

# ВПЛИВ ВИТРАТ ШЛАКУ ПРИ ЕШП НА СКЛАД МЕТАЛУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ

Л. О. Лісова<sup>1</sup>, Г. П. Стівченко<sup>1,2</sup>, Л. Б. Медовар<sup>1,2</sup>, В. Л. Петренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03068, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Інжинирінгова компанія «Елмет-Рол».

А. с. 259, 03150, м. Київ. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Описані можливі витрати шлаку при електрошлаковому переппаві. Оцінено кількість витрат на утворення гарнісажу різної товщини (1, 3, 5, 10 мм) при переппаві великокавового злитка з використанням шлаків АНФ-39 і АНФ-28. Розглянуті зміни компонентного складу системи газ–шлак–метал, що зумовлені зменшенням маси шлаку на утворення гарнісажу та у випадку компенсації цих витрат. Досліджено вплив зміни кількості шлаку на технологічні параметри плавки ЕШП. Бібліогр. 17, табл. 5, іл. 5.

**Ключові слова:** електрошлаковий переппав; шлаковий гарнісаж; витрати шлаку; властивості шлаку; система газ–шлак–метал

**Вступ.** Завдяки широким можливостям керування процесом кристалізації злитка електрошлаковий переппав (ЕШП) забезпечує високий рівень рафінування складу та структури і, в результаті, одержання металу найкращої якості. Для реалізації всіх переваг ЕШП необхідно забезпечити строге регулювання електричних режимів плавки, які суттєвим чином можуть змінюватися при зміні висоти та властивостей шлакової ванни. Це зумовлено кількома факторами, серед яких утворення шлакової кірки (гарнісажу) на поверхні злитку, випаровування летких компонентів з його складу та/або продуктів реакцій між компонентами системи газ–шлак–метал, вибіркова кристалізація компонентів шлаку. Зміна складу шлаку впливає на його температуру плавлення, електропровідність, в'язкість та інші фізичні властивості, що змінює хід процесу і може відобразитися на металургійній якості злитку. Тож, для стабільного і прогнозованого ходу процесу необхідно враховувати та/або компенсувати витрати шлаку та зміни його складу, що є особливо відчутними при довготривалій виплавці злитків.

**Особливості витрат шлаку при електрошлаковому переппаві.** Історично склалося, що основою шлаків електрошлакового переппаву є фторид кальцію ( $\text{CaF}_2$ ) [1]. Чистий  $\text{CaF}_2$  як флюс був вперше застосований при електрошлаковому зварюванні аустенітних хромонікелевих сталей. Цей шлак/флюс отримав назву АНФ-1П. Основною перевагою фторидного шлаку є мінімальний окислювальний потенціал і в даний час його використовують при переппаві сплавів, що містять

легкоокисні елементи, такі як титан та алюміній. Недоліками фторидного шлаку при ЕШП є його підвищена електропровідність, екологічна шкідливість і вузький інтервал кристалізації (у чистого компонента він зовсім відсутній). Останній зумовлює незадовільне формування поверхні злитка при плавці під фторидом кальцію.

Відомо, що при температурах процесу ЕШП фтористий кальцій випаровується сам, а в контакті з іншими компонентами шлаку та вологою може утворювати леткі фториди ( $\text{SiF}_4$  та  $\text{HF}$ ) [2, 3]. За даними [4], при використанні традиційних фторовмісних флюсів типу АНФ в процесі електрошлакового переппаву виділяється 10...22 %  $\text{мг/м}^3$  фтору.

В роботі [2] показано, що витрати фтору зі шлаків системи (84,76 %  $\text{CaF}_2$ –15,24 %  $\text{CaO}$ ), що не містять кремнію, відбуваються за тими ж самими реакціями, що і зі шлаку, який містить кремній (80 %  $\text{CaF}_2$ –15 %  $\text{CaO}$ –5 %  $\text{SiO}_2$ ). Тобто, утворення  $\text{SiF}_4$  не відіграє значної ролі в процесі випаровування фторидів. Втрата фтору в основному відбувається при випаровуванні безпосередньо  $\text{CaF}_2$  та за рахунок утворення  $\text{HF}$ . Таким чином, для зменшення випаровування фторидів із фторовмісних шлаків необхідно забезпечити мінімальний вміст вологи в них.

Швидкість витрати маси шлаку в системі  $\text{CaF}_2$ – $\text{CaO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{MgO}$ , прототипом якої був відомий шлак АНФ-6, з різним вмістом вихідних компонентів досліджували в роботі [5]. Експериментальні результати показали, що витрата маси шлаку збільшується приблизно на 6 % при збільшенні вмісту  $\text{CaF}_2$  з 50 до 65 %. Витрата маси

зростає з додаванням оксидів  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{MgO}$  та зменшується зі збільшенням вмісту  $\text{CaO}$ , що, вочевидь, зумовлено реакціями між оксидами та фторидами в шлаковій ванні при температурі плавлення і викликає зміну складу шлаку ЕШП.

