

**Костецький Ю.В.<sup>1</sup>, Педченко Е.А.<sup>1</sup>, Петренко В.П.<sup>1</sup>,  
Зайцев В.А.<sup>1</sup>, Трикозенко Д.І.<sup>2</sup>**  
*(<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України; <sup>2</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)*  
**ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ  
ВИСОКОХРОМИСТИХ БОРВМІСНИХ СТАЛЕЙ**  
E-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua

Електрошлаковий перепад є провідним методом отримання високоякісних крупних сталевих зливок для виготовлення роторів парових турбін у енергетичному машинобудуванні. ЕШП майже повністю усуває явище грубої макросегрегації у великих сталевих зливках, забезпечує кращу мікроструктуру металу, меншу кількість, розміри та більш рівномірне розподілення неметалевих вкраплень, ніж у литих зливках [1].

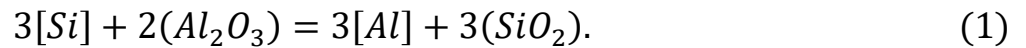
Основним класом сталей для виробництва роторів парових турбін є сталі з вмістом хрому 9-12 % [2]. З метою підвищити робочі температури парових турбін до 630 – 650 °С на основі сталі В2 (COST501) була розроблена сталь FB2 із додаванням 1,3 % Со та 0,01 % В [3]. Легування бором дозволило підвищити температуру експлуатації на 20 °С.

Між тим через хімічний склад сталі FB2 (CrMoCoB) в процесі виробництва виникають певні труднощі з точки зору забезпечення цільового хімічного складу зливка ЕШП. Під час перепаду можливе окиснення домішок з високою спорідненістю до кисню – В, Nb, Mn та Si. Активно взаємодіє з киснем та оксидами шлаку алюміній. Окрім того в металі можливе утворення нітридів бору, ніобію, молібдену та ванадію, що негативно впливає на властивості. Ці особливості слід враховувати при виборі шлакової системи. Хімічний склад шлаку визначає характер і напрямок протікання фізико-хімічних процесів та характеристики неметалевих вкраплень. На формування поверхні зливка впливають фізичні властивості шлаку і швидкість перепаду. Тож розплавлений шлак має провідний вплив на металургійні якості зливка ЕШП [4].

Вплив хімічного складу шлаків та його властивостей на якість зливка ЕШП вивчали у багатьох дослідженнях. Ефективним методом зменшення втрат хімічно активних елементів, розчинених в металі, є додавання до розплавленого шлаку

певної кількості сполук, що беруть участь в окислювально-відновних реакціях. Ідея полягає в тому, щоб під час ЕШП підтримувати у рівновазі окислювально-відновні реакції між рідким шлаком і металом. За таких умов вміст хімічно активних елементів у металі зливка буде залишатися стабільним.

Однак забезпечення рівноваги окислювально-відновних реакцій в системі «шлак-метал» під час переплаву сталі типу FB2 (CrMoCoV) є складним завданням. Сталь містить досить невелику кількість бору (0,008–0,011 %) та алюмінію (0,003 %) в той час, як вміст оксиду алюмінію в шлаку великий. Вміст кремнію в металі близько 0,05 %, тоді як вміст SiO<sub>2</sub> в шлаку відносно низький. Відповідно в процесі переплаву між рідкими шлаком і сталлю може протікати реакція:



У результаті цього вміст алюмінію в металі може збільшуватись. Додавання невеликої кількості оксиду кремнію до складу шлаку може запобігти відновленню алюмінію зі шлаку. Однак оксид кремнію шлаку може реагувати з розчиненим в металі бором за реакцією [5]:



Таким чином, для зменшення втрат зміцнювального елемента В і запобіганню накопиченню Al в металі, до складу шлаку слід додавати певну кількість SiO<sub>2</sub> і B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [5]. При цьому активності SiO<sub>2</sub> і B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> будуть регулювати розподіл бору між металом і шлаком. Шлак, що має високу основність (відповідно малий вміст SiO<sub>2</sub>), є вигідним з точки зору зменшення рівноважного вмісту кисню в металі, запобігання надмірного відновлення кремнію в метал та одночасного зменшення втрат Mn та Nb з окисненням. Оптимізація вмісту кремнію в металі дозволяє контролювати вміст алюмінію та ніобію і забезпечувати отримання цільового вмісту в металі.

