https://orcid.org/0000-0002-8824-4389>,

В.П. Петренко — <https://orcid.org/0000-0003-2440-1901>, Г.О. Полішко — <https://orcid.org/0000-0001-7543-280X>,

В.А. Зайцев — <https://orcid.org/0000-0003-2498-8191>, Д.І. Трикозенко — <https://orcid.org/0009-0008-7858-7581>

Однак забезпечення рівноваги окисно-відновних реакцій у системі шлак–метал під час переплаву борвмісних легованих сталей є складним завданням. Зокрема, оксид кремнію шлаку здатен реагувати з розчиненим у металі бором за реакцією [12]:



Відповідно до рівняння хімічної реакції (1) для рівноважної концентрації бору в металі можна записати таке співвідношення:

$$\ln[\%B] = \frac{1}{4} \times \left(\ln \frac{a^2_{(\text{B}_2\text{O}_3)}}{a^3_{(\text{SiO}_2)}} + 3\ln[\%Si] + 3\ln f_{\text{Si}} - 4\ln f_{\text{B}} + \frac{\Delta G^\circ}{RT} \right), \quad (2)$$

де a_i — активність компонента i в шлаковій фазі; f_i — коефіцієнт активності компонента i в металевій фазі по відношенню до стандартного стану 1 мас. %; ΔG° — стандартна зміна енергії Гіббса реакції (1), Дж/моль; T — абсолютна температура, К.

Зі співвідношення (2) випливає, що відношення активностей B_2O_3 і SiO_2 у шлаку регулює розподіл бору між металом і шлаком. Додавання певної кількості оксиду бору до складу шлаку може запобігти його втраті металом. Зі співвідношення (2) наочно випливає, що зменшення активності оксиду кремнію в шлаку сприяє підвищенню рівноважної концентрації бору в металі. Відповідно, шлак із високою основністю та низькою активністю SiO_2 є вигідним з точки зору зменшення втрат бору металом під час переплаву. Як показують результати досліджень, підвищена основність шлаку також сприяє зменшенню втрат Mn та Nb через окиснення [8, 12]. Надмірна концентрація оксиду кремнію в шлаку сприяє зростанню окисненості в системі метал–шлак внаслідок розвитку реакції окиснення алюмінію металу:



Таким чином, для зменшення втрат бору у хімічному складі шлаку необхідно мінімізувати вміст SiO_2 та додавати B_2O_3 .

Метою дослідження було експериментальне визначення втрати бору та інших легувальних елементів внаслідок окиснення під час електрошлакового переплаву високохромистої борвмісної сталі із застосуванням безкремністих флюсів.

Методика досліджень. Дослідні плавки проводили на лабораторній установці електрошлакового переплаву типу УШ-114, яка дозволяє виплавляти дрібні злитки з дотриманням вимог сучасної технології. Джерелом живлення установки слугував однофазний зварювальний трансформатор ТШС-3000-1 зі ступінчатим регулюванням вторинної напруги.

Під час дослідних плавок на установці УШ-114 здійснювали електрошлаковий переплав литих електродів діаметром 40 мм та довжиною близько 700 мм, виготовлених із високохромистої сталі експериментального складу, отриманої індукційною плавкою. Вивчали вплив умов переплаву на втрати легувальних елементів внаслідок окиснення під час переплаву. Для цього проводили серію плавок із використанням безкремністих флюсів двох типів: флюсу на основі чистого CaF_2 , який моделював флюс типу АНФ-1, та комплексного флюсу складу 33 % CaF_2 — 33 % CaO — 33 % Al_2O_3 (із додаванням 1 % B_2O_3).

Флюс АНФ-1, який не менше ніж на 90 % складається з CaF_2 , традиційно застосовують для електрошлакового переплаву високолегованих сталей з підвищеним вмістом Cr, Ni та інших легуючих компонентів (аустенітні та жароміцні марки) [5]. Через відсутність активних оксидів (крім незначної частки CaO) флюс АНФ-1 характеризується низькою кисневою активністю. В умовах даного дослідження вміст домішок оксидів було мінімізовано завдяки використанню чистого фториду кальцію.

Флюси системи CaF_2 – CaO – Al_2O_3 із практично рівним вмістом основних оксидів також застосовують під час електрошлакового переплаву жароміцних легованих сталей (Cr–Ni, Cr–Mo) та нікелевих сплавів типу Інконель, оскільки він ефективно запобігає втратам Al і Ti та забезпечує стабільний тепловий режим [8].