Введення різних добавок до основного складу шлаку може впливати на випаровування фторидів. В роботі [6] показано, що додавання 8,1 % оксиду титану до системи  $\text{CaF}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$  запобігає випаровуванню фторидів та сприяє кристалізації шлаку. Аналіз гарнісажу по висоті злитку при переплаві нікелевого сплаву Alloy 825 [7] з використанням шлаків, що містять оксид титану, показав, що частка  $\text{CaF}_2$  зменшується при зростанні кількості сполук з титаном ( $\text{TiCaO}_3$ ,  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}\text{F}_2$ ). Проведені експерименти по визначенню характеру кристалізації шлаків ЕШП складу 33 %  $\text{CaF}_2$ , 33 %  $\text{CaO}$ , 33 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та 50 %  $\text{CaF}_2$ , 20 %  $\text{CaO}$ , 22 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5 %  $\text{MgO}$ , 3 %  $\text{TiO}_2$  показали, що зміни в фазовому складі шлаків під час твердіння не були суттєвими.

Випаровування фторидів є причиною того, що сьогодні існує тенденція до використання малофторидних або безфторидних шлаків в промисловості, що, природньо, викликає розробку та всебічне дослідження таких складів [8–11]. Зокрема, автори роботи [8] дослідили чотири шлаки чотириконтентної системи  $\text{CaF}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$  з вмістом  $\text{CaF}_2$ , %: 59, 55, 50, 45 (позначені як S1, S2, S3 і S4 відповідно). Електропровідність шлаків при температурі 1550...1650 °C знижується зі зменшенням вмісту  $\text{CaF}_2$ . Найнижча електропровідність у зразка S4, яка при 1550...1650 °C становила 1,741...2,131  $\text{Om}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Беручи до уваги фізичні властивості нового чотириконтентного шлаку S4 і низький вміст  $\text{CaF}_2$  автори вважають, що він є найбільш підходящим для процесу ЕШП, щоб зменшити споживання енергії і викиди, що забруднюють.

В обзорі [11] відповідно до тенденції зменшення вмісту  $\text{CaF}_2$  в шлаках були проведені дослідження шлаку ESR2015 (Wacker Chemie) з 30 %  $\text{CaF}_2$ . Результати показали, що випробувані шлаки з 4,7 %  $\text{CaF}_2$  можуть бути застосовані в процесі ЕШП УТОР МО6 сталі.

Окрім випаровування компонентів певна кількість шлаку витрачається на утворення гарнісажу. Його наявність впливає на процес формування кірки та внутрішньої структури за причини змінення характеру охолодження злитку. В роботі [12] автори вказують, що для ефективного охолодження злитку товщина гарнісажу при ЕШП не повинна перевищувати 1 мм. Особливе значення це має при виплаві великогабаритних злитків, оскільки

ки навіть при максимальному тепловідведенні від поверхні середня його частина кристалізується в умовах, що є близькими до умов в злитку, відливному у виливницю. Також вказується, що при виплаві великогабових злитків значного діаметру в багатоелектродних печах утворення тонкого та рівномірного гарнісажу ускладнюється. У місцях, де відстань між електродами і стінкою кристалізатора менша, утворюється тонкий гарнісаж, а у проміжках між електродами, де відстань є більшою — товстіший.

Гарнісаж чинить суттєвий вплив на теплопередачу до мідної форми. В роботі [13] визначено, що товщина шару гарнісажу більше залежить від складу шлаку, ніж від параметрів процесу. Тонкий гарнісаж утворюють шлаки з низькою температурою ліквідус і в'язкістю та «коротким» шляхом затвердіння (визначається відстанню до евтектичної або перитектичної точок у трикомпонентній фазовій діаграмі). Показано, що на границі розділу шлак–кристалізатор насамперед тверднуть компоненти з високою температурою плавлення ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) і навпаки, гарнісаж з боку злитка має склад дуже близький до вихідного. Тому можна сказати, що відбувається розшарування гарнісажу на три структурні зони, які мають різний компонентний склад. Зважаючи на те, що в першу чергу тверднуть тугоплавкі компоненти, відбувається збіднення шлаку, що може призвести до дестабілізації процесу.

Таким чином, утворення гарнісажу призводить до покращення якості поверхні злитка, але при великій товщині може погіршувати умови його тверднення.

Наявність шлакового гарнісажу є однією із переваг процесу ЕШП. Проте він повинен легко відділятися від поверхні злитку, що затвердів. Це стає можливим при реалізації силікатного розпаду шлаку [14].

Вважають [15], що зчеплення шлаку з металом в основному відбувається хімічним шляхом з утворенням з'єднань типу шпінелі, що представляють собою складні оксиди дво- та тривалентних металів Al, Mg, Fe та ін. Причиною утворення таких з'єднань є наявність на поверхні металу окисненого шару. В процесі твердіння злитка на межі шлак–метал відбуваються окисно-відновні реакції, в результаті яких на поверхні злитка утворюється окиснений шар металу, що складається із вюститу ( $\text{FeO}$ ) та магнетиту ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Оскільки метал при ЕШП покрито шаром рідкого шлаку, джерелом кисню на поверхні злитку є сам шлак. Визначено, що навіть при низькому вмісті кисню в електроді ЕШП відбувається окис-

нення металу злитка [16]. Це пов'язано із компонентним складом шлакової системи, що використовувалась при переплаві. Вказується, що вміст кисню в злитку визначається активністю  $Al_2O_3$  в шлаку при постійному вмісті алюмінію в металі. Автори роботи [17] наголошують про необхідність контролю вмісту глинозему в шлаку, оскільки при ЕШП котельної високомарганцевої сталі 20К та 22К під флюсом АНФ-6 відбулося зменшення кількості оксиду алюмінію в шлаковій ванні. Це автори пов'язують із утворенням гарнісажу. В процесі переплаву також відмічено насичення шлаку такими елементами як кремнезем, оксиди заліза та марганцю, а також зменшення вмісту глинозему. Підвищення вмісту оксидів пов'язують із окисненням поверхні витратних електродів в зоні високих температур та легуючих елементів у шлаку. Також був досліджений вплив електричних параметрів на утворення гарнісажу. Зазначається, що при переплаві на великій потужності злитки мали хорошу поверхню, а при використанні невисокої потужності їх поверхня мала гофри, а товщина гарнісажу сягала 5...20 мм.