З метою експериментального дослідження поведінки легувальних елементів під час електрошлакового переплаву високохромистої борвмісної сталі за різних

умов переплаву, були проведені плавки в лабораторних умовах. Досліджували вплив окисного потенціалу атмосфери та складу шлаку на втрати легувальних елементів з окисненням під час переплаву.

Лабораторні плавки здійснювали на установці електрошлакового переплаву типу УШ-114, яка є багатоцільовою установкою для виплавки дрібних зливок з урахуванням вимог сучасної технології. Джерелом живлення був однофазний зварювальний трансформатор ТШС-3000-1 зі ступінчастим регулюванням вторинної напруги.

В ході дослідних плавок на установці УШ-114 здійснювали електрошлаковий переплав литих електродів діаметром 0,04 м і довжиною близько 0,7 м зі сплаву (табл. 1), виплавленого в індукційній печі.

Таблиця 1 – Хімічний склад металу з литого витратного електрода, % мас.

Елемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Nb	B
Сер. знач.	0,16	0,42	0,42	12,00	0,40	0,06	1,0	0,72	0,047

Електрошлаковий переплав здійснювали одним електродом у нерухомий кристалізатор із внутрішнім діаметром 50 мм за прямою схемою. При цьому коефіцієнт заповнення складав 0,64. Усі плавки починали на твердому старті. Для зменшення окисного впливу атмосфери у плавильний простір (зазор між електродом і кристалізатором) крізь кільцевий розподільник вдмухували аргон, щоб мінімізували доступ атмосферного повітря.

Були здійснені плавки під флюсом з чистого  $\text{CaF}_2$  без та з захистом плавильного простору аргоном (плавки №1 і №2). Витрата флюсу на кожній плавці становила 0,25 кг. Також були виконані плавки під флюсом 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (плавка №3) та з додаванням до нього 1,0 % оксиду бору (плавки №4 і №5) з витратою 0,2 кг на плавку. Після завершення плавок отримані зливки оглядали візуально, відбирали проби на хімічний аналіз та зразки для

металографічних досліджень. На рис.1 представлено зовнішній вигляд зливків, отриманих під флюсом з  $\text{CaF}_2$  (а) і флюсом 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (б).



а



б

Рис. 1. Зовнішній вигляд зливків ЕШП, отриманих під флюсом з  $\text{CaF}_2$  (а) і флюсом 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (б)

У табл. 2 представлено результати хімічного аналізу проб металу зі зливків ЕШП, отриманих за різних умов переплаву.

Таблиця 2 – Результати хімічного аналізу металу зливків ЕШП

Плавка	Вміст елемента, % мас.									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Co	Nb	B
№1	0,19	0,42	0,37	11,8	0,40	0,056	0,017	1,00	0,70	0,04
№2	0,18	0,42	0,39	11,8	0,39	0,056	0,015	1,00	0,68	0,05
№3	0,28	0,37	0,40	12,0	0,39	0,055	0,011	1,00	0,63	0,022
№4	0,23	0,32	0,42	11,3	0,34	0,050	0,013	0,94	0,57	0,034
№5	0,18	0,38	0,40	11,7	0,40	0,055	0,015	1,00	0,64	0,036

На рис. 2 представлено дані щодо відносної зміни вмісту елементів в металі після переплаву за різних умов. Плавку №2, на відміну від плавки №1, проводили з захистом плавильного простору аргонном. Відповідно зменшились відносна втрата

марганцю з 12 % до 7 % та бору з мінус 20 % до 0 %. Вміст кремнію в металі не змінився на обох плавках, а втрата молібдену була однаковою. Відносна втрата ніобію збільшилась на другій плавці. Проте вона не перевищила 10 % (-3 % на першій і -6 % на другій). Цікаво, що за зменшеного окисного впливу атмосферного повітря, втрат бору під флюсом з  $\text{CaF}_2$  не відбулося, навіть без додавання  $\text{B}_2\text{O}_3$  у шлак (плавка №2). Проте якість поверхні зливків під таким флюсом погана (рис. 1, а).