Електрошлаковий переплав дослідного металу проводили за прямою схемою у нерухомий кристалізатор з внутрішнім діаметром 50 мм при коефіцієнті заповнення 0,64 (рис. 1). Усі плавки починали твердим стартом. Для зменшення окисного впливу атмосфери в плавильний простір (у зазор між електродом і кристалізатором) крізь кільцевий розподільник подавали аргон.

Після завершення плавок здійснювали візуальну оцінку якості поверхні отриманих злитків. Зразки для хімічного аналізу відбирали з центральної частини злитка на відстані близько 10 мм від його верхньої торцевої поверхні. Хімічний склад визначали методом спектрального аналізу шляхом порівняння отриманих показників із відповідним еталоном.

Результати досліджень та їх обговорення. На першому етапі дослідження було проведено дві лабораторні плавки під флюсом з чистого CaF_2 за різних умов. Плавку 1 виконували без подавання аргону, тоді як плавку 2 — із захистом плавильного простору аргонном. Витрата флюсу на кожній плавці становила 0,25 кг.

Також було здійснено три дослідні плавки з флюсом 33 % CaF_2 — 33 % CaO — 33 % Al_2O_3 (плавки 3–5). На плавках 4 і 5 до складу флюсу до-

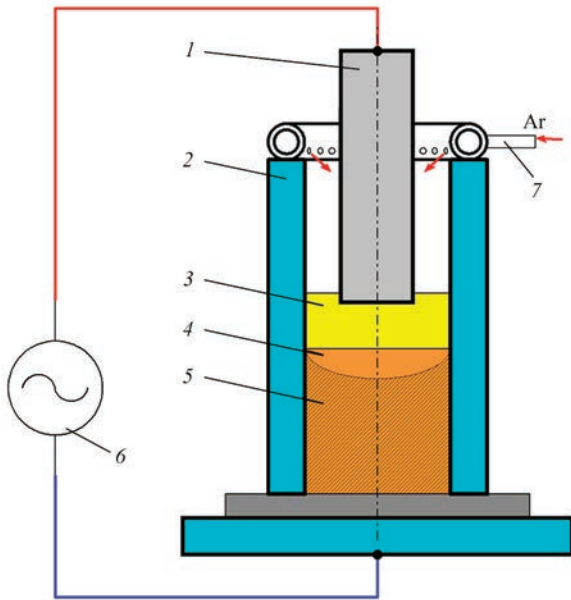


Рис. 1. Схема здійснення електрошлакового переплаву під час експериментів: 1 — електрод; 2 — кристалізатор; 3 — шлакова ванна; 4 — металева ванна; 5 — зливоч; 6 — джерело живлення; 7 — подача аргону

давали 1 % оксиду бору (B_2O_3). Витрата флюсу на плавках 3 і 4 складала 0,2 кг, на плавці 5 — 0,14 кг.

На рис. 2 представлено зовнішній вигляд злитків, отриманих після електрошлакового переплаву під зазначеними флюсами.

У табл. 1 представлені результати хімічного аналізу металу дослідних злитків першої серії плавоч. На рис. 3 показано відносні зміни вмісту елементів у металі порівняно з їх початковими концентраціями, що розраховані за даними табл. 1.

Дані плавоч 1 і 2 наочно демонструють вплив захисту плавильного простору аргонем на окисні втрати легувальних елементів під час переплаву. Переплав дослідного металу під флюсом на основі CaF_2 із подачею аргону супроводжувався зменшенням відносних втрат марганцю на 40 %, а бору — практично повністю. Вміст кремнію на обох плавках залишався незмінним, тоді як втрати молібдену та хрому були однаковими. Певною мірою нелогічними виглядають дані щодо відносних втрат ніобію та нікелю: на другій плавці вони дещо зросли, проте загалом не перевищили 10 %. На нашу думку, це зумовлено недосконалістю застосованої методики захисту плавильного простору від окисного впливу атмосферного повітря.



