

СУЧАСНІ ДАТЧИКИ РІВНЯ РІДКОГО МЕТАЛУ ДЛЯ ЕШП В КОРОТКОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

В.Л. Петренко¹, Г.П. Стовпченко^{1,2}, В.А. Ткаченко¹, Д.В. Коломієць¹, Л.Б. Медовар¹

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²Інжинірингова компанія ПП «ЕЛМЕТ-РОЛ». 03150, м. Київ, а/с 259, Україна. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Розглянуто можливості та обмеження існуючих типів датчиків положення границі розділу металеві і шлакової ванни при електрошлаковій виплавці зливків різного розміру з їх витягуванням з короткого кристалізатора. Запропоновано та випробувано індукційний датчик рівня вбудованого типу власної розробки, який дозволяє вимірювати розташування границі шлак–метал з високою точністю. Включення сигналу датчика рівня ДУИ-20 в систему управління пиччоу дає можливість вести стабільний технологічний процес в автоматичному режимі і виробляти суцільні, порожнисті і наплавлені електрошлакові зливки найвищої якості в коротких (постійного перерізу, Т-подібних і струмопідвідних) кристалізаторах. Бібліогр. 23, рис. 3.

Ключові слова: датчик рівня; межа розділу шлак–метал; електрошлаковий переплав; короткий кристалізатор; система управління

Поява потужних комп'ютерів і програмних засобів сьогодні дозволяють збирати, накопичувати і аналізувати великі масиви даних, що дає змогу впроваджувати ефективні системи керування для здійснення та оптимізації ходу технологічних процесів. Сучасні системи управління складними машинами і установками конструюють таким чином, щоб виключити можливість помилки оператора, вести енергоефективний, стабільний технологічний процес в автоматичному режимі, що гарантує отримання продукції високої і відтворюваної якості [1–3].

Сьогодні управління процесом електрошлакового переплавлення ведеться шляхом вимірювання і передачі до потужного контролера великої кількості змінних значень показників роботи печі і виведення з контролера керуючих дій для коригування тих чи інших технологічних параметрів. Системи управління печей ЕШП, які проектує компанія ЕЛМЕТ-РОЛ [3] забезпечують їх повну функціональність шляхом вирішення наступних задач:

моніторинг, аналіз та автоматичне управління процесом переплавлення в режимі реального часу;

он-лайн обчислення та розрахунок параметрів управління та налаштування периферійних автоматизованих регуляторів;

моніторинг та автоматичне управління системами водоохолодження та подачі захисного газу, механізми подачі та зміни електрода і витягування зливка при плавці в короткий кристалізатор і т. п.;

централізований контроль, накопичення та збереження всіх змінних даних;

функції діалогу людина–машина (Human Machine Interface), візуалізація технологічних параметрів, ор-

ганізація ефективного реагування на проблеми і подання відповідних тривожних сигналів.

Невід'ємною складовою систем управління печей ЕШП є різноманітні датчики, які вимірюють та переробляють параметри процесу переплаву і роботи механізмів в електричні сигнали, які передаються до контролера. Сучасні печі ЕШП зазвичай оснащені датчиками, що вимірюють вагу електрода, електричні параметри процесу (струм і напругу на джерелі живлення та електродотримачеві), температуру електрода, поверхню шлаку і зливка, швидкість подачі електрода в шлакову ванну, температуру та витрату охолоджуючої води, витрату захисного газу, наявність в приямку кисню, тощо. Окрім безпосереднього вимірювання і врахування різних фізичних величин система управління (СУ) ще й обраховує деякі показники, які неможливо безпосередньо виміряти (створюючи так звані програмні датчики, наприклад, положення торця електрода в шлаковій ванні).