Товщина гарнісажу залежить також від швидкості плавлення, що є функцією діаметру злитка і електроду, та їх співвідношення. Для одержання плоского фронту кристалізації і щільної структури злитка при ЕШП швидкість переплаву намагаються знизити. Проте при надто низькій швидкості плавлення тепловиділення може бути недостатнім і тоді утворюється товста та нерівна шлакова кірка, яка уповільнює процес кристалізації злитка і робить поверхню непридатною для необхідної деформації. Тому змінення швидкості плавлення має відбуватися в певному інтервалі та максимально плавно, щоб не викликати утворення гофрів.

До шлакової кірки пред'являють ряд вимог, які повинні бути забезпечені відповідним складом

шлаку та параметрами плавки. Проте при утворенні гарнісажу, а також завдяки іншим змінам в системі газ–шлак–метал, відбувається зменшення маси шлаку і відповідні зміни електричних параметрів переплаву.

В даній роботі зроблена спроба оцінити вплив зміни кількості та складу шлаку на технологічні параметри плавки і їх вплив на якість злитків.

**Вплив витрати шлаку на гарнісаж та зміни складу системи газ–шлак–метал.** Утворення гарнісажу на поверхні злитку ЕШП є найбільшою статтею витрат, яка може бути компенсована додаванням порцій свіжого шлаку в процесі плавки.

Для того, щоб кількісно оцінити вплив витрат шлаку на параметри процесу і хімічний склад злитка розраховували кількість шлаку, що витрачається на утворення гарнісажу за умови, що він є рівномірним по всій висоті злитка, а його товщина може становити 1, 3 та 5 мм (рис. 1). Розрахунки були виконані стосовно до злитку діаметром 1550 мм, довжиною 3000 мм (маса 44500 кг). Початкову масу шлаку прийняли 1128 кг виходячи з висоти шлакової ванни 230 мм.

Збільшення товщини гарнісажу призводить до більших витрат маси шлакової ванни, які для випадку утворення гарнісажу товщиною 1 мм складають близько 40 кг, 3 — до 115, 5 — до 190, а 10 — 380. Відповідно до зменшення кількості шлаку відбувається і зменшення висоти шлакової ванни, що сягає майже 80 мм при найтовщому гарнісажі.

Така втрата висоти шлакової ванни безумовно буде відчутною і призведе до зміни електричного режиму процесу. Проте для початку оцінимо зміни, які відбудуться в системі взаємодії шлак–метал в атмосфері інертного газу.

**Зміни в системі газ–шлак–метал.** Були проведені фізико-хімічні розрахунки системи із викори-

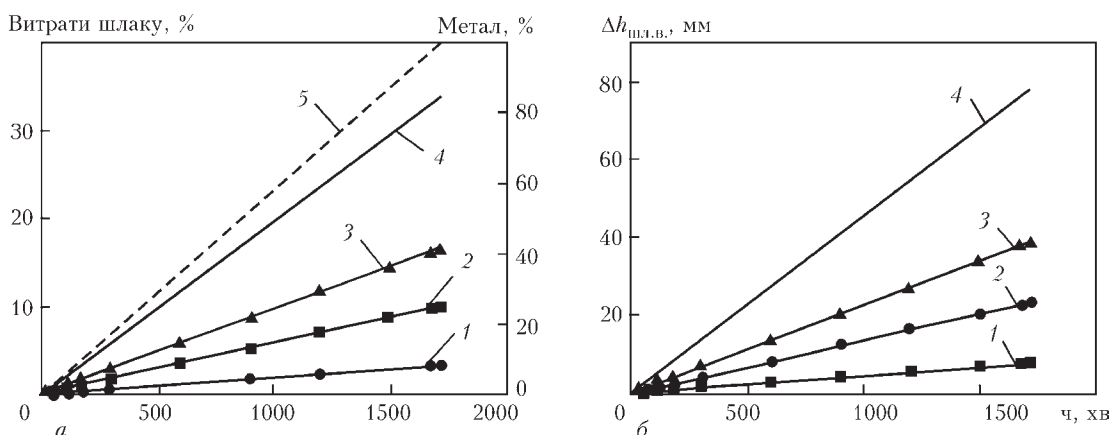


Рис. 1. Витрати шлаку на утворення гарнісажу різної товщини, мм: 1 — 1; 2 — 3; 3 — 5; 4 — 10 та кількість переплавленого металу (5) в залежності від часу плавки (а), а також відповідне зменшення висоти шлакової ванни ( $\Delta h_{шл.в.}$ ), мм: 1 — 1; 2 — 3; 3 — 5; 4 — 10 (б)

Таблиця 1. Хімічний склад сталі AISI 316L за стандартом ASTM A 240, мас. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
≤0,03	≤0,75	≤2,0	≤0,045	≤0,030	16...18	10...14	2...3	≥64

Таблиця 2. Хімічний склад шлаків, мас. %

Шлак	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO
АНФ-39	29...35	30...36	27...32	1...3	2...4
АНФ-28	41...49	≤5	26...32	20...24	≤6

станням сталі 316L (табл. 1) та шлаків АНФ-39, АНФ-28 (табл. 2). Спрогнозовано характер зміни компонентного складу системи з врахуванням витрат на гарнісаж товщиною 1, 3, 5 мм та у випадку з компенсацією шлаку. Витрати шлаку на гарнісаж 10 мм не розраховували, оскільки така товщина призводить до значних змін умов тепловідводу та уповільнює затверднення злитку і, як правило, не реалізується при ЕШП.