Рис. 2. Зовнішній вигляд злитків ЕШП, отриманих під флюсом з CaF_2 (а) та флюсом 33 % CaF_2 — 33 % CaO — 33 % Al_2O_3 (б)

Варто зазначити, що за зниженого окисного впливу атмосферного повітря та відсутності Al_2O_3 й SiO_2 у шлаку втрат бору під флюсом CaF_2 не зафіксовано навіть без додавання B_2O_3 до шлаку (плавка 2). Водночас якість поверхні злитків, отриманих під таким флюсом, виявилася вкрай незадовільною (рис. 2, а). Фторидкальцієвий шлак характеризується досить високою електропровідністю (близько $5,5 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ при $1650 \text{ }^\circ\text{C}$), що ускладнює нагрівання шлакової ванни до високої температури. Окрім того, для нього характерний малий інтервал кристалізації та температура плавлення близько $1400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Звичайно робити однозначні висновки щодо поведінки легувальних елементів у системі метал–фторидний флюс на основі лише двох плавоч є не коректним. Проте отримані результати демонструють певні тенденції й свідчать про доцільність подальших досліджень у цьому напрямі.

У цій роботі основну увагу приділено вивченню особливостей зміни хімічного складу металу під час електрошлакового переплаву із застосуванням безкремністого флюсу складу 33 % CaF_2 — 33 % CaO — 33 % Al_2O_3 . На рис. 3, б наведено дані щодо відносної зміни вмісту елементів у металі після електрошлакового переплаву дослідного металу під цим флюсом без додавання (плавка 3) та з додаванням 1 % оксиду бору B_2O_3 (плавки 4, 5) до його складу. За таких умов найбільш суттєві зміни вмісту спостері-

Таблиця 1. Результати хімічного аналізу металу електроду та злитків першої серії плавоч, мас. %

Плавка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Nb	B	S
Електрод	0,16	0,42	0,42	12,0	0,40	0,057	1,00	0,72	0,05	0,017
1	0,17	—»	0,37	11,8	—»	0,056	—»	0,70	0,04	—»
2	0,16	—»	0,39	—»	0,39	—»	—»	0,68	0,05	0,015
3	0,17	0,37	0,40	12,0	—»	0,055	—»	0,63	0,022	0,011
4	—»	0,32	0,42	11,3	0,34	0,050	0,94	0,57	0,034	0,013
5	0,16	0,38	0,40	11,7	0,40	0,055	1,00	0,64	0,036	0,015

гаються для бору. Додавання оксиду бору в шлак до 1 % майже в два рази зменшило втрати бору металом під час переплаву, хоча повністю їх і не усунуло.

Водночас результати плавки 4 помітно відрізняються від показників плавки 3 і 5 за вмістом кремнію, хрому, нікелю, молібдену та кобальту, що, найбільш ймовірно, зумовлено нестабільним електричним режимом переплаву за підвищеної потужності, який мав місце під час цієї плавки. Тому її результати можуть використовуватись для аналізу лише обмежено. Варто зазначити, що умови плавки 3 та 5 відрізнялися не тільки наявністю оксиду бору у складі шлаку, а й витратою флюсу (0,20 та 0,14 кг відповідно). Зменшення витрати флюсу на 30 % обумовило лише незначне зменшення відносних втрат деяких домішок в межах 2...3 %.

Наступні шість дослідних плавки (табл. 2) виконані з використанням флюсу складу 33 % CaF_2 — 33 % CaO — 33 % Al_2O_3 — 1 % V_2O_5 за схемою, коли шлак попередньої плавки застосовували в наступній із додаванням свіжого флюсу лише для компенсації втрат. При цьому загальна витрата флюсу на плавку залишалася сталою й становила 0,15 кг. Плавка 2.4 з цієї серії через технічні обставини відбувалась за нестабільного електричного режиму.

Результати хімічного аналізу металу дослідних злитків наведено в табл. 2. Отримані дані свідчать, що характер зміни хімічного складу металу після переплаву відносно складу електродного металу для всіх дослідних плавки є приблизно однаковим з урахуванням точності методики визначення. При цьому вміст нікелю, кобальту та ніобію практично не зазнає змін.

Примітно, що у попередній серії плавки (плавки 3–5) втрата ніобію під флюсом такого самого складу була помітною. У той час, як у другій серії плавки, його вміст у металі злитків близький до вихідного (0,68...0,73 %). Концентрація молібдену, як і в першій серії плавки, зменшується не суттєво (з 0,059 до 0,056...0,058 %). Концентрація кремнію в металі після переплаву зменшується до 0,37...0,41 % внаслідок його окиснення киснем атмосфери.