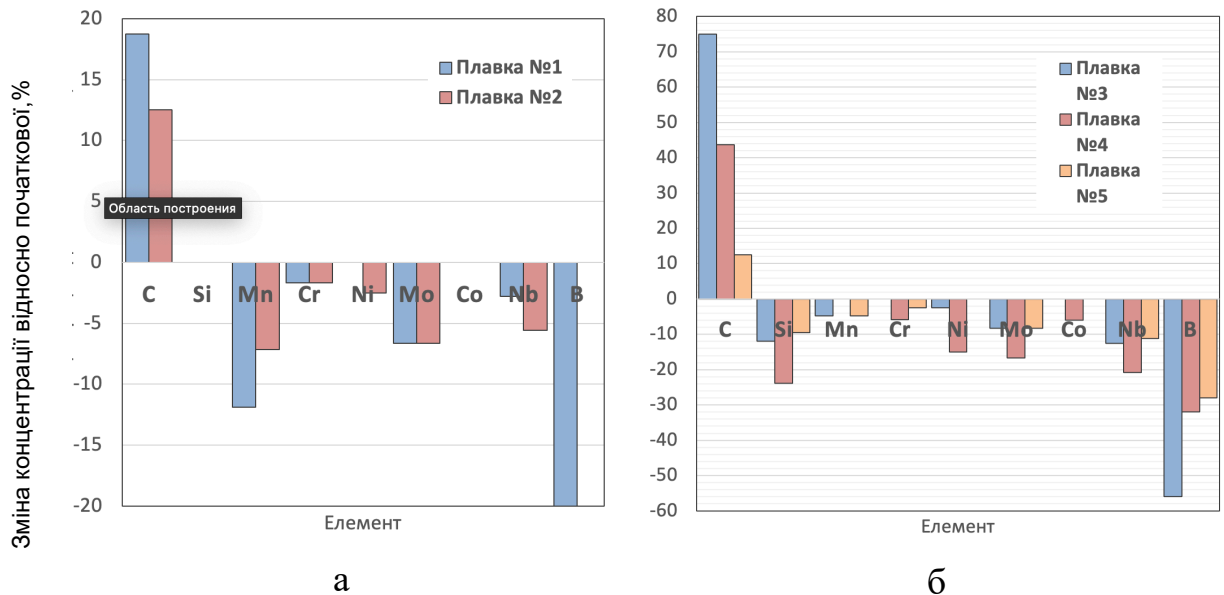


Рис. 2. Відносна зміна вмісту елементів в металі після переплаву під флюсом з  $\text{CaF}_2$  (а) і флюсом 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (б)

На рис. 2 (б) представлено дані щодо відносної зміни вмісту елементів в металі після ЕШП під флюсом 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  без та з додаванням 1,0 % оксиду бору (плавки №3-5). Одразу звертає на себе увагу, що найбільші відносні зміни, за виключенням вуглецю, спостерігаються для бору. Окрім того, результати плавки №4 мають значне відхилення від даних плавки №3, 4. Зокрема, по кремнію, хрому, нікелю, молібдену, кобальту, що обумовлено нестабільним електричним режимом за підвищеної потужності під час переплаву. Тож ці дані слід вилучити з аналізу і порівнювати між собою дані плавки №3 і №5, які відрізняються лише витратою шлаку (0,2 кг і 0,14 кг).

Аналіз показує, що зменшена витрата флюсу і більш стабільні умови переплаву забезпечили значне зменшення відносної втрати бору. Також трохи зменшилась втрата кремнію і ніобію. Тож можна зазначити, що витрата шлаку помітно впливає на втрати бору. Концентрація кремнію в металі також зменшувалась, хоча і в меншій мірі, ніж бору. Проте застосований шлак, незважаючи на наявність у ньому 1,0 % оксиду бору, не запобігає втратам бору металом під час переплаву.