Проведено аналіз рівноважного складу компонентів шлакової ванни (рис. 2, 3), ванни металу та газової фази при температурі 1600 °С із компенсацією витрат шлаку на гарнісаж.

Результати розрахунків показали, що відбувається певна зміна компонентного складу обох шлаків АНФ-39 та АНФ-28. У випадку із шлаком АНФ-39 відбувається зменшення вмісту Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на 2 %, в результаті чого спостерігається накопичення в металі алюмінію до 0,01 % та його випаровування у вигляді AlF до 0,04 % і відповідне зменшення вмісту CaF<sub>2</sub> на 0,5 %. В результаті процесу десульфурації зменшується вміст CaO на 2,2 % і відбувається накопичення в шлаку сполуки CaS у кількості 2,24 % до кінця плавки. Також відбувається підвищення вмісту SiO<sub>2</sub> на 1,4 % вище вихідного значення і відповідне зменшення кремнію в металі на 0,02 %.

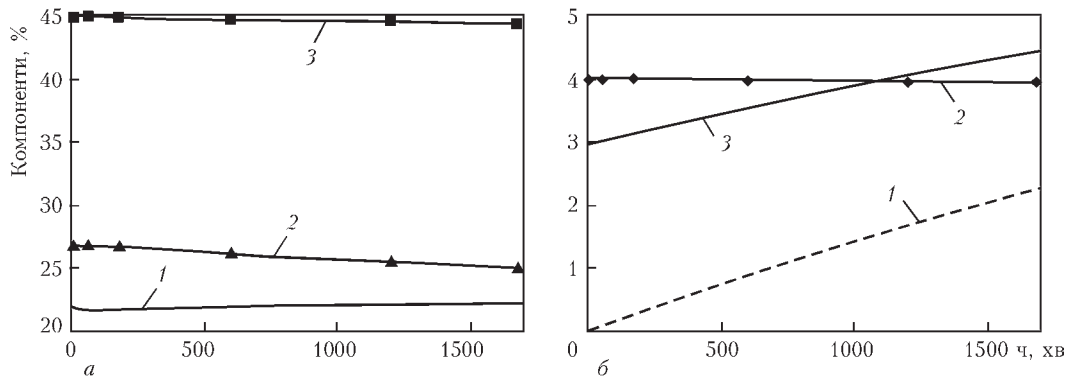


Рис. 2. Рівноважний вміст основних компонентів шлакової ванни: 1 — SiO<sub>2</sub>; 2 — CaO; 3 — CaF<sub>2</sub> (а); 1 — CaS; 2 — MgO; 3 — SiO<sub>2</sub> (б) при температурі 1600 °С при переплаві сталі 316L із використанням шлаку АНФ-39 та із компенсацією шлаку витрат на гарнісаж

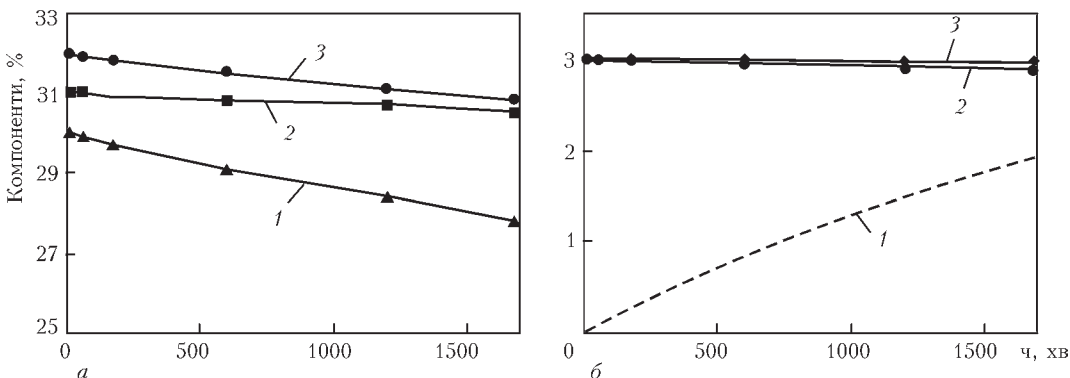


Рис. 3. Рівноважний вміст основних компонентів шлакової ванни: 1 — CaO; 2 — CaF<sub>2</sub>; 3 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (а); 1 — CaS; 2 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 — MgO (б) при температурі 1600 °С при переплаві сталі 316L із використанням шлаку АНФ-28 та із компенсацією шлаку витрат на гарнісаж

**Т а б л и ц я 3. Рівноважний вміст компонентів ванни металу із компенсацією витрат на утворення гарнісажу в кінці плавки (1800 хв.), мас. %**