Найбільші втрати спостерігаються для марганцю, хрому та бору. Вміст марганцю зменшується приблизно на 11 %, а хрому — на 6 %, що зумовлено їхньою високою схильністю до окиснення шлаком з підвищеною основністю. Порівняно з іншими

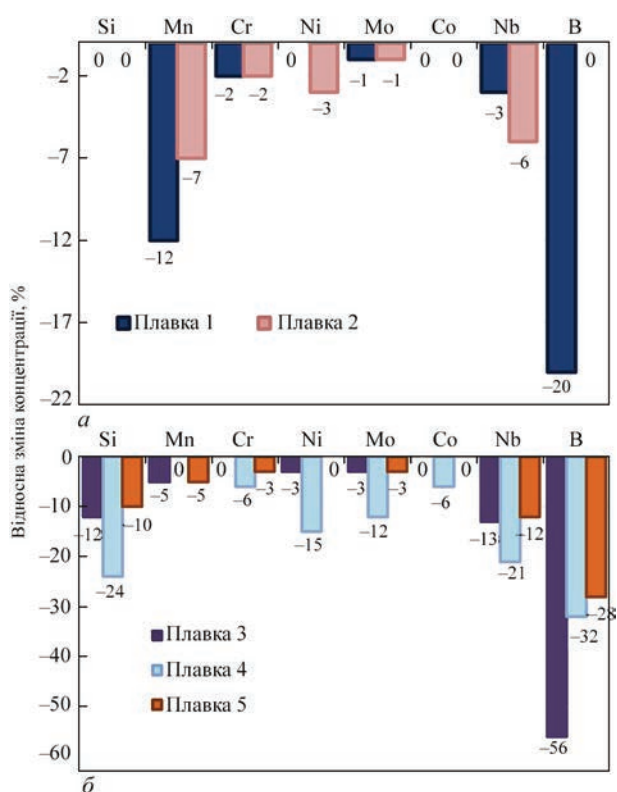


Рис. 3. Зміни концентрації елементів в металі відносно початкової після переплаву під флюсом з CaF_2 (а) і флюсом $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ (б), розраховані за даними табл. 1

домішками відносні втрати бору є найбільшими й сягають близько 15 %. Однак це значно менше, ніж у плавках першої серії. Бор активно реагує з киснем і компонентами шлаку, переходячи у нього у вигляді оксидних та боратних сполук [13].

Після переплаву також зафіксовано зниження вмісту сірки в металі. При цьому на першій плавці цієї серії із повністю свіжим флюсом ступінь десульфурації була найбільшою і становила 31 %. Для решти плавки цей показник не перевищував 6 %, що зумовлено повторним використанням флюсу від попередньої плавки, вже частково насиченого сіркою. Водночас концентрація фосфору залишається практично незмінною, оскільки відновні умови переплаву не сприяють його видаленню.

Для плавки 2.4 (табл. 2), проведеної за умов нестабільного електричного режиму, зафіксовано більші, порівняно з іншими плавками серії, втрати Nb і В, що свідчить про інтенсифікацію окисних процесів у разі порушення стабільності переплаву.

Таблиця 2. Результати хімічного аналізу металу електродів та злитків другої серії плавки

Плавка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Nb	B	S	P
Електрод	0,16	0,42	0,41	12,7	0,42	0,059	0,65	0,71	0,11	0,016	0,022
2.1	—	0,41	0,37	11,9	0,41	0,058	0,64	—	0,098	0,011	0,021
2.2	—	0,37	—	12,0	—	—	0,66	—	0,093	0,015	0,022
2.3	0,18	—	—	12,1	0,42	—	—	0,73	0,092	0,015	0,021
2.4	0,16	0,39	0,36	11,9	0,41	0,056	0,69	0,68	0,087	—	0,022
2.5	—	0,41	0,37	11,8	—	0,057	0,65	0,72	0,095	—	—
2.6	—	0,40	0,35	11,9	0,40	0,056	0,66	0,70	0,091	0,016	—

Висновки

1. Проведені лабораторні дослідження електрошлакового переплаву високохромистої борвмісної сталі показали, що застосування безкремністого флюсу складу 33 % CaF₂ — 33 % CaO — 33 % Al₂O₃ — 1% B₂O₃ у поєднанні із захистом плавильного простору аргонном забезпечує відносну стабільність вмісту нікелю, молібдену, кобальту та ніобію в металі. Водночас спостерігаються втрати марганцю, хрому, кремнію та бору. Додавання 1 % оксиду бору до складу шлаку зменшує втрати бору металом удвічі, хоча повністю їх не усуває.