Таким чином, лабораторні експерименти з електрошлакового переплаву високохромистої борвмісної сталі під флюсом  $\text{CaF}_2$  із захистом плавильного простору аргонем та без захисту показали, що за умови зменшення окисного впливу атмосферного повітря зміна вмісту бору і кремнію в металі не відбувалась. При цьому відносні втрати марганцю, хрому, молібдену і ніобію не перевищували 7 % і були меншими, ніж для флюсу 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -1 %  $\text{B}_2\text{O}_3$  (окрім втрат марганцю). Однак отримати якісної поверхні зливка не вдалось.

Експерименти з електрошлакового переплаву високохромистої борвмісної сталі під флюсами 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та 33 %  $\text{CaF}_2$ -33 %  $\text{CaO}$ -33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -1 %  $\text{B}_2\text{O}_3$  і захистом плавильного простору аргонем показали, що додавання оксиду бору в шлак зменшує відносну втрату бору металом у два рази з -58 % до -26 %. При цьому відносні втрати марганцю, хрому, молібдену не перевищують -10 %, а кремнію і ніобію -12 %.

#### Література:

1. Zeiler G., Bauer R., Putschoengl A. Experiences in manufacturing of forgings for power generation application // *Le Metallurgia Italiana*. – 2010. – №6. – P.33-40.
2. Цыкуленко А.К. Современные материалы для валов роторов паровых и газовых турбин (требования, состав и способы производства) / А.К. Цыкуленко, Л.Б. Медовар, А.В. Чернец // *Проблемы специальной электрометаллургии*. – 2001. – №3. – С. 10 – 14.
3. Zeiler G., Putschoegl A. Gas and Steam Turbine Forgings for High Efficiency Fossil Power Plants// *Proceedings of the AM-EPRI 2013, Advances in Materials*

Technology for Fossil Power Plants: Proceedings from the Seventh International Conference, October 22–25, 2013, Waikoloa, Hawaii, USA. – P. 281-292.

4. Лютый И.Ю., Латаш Ю.В. Электрошлаковая выплавка и рафинирование металла / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наук. думка, 1982. – 188 с.

5. Peng L., Jiang Z., Geng X. Design of ESR Slag for Remelting 9CrMoCoB Steel under Simple Protective Ar Gas // Metals. – 2019. – 9(12). – 1300.

**Кочешков А.С., Лютий Р.В.**  
*(КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)*  
**СПЕЦІАЛЬНІ СПОСОБИ ЛИТТЯ ТА ЇХ МІСЦЕ СЕРЕД ЛИВАРНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ**  
E-mail: rvl2005@ukr.net

Ливарне виробництво – це сукупність технологій заливання форм рідкими металами, які є одними з найдавніших методів обробки металів. Виробництво литих виробів (зброї, знарядь праці, прикрас, побутових предметів) вперше зафіксовано ще у 5 тисячолітті до Різдва Христового. Серед виробів є багато прикладів, отриманих технологіями спеціальних видів лиття (СВЛ).

До СВЛ сьогодні відносять всі можливі методи отримання виливків, які хоч чимось відрізняються від лиття у разові піщані форми.

Майже за 70 років ливарне виробництво пройшло значний шлях, хоча принцип отримання виливків залишився: форма – розплав – заливання. Досягнення науки і техніки дають змогу отримувати дуже складні за геометрією виливки масою від десятків долів граму до особливо великих та унікальних (майже 600 т).

Протягом розвитку ливарного виробництва народжувались нові методи, деякі відмирили, а потім знову до них повертались. Головна вимога залишається: максимальне наближення вилівка до параметрів готової деталі.

Лиття в разові піщані форми переважно використовують для виготовлення деталей із залізобетонних сплавів, тоді як частка кольорових сплавів у цій традиційній технології незначна. СВЛ значною мірою розширюють можливості