Компоненти	C	Cr	Fe	Mn	Ni	Si	Mo	Fe <sub>3</sub> P	Fe <sub>3</sub> C	Cr <sub>4</sub> C	P	S
Початковий вміст	0,03	17,0	65,7	2,0	12,0	0,7	2,5	–	–	–	0,04	0,03
Після використання:												
АНФ-39	0,01	16,7	65,5	1,99	12,0	0,68	2,5	0,26	0,05	0,34	0	0
АНФ-28	0,01	16,7	65,5	1,98	12,0	0,69	2,5	0,26	0,05	0,34	0	0

**Т а б л и ц я 4. Рівноважний вміст компонентів газової фази із компенсацією витрат на утворення гарнісажу в кінці плавки (1800 хв.), мас. %**

Компоненти	Ar(g)	CO(g)	Fe(g)	Mn(g)	Mg(g)	Cr(g)	AlF(g)
Після використання:							
АНФ-39	99,7	0,02	0,01	0,14	0,05	0,01	0,03
АНФ-28	99,8	0,05	0,01	0,14	0,02	0,01	0,01

Для того, щоб запобігти відновленню алюмінію в металі, в склад шлаку вводять оксид кремнію у кількості більше 5 %, бо при менших кількостях відбувається перехід алюмінію в метал, як показано в розрахунках із шлаком АНФ-39. У випадку із використанням шлаку АНФ-28, що містить 20...24 % SiO<sub>2</sub> та до 5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не відбулося накопичення алюмінію в металі (табл. 3). Рівноважний вміст SiO<sub>2</sub> збільшився на 0,3 %, а у ванні металу відбулося зменшення на 0,01 % від заданого. Десульфуруюча здатність шлаку АНФ-28 дещо нижча, ніж АНФ-39. Рівноважний вміст сульфиду сірки склав 1,9 %, відповідно відбулося зниження вмісту СаО з 27 до 25 %.

Розрахунки рівноважного складу ванни металу показали можливість утворення і таких сполук як Fe<sub>3</sub>P — 0,26 %, Fe<sub>3</sub>C — 0,05 %, Cr<sub>4</sub>C — 0,34 %, MoC — 0,01 %, вміст яких був однаковий в обох розрахунках. В таблиці 3 наведений рівноважний склад металеві ванни в кінці переплаву (1800 хв.) при використанні шлаків АНФ-39 та АНФ-28.

В табл. 4 показаний рівноважний вміст газової фази, що утворилася під шлаками АНФ-39 та АНФ-28 в кінці переплаву (1800 хв.), при компенсації витрат на гарнісаж. Відбулося випаровування Mg до 0,05 % (АНФ-39), 0,02 % (АНФ-28), відповідне зниження вмісту MgO в шлаковій фазі склало близько 0,05 % в обох випадках (рис. 3, 4). Виявлено випаровування СО: 0,02 % у випадку шлаку АНФ-39, 0,05 % — АНФ-28. Вміст в газовій фазі AlF при використанні шлаку АНФ-39 менший (до 0,01 %) ніж при АНФ-28, що пов'язано із нижчим вмістом глинозему в складі першого. Також відбулося незначне випаровування хрому до 0,01 % у випадку обох шлаків.

Фізико-хімічні розрахунки системи газ–шлак–метал не показали суттєвої відмінності при компенсації витрат на гарнісаж товщиною 1, 3, 5 мм в ході переплаву у порівнянні із розрахунками без додавання шлаку (табл. 5).

Отримані результати показують, що зменшення маси шлаку на утворення гарнісажу навіть до 17 % не спричиняє суттєвих змін компонентно-

**Т а б л и ц я 5. Рівноважний вміст компонентів шлакової ванни з врахуванням витрат на утворення гарнісажу товщиною 1, 3, 5 мм в кінці плавки (1800 хв.), мас. %**

Компоненти	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaS	FeO	MnO
Початковий вміст АНФ-39	32,0	31,0	30,0	3,0	4,0	–	–	–
Після використання:								
АНФ-39 1 мм	31,5	29,8	27,8	4,44	3,94	2,30	0,01	0,20
АНФ-39 3 мм	31,5	29,8	27,6	4,53	3,94	2,44	0,01	0,20
АНФ-39 5 мм	31,5	29,7	27,5	4,63	3,93	2,60	0,01	0,20
Початковий вміст АНФ-28	3,0	45,0	27,0	22,0	3,0	–	–	–
Після використання:								
АНФ-28 1 мм	2,89	44,3	25,1	22,3	2,95	1,96	0,03	0,45
АНФ-28 3 мм	2,88	44,3	25,0	22,4	2,95	2,06	0,03	0,45
АНФ-28 5 мм	2,87	44,3	24,9	22,4	2,95	2,17	0,03	0,45