2. Проведення переплаву під флюсом із чистого CaF₂ із захистом аргонном практично усуває втрати бору та кремнію, а втрати інших легувальних елементів не перевищують 7 %. Проте якість поверхні отриманих злитків у цьому випадку є незадовільною.

3. Нестабільний електричний режим під час переплаву призводить до зростання втрат елементів, схильних до окиснення, зокрема бору та ніобію.

4. Отримані результати свідчать про доцільність подальших досліджень щодо оптимізації складу шлаків та режимів переплаву для мінімізації втрат легувальних елементів, особливо бору, під час електрошлакового переплаву борвмісних сталей.

Список літератури/References

- Sharma, M., Ortlepp, I., Bleck, W. (2019) Boron in heat-treatable steels: A review. *Steel Research Inter.*, 90(11), 1900133. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201900133>
- Dudova, N. (2022) 9–12 % Cr heat-resistant martensitic steels with increased boron and decreased nitrogen contents. *Metals*, 12(7), 1119. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12071119>
- Abe, F. (2011) Effect of boron on microstructure and creep strength of advanced ferritic power plant steels. *Procedia Eng.*, 10, 94–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.018>
- Zhang, D., Wang, X., Li, Y. (2023) Influence of boron segregation on the hot ductility of T23 steel CGHAZ. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, 28(9), 875–884. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2023.2245588>
- Lutyi, I.Yu., Latash, Yu.V. (1982) *Electroslag melting and refining of metal*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Shevtsov, V.L. et al. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Li, S.J., Cheng, G.G., Yang, L. et al. (2017) Thermodynamic model to design the equilibrium slag compositions during electroslag remelting process: Description and verification. *ISIJ Inter.*, 57, 713–722. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-655>
- Duan, S.C., Park, J.H. (2022) Comparison of oxidation behavior of various reactive elements in alloys during electroslag remelting (ESR) process: An overview. *ISIJ Inter.*, 62(8), 1561–1572. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-655>
- Medina, S.F., Cores, A. (1993) Thermodynamic aspects in the manufacturing of microalloyed steels by the electroslag remelting process. *ISIJ Inter.*, 33(12), 1244–1251. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.1244>
- Mitchell, A. (1981) The chemistry of ESR slags. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 20(1), 101–112. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.1981.20.1.101>
- Peng, L., Jiang, Z., Geng, X. (2019) Design of ESR slag for remelting 9CrMoCoB steel under simple protective Ar gas. *Metals*, 9, 1300, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9121300>
- Duan, S.C., Lee, M.J., Kim, D.S., Park, J.H. (2022) Oxidation behavior of boron in 9CrMoCoB steel by CaF₂-CaO-Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃ electroslag remelting (ESR) type slag. *J. of Materials Research and Technology*, 17, 574–585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.033>
- Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentyugov, I.P. (2020) *Electroslag technologies of surfacing and recycling of metal and metal-containing waste*: Monograph. Ed. by I.A. Ryabtsev. Kyiv, Interservice [in Russian].

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF ALLOYING ELEMENTS DURING ELECTROSLAG REMELTING OF HIGH-CHROMIUM BORON-CONTAINING STEEL

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

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

The paper presents the results of laboratory studies on the behavior of alloying elements in a high-chromium boron steel during electroslag remelting with silicon-free fluxes. The influence of slag composition and atmospheric oxidation potential on element loss was examined. Protecting the melting space with argon during electroslag remelting allowed significantly reducing boron and other active element losses. Remelting with a silicon-free flux containing 33 % CaF₂, 33 % CaO, 33 % Al₂O₃, and 1 % B₂O₃, combined with argon protection of the melting space, was shown to stabilize the content of nickel, molybdenum, cobalt, and niobium in the metal. However, this process results in losses of manganese, chromium, silicon, and boron. Adding 1 % boron oxide to the slag reduced boron losses in the metal by half. An unstable electrical mode of remelting was found to increase the loss of elements prone to oxidation. These results can be used to optimize the slag composition and the remelting modes to minimize the loss of alloying elements in boron-containing steels during electroslag remelting. 13 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: electroslag remelting, boron-containing steel, silicon-free flux, oxidation of impurities, chemical composition of metal

Отримано 15.09.2025

Отримано у переглянутому вигляді 14.10.2025

Прийнято 17.11.2025