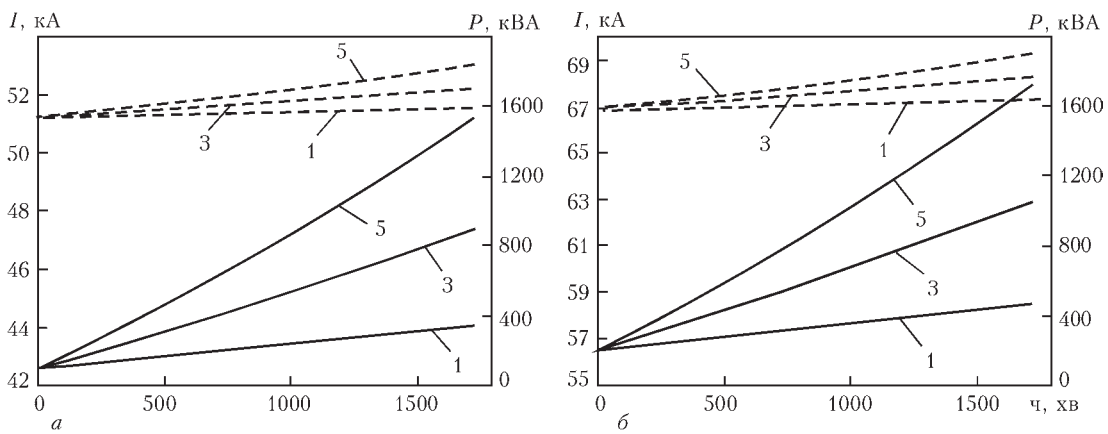


Рис. 4. Зміна струму  $I$  (суцільні лінії) та потужності  $P$  (пунктирна лінія) для гарнісажу 1, 3, 5 мм протягом плавки із шлаком АНФ-39 (а) та АНФ-28 (б)

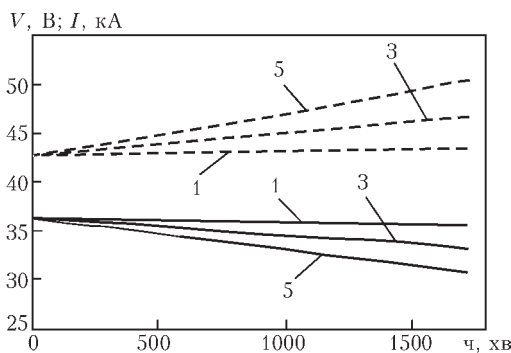


Рис. 5. Зміна струму  $I$  (пунктирні лінії) та напруги  $V$  (суцільні лінії) для гарнісажу 1, 3, 5 мм протягом плавки із шлаком АНФ-39 при постійній потужності 1550 кВА

го складу шлаку, що пов'язано з використанням інертної атмосфери, що захищає. Зміни компонентного складу металу відбуваються в рамках вимог щодо складу сталі 316L.

Встановлено, що лише додавання свіжого шлаку замість витраченого на утворення гарнісажу не достатньо, щоб компенсувати зміну компонентного складу системи, а зміна кількості та якості шлаку в ході переплаву залежить не лише від витрат на утворення гарнісажу.

**Оцінка електричних параметрів плавки.** При електрошлаковому переплаві шлак має певні значення опору та є провідником електричного струму, в результаті чого відбувається утворення тепла, що плавить електрод. Очевидно, що зі зменшенням висоти шлакової ванни, буде зменшуватися відстань між електродом та металевою ванною (при постійній глибині занурення електроду), що призведе до зменшення опору у ланцюзі і до зміни електричних параметрів переплаву.

Відповідно до витрат шлаку на гарнісаж товщиною 1, 3 та 5 мм і зменшення висоти шару шлакової ванни (рис. 1) проведено розрахунки електричних параметрів плавки за умови незмінної напруги джерела живлення. На рис. 5 показана

зміна струму та потужності на шлаковій ванні в залежності від часу виплавки та витрат шлаку на утворення гарнісажу. При розрахунках для шлаку АНФ-39 напруга на шлаковій ванні становила 36 В, а при АНФ-28 — 28 В. Ці значення забезпечують початкову потужність у шлаковій ванні на рівні 1550 кВт (електропровідність шлаку АНФ-39 — 205 1/Ом·м, АНФ-28 — 350 1/Ом·м).

Бачимо, що при зменшенні висоти шлакової ванни відбувається збільшення струму та потужності у шлаковій ванні. При витратах на гарнісаж товщиною 1 мм, значення  $I$  та  $P$  підвищується до завершення плавки на 3,5 %, 3 мм — 11 %, а 5 мм — більше ніж на 20 %.

Таким чином витрати шлаку на гарнісаж і відповідне зменшення висоти шлакової ванни призводять до підвищення витрат електроенергії.

На рис. 5 показана зміна струму та напруги на шлаковій ванні для висоти шлакової ванни, що відповідає витратам на утворення гарнісажу 1, 3 та 5 мм.

При стабільній потужності на шлаковій ванні і зменшенні висоти шлакової ванни відбувається перерозподіл співвідношення напруга/струм в бік підвищення струму і зниження напруги. При стабільній потужності на шлаковій ванні і зменшенні її висоти підвищується питома потужність на одиницю об'єму шлаку, а отже і продуктивність процесу і тому збільшення витрат електроенергії не відбувається (якщо розглядати систему без врахування реального опору ланцюга від джерела струму до електроду та піддону). Якщо розглядати реальну систему то втрати електроенергії в елементах струмовідводу збільшаться, а отже підвищаться сумарні витрати електроенергії.

Також варто зазначити, що при зменшенні глибини шлакової ванни відбувається збільшення глибини ванни металу. Це пов'язано із підвищенням питомої потужності на одиницю об'єму шла-

ку. В результаті збільшується швидкість плавки, що робить металеву ванну глибшою. Це призводить до порушень умов кристалізації злитку і виникає ймовірність отримання його із незадовільною структурою.

### Висновки

Отримані результати показують, що зменшення маси шлаку на утворення гарнісажу, навіть до 17 % не спричиняють суттєвих змін компонентного складу шлаку, зважаючи на інертну атмосферу газу. Зміни компонентного складу металу відбуваються в рамках вимог щодо складу сталі 316L.

Додавання шлаку, витраченого на утворення гарнісажу, не достатнє для компенсації зміни компонентного складу шлакової ванни і системи в цілому, оскільки зміни викликані ще й реакціями взаємодії елементів та їх випаровуванням.

Зі зменшенням висоти шлакової ванни відбувається перерозподіл між напругою та струмом, щоб зберегти потужність на шлаковій ванні. Тож, підвищується питома потужність на одиницю об'єму шлаку, а отже і продуктивність. Сумарні витрати електроенергії в реальній печі ЕШП збільшуються за рахунок втрати електроенергії в елементах токопідводу.

### Список літератури

1. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Шевцов В. Л. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Киев, Наукова думка.
2. Швердтфегер К., Кляйинн К. (1975) Скорость улечивания фтора из фторсодержащих жидких шлаков. *Электрошлаковый переплав*. Б. И. Медовар (ред.). Киев, Наукова думка, **3**, 101–110.
3. Roshin V. E., Malkov N. V., Gainullin A. A. et al. (1984) The kinetic of evaporation  $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2$  melts with rare-earth metals additions. *Proceedings of RAS. Metals.*, **3**, 56–61.
4. Клещенак Г. И. (2016) *Новые экологически чистые материалы для электрошлаковой переработки металлоотходов на основе меди*. [http://www.znk.by/arhiv/04\\_05/27.html](http://www.znk.by/arhiv/04_05/27.html).
5. Jhao J.-X., Chen Y.-M., LI X.-M. et al. (2011) Electroslag Remelting Process. *Journal of Iron and Steel Research, International*, **18**, 10, 53–28.
6. Shi C., Cho J., Zheng D. et al. (2016) Fluoride evaporation and crystallization behavior of  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-(TiO}_2)$  slag for electroslag remelting of Ti-containing steels. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **23**, 6, 627–636.
7. <http://www.science.gov> (United States) Busch J. D. (2017) *Flux entrapment and Titanium Nitride defects during electroslag remelting*.
8. Wang X., LI Y., Yan C. et al. (2012) The physical properties of  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  slag system for ESR of 12Cr. *Special Issue, Ninth International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*, CD.
9. Zhao J., Ling H., Zhan Zh et al. (2012) Mechanism of slag chemical composition change in ESR process. *Ibid*.
10. Guo M. (2013) Mechanisms of calcium oxide dissolution in  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ -based slags. *Proceedings of the*

- International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC13)*, pp. 101–107.
11. Arh B., Podgornik B., Burja J. (2016) Electroslag remelting: a process overview. *Materials and technology*, 971–978.
12. Мадоно О. (1975) О производстве сверхкрупных слитков методом ЭШП. *Электрошлаковый переплав*. Б. И. Медовар (ред.). Киев, Наукова думка, **3**, сс. 303–308.
13. [http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/raedwitz\\_emc201\\_id\\_3459.pdf](http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/raedwitz_emc201_id_3459.pdf). Radwitz S., Morscheiser J., Friedrich B. (2013) Parameters Determining Solidification Structure and Process Efficiency of ESR Superalloys. *Proceedings of European Metallurgical Conference (EMC 2013)*, pp. 1–6.
14. Стовпченко Г. П., Лісова Л. О., Медовар Л. Б. та ін. (2016) Розробка шлаку електрошлакового переплаву, схильного до саморозпаду. *Современная электрометаллургия*, **3**, 3–8.
15. Медовар Б. И., Шевцов В. Л., Мартын В. М. и др. (1988) *Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла*. Б. Е. Патон (ред.). Киев, Наукова думка.
16. Chang L. Z. 3 et al. (2014) Study on mechanism of oxygen increase and countermeasure to control oxygen content during electroslag remelting process. *Ironmaking and Steelmaking*, **41**, 3, 182–186.
17. Жеребцов С. Н., Радченко В. Г. (2003) Электрошлаковый переплав стали марок 20К и 22К. *Ползуновский альманах*, **4**, 176–177.

### References

1. Medovar B. I., Tsykulenko A. K., Shevtsov V. L. (1986) *Metallurgiya elektroshlakovogo protsessa*. Kiev, Naukova dumka. [in Russian].
2. Shverdtfeger K., Klyaynn K. (1975) Skorost uletchivaniya flora iz ftorsoderzhazhchikh zhidkikh shlakov. *Elektroshlakovy pereplav*. B. I. Medovar (red.). Kiev, Naukova dumka, **3**, 101–110. [in Russian].
3. Roshin V. E., Malkov N. V., Gainullin A. A. et al. (1984) The kinetic of evaporation  $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2$  melts with rare-earth metals additions. *Proceedings of RAS. Metals.*, **3**, 56–61.
4. Kleshchenak G. I. (2016) *Novye ekologicheski chistye materialy dlya elektroshlakovoy pererabotki metallotkhodov na osnove medi*. [http://www.znk.by/arhiv/04\\_05/27.html](http://www.znk.by/arhiv/04_05/27.html). [in Russian].
5. Jhao J.-X., Chen Y.-M., LI X.-M. et al. (2011) Electroslag Remelting Process. *Journal of Iron and Steel Research, International*, **18**, 10, 53–28.
6. Shi C., Cho J., Zheng D. et al. (2016) Fluoride evaporation and crystallization behavior of  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-(TiO}_2)$  slag for electroslag remelting of Ti-containing steels. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **23**, 6, 627–636.
7. <http://www.science.gov> (United States) Busch J. D. (2017) *Flux entrapment and Titanium Nitride defects during electroslag remelting*.
8. Wang X., LI Y., Yan C. et al. (2012) The physical properties of  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  slag system for ESR of 12Cr. *Special Issue Ninth International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*, CD.
9. Zhao J., Ling H., Zhan Zh et al. (2012) Mechanism of slag chemical composition change in ESR process. *Ibid*.
10. Guo M. (2013) Mechanisms of calcium oxide dissolution in  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ -based slags. *Proceedings of the International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC13)*, pp. 101–107.
11. Arh B., Podgornik B., Burja J. (2016) Electroslag remelting: a process overview. *Materials and technology*, 971–978.

12. Madono O. (1975) O proizvodstve sverkhkrupnykh slitkov metodom ESR. *Elektroshlakovy pereplav*. B. I. Medovar (red.). Kiev, Naukova dumka, 3, ss. 303–308. [in Russian].
13. [http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/raedwitz\\_emc201\\_id\\_3459.pdf](http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/raedwitz_emc201_id_3459.pdf). Radwitz S., Morscheiser J., Friedrich B. (2013) Parameters determining Solidification Structure and Process Efficiency of ESR Superalloys. *Proceedings of European Metallurgical Conference (EMC 2013)*, pp. 1–6.
14. Stovpchenko G. P., Lisova L. O., Medovar L. B. et al. (2016) Development of electroslag remelting slag, tended to autodecomposition. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, 3, 3–8. [in Ukrainian].
15. Medovar B. I., Shevtsov V. L., Martyn V. M. i dr. (1988) *Elektroshlakovaya tigelnaya plavka i razlivka metalla*. B. E. Paton (red.). Kiev, Naukova dumka. [in Russian].
16. Chang L. Z. 3 et al. (2014) Study on mechanism of oxygen increase and countermeasure to control oxygen content during electroslag remelting process. *Ironmaking and Steelmaking*, 41, 3, 182–186.
17. Zherebtsov S. N., Radchenko V. G. (2003) Elektroshlakovy pereplav stali marok 20K i 22K. *Polzunovsky almanakh*, 4, 176–177. [in Russian].

**ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ШЛАКА ПРИ ЭШП НА СОСТАВ МЕТАЛЛА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА**

**Л. А. Лисова<sup>1</sup>, А. П. Стовпченко<sup>1,2</sup>, Л. Б. Медовар<sup>1,2</sup>, В. Л. Петренко<sup>1,2</sup>**

<sup>1,2</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03068, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Инжиниринговая компания «Элмет-Ролл».

А. с. 259, 03150, г. Киев. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Описаны возможные пути расхода шлака при электрошлаковом переплаве. Оценено количество потерь на образование гарнисажа разной толщины (1, 3, 5, 10 мм) при переплаве крупногабаритного слитка с использованием шлаков АНФ-39 и АНФ-28. Рассмотрены изменения компонентного состава системы газ–шлак–металл, которые вызваны уменьшением массы шлака на образование гарнисажа и в случае компенсации этих потерь. Исследовано влияние изменения количества шлака на технологические параметры плавки ЭШП. Библиогр. 17, табл. 5, ил. 5.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; шлаковый гарнисаж; потери шлака; свойства шлака; система газ–шлак–металл

**EFFECT OF SLAG CONSUMPTION IN ESR ON METAL COMPOSITION AND PROCESS TECHNOLOGICAL PARAMETERS**

**L.A. Lisova<sup>1</sup>, A.P. Stovpchenko<sup>1,2</sup>, L.B. Medovar<sup>1,2</sup>, V.L. Petrenko<sup>1,2</sup>**

<sup>1,2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.

11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Engineering Company «ELMET-ROLL»

A. C. 259, 03150, Kiev. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

The paper describes the possible slag losses in electroslag remelting. The amount of losses for skull formation of different thickness (1, 3, 5, 10 mm) was evaluated in remelting of large-sized ingot using slags ANF-39 and ANF-28. Changes in component composition of gas–slag–metal system, which were caused by decrease in slag mass for skull formation and in case of compensation of these losses, are considered. The effect of changes in slag amount on technological parameters of melting was investigated. Ref. 17, Tables 5, Figures 5.

**Key words:** electroslag remelting; slag skull; slag losses, slag properties; gas–slag–metal system

Надійшла 16.05.2017

**ММК им. Ильича РАСШИРЯЕТ СОРТАМЕНТ ПРОДУКЦИИ**



Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича (ММК им. Ильича, Украина) освоил производство оцинкованного рулонного проката толщиной 2 мм.

Новинку выпустил цех холодной прокатки. Опытная партия в 50 т уже отправлена украинскому заказчику.

Раньше комбинат не мог выпускать холоднокатаные оцинкованные рулоны толщиной 2 мм, поскольку этого не позволяли технические характеристики сварочного оборудования АГНЦ 2-У, однако специалисты предприятия все же смогли найти оптимальное техническое решение.

ММК им. Ильича готов к промышленному производству этого вида проката и ждет от заказчиков отзывов по поводу качества отправленной им продукции. После получения положительного ответа комбинат сможет предлагать оцинкованный прокат толщиной 2 мм не только украинским, но и зарубежным партнерам.

<http://korrespondent.net/business>