При ЕШП з витягуванням зливка точне і постійне вимірювання рівня ванни рідкого металу в кристалізаторі закладає фундамент безпечної роботи печі, оскільки запобігає переливам шлаку та проривам сталі, що є конче необхідним для одержання гладкої поверхні зливка для переробки ковкою або прокаткою без обдирання та зачищення. У даній роботі проаналізовано переваги та недоліки різних типів датчиків рівня шлакової ванни і рідкого металу, що використовують при ЕШП в короткому кристалізаторі, та деякі перспективні рішення, що застосовуються в МБЛЗ, а також запропоновано схему вимірювань та надано характеристики індуктивного

В.Л. Петренко — <https://orcid.org/0000-0003-2440-1901>, Г.П. Стовпченко — <https://orcid.org/0000-0002-6555-5715>,

Л.Б. Медовар — <https://orcid.org/0000-0003-2077-5965>

датчика рівня рідкого металу власної розробки, який успішно пройшов перевірку в лабораторних та промислових умовах в Україні та за кордоном.

Датчики рівня розплаву в кристалізаторі. Рівень шлаку в печах ЕШП попереднього дизайну та в машинах безперервного лиття був візуально видимим і його визначення можна було виконати простими методами, такими як контроль за шкалою на стінці кристалізатора або вимірювання лінійкою. Однак при веденні процесу в закритій камері, як це передбачено в сучасних печах ЕШП, або з наддувом захисного газу такі вимірювання стають незручними і неточними, тож сьогодні з цією метою використовують різноманітні датчики.

Датчики контактного типу. Найбільш простим пристроєм, здатним контролювати рівень розплаву в кристалізаторі, є контактний датчик, що являє собою металевий або футерований стрижень. Стрижень встановлюють вертикально з наближенням нижнього торця до ванни розплаву і під'єднують до приладу, який сигналізує про появу струму при замиканні електричного ланцюга при контакті стрижня з рідким шлаком/металом.

Дуже простий за конструкцією такий датчик однак є недовговічним та ненадійним. По-перше, тривале перебування в зоні високих температур знижує механічні властивості стрижня, який може ще й окислюватися, а по-друге, при контакті зі шлаком на торці такого стрижня утворюється твердий шар шлаку (рідше — металу), який в подальшому перешкоджає або суттєво затримує відклик при наступному підйомі шлаку (на розплавлення кірки витрачається час).

Контактні датчики не придатні для постійного контролю в системі управління пиччу, тому їх зазвичай використовують в якості додаткового аварійного приладдя для запобігання надмірного підйому рівня металу в кристалізаторі.

Радарні датчики рівня шлакової ванни. Радарні датчики за діапазоном робочих частот поділяють на ультразвукові та мікрохвильові. Високочастотне електромагнітне випромінювання у вигляді вузькоспрямованого імпульсу направляють у бік контрольованого об'єкта. Відстань від датчика до нього визначається за різницею в часі між прямим та відбитим сигналом. Датчик встановлюють таким чином, щоб спрямувати генеруючий імпульс перпендикулярно до поверхні дзеркала ванни.

Про використання таких датчиків в своїх печах ЕШП повідомляє, наприклад, компанія INTECO (Австрія). Для точного виявлення та контролю рівня рідкої шлакової ванни ними розроблено спеціальний радіолокаційний датчик рівня шлакової ванни, який (за повідомленням виробника)

вже використовується в промисловості. Попередній спосіб визначення рівня шлакової ванни був заснований на розрахунку вільного борту з залученням параметрів, які мали відхилення, що вело до деяких недоліків і неточностей контролю процесу. Завдяки використанню радарної системи контролю можливо постійно мати інформацію про рівень шлакової ванни. Це дає більш точний контроль процесу, в тому числі забезпечує автоматичний старт і роботу механізму витягування з попередньо встановленим рівнем шлакової ванни [4].

Перевагою радарних вимірювань є те, що наявність пилу, випаровувань і пари не впливають на радіолокаційні сигнали і вони можуть забезпечити точність в межах міліметрів навіть при відстані до 400 м. Радари не мають рухомих частин або скляних поверхонь, тому їх легко обслуговувати. Система здатна зчитувати щонайменше 40 вимірювань в секунду і вони можуть передаватися контролеру ПЛК або системам автоматичного управління другого рівня за допомогою різних протоколів [5].

При безперервному литті, де товщина шлаку є меншою, радарні датчики дозволяють вимірювати розташування дзеркала металу з невеликою погрешністю та навіть визначати рівень шлаку і металу. Так, авторами роботи [6] було продемонстровано, що надширококутний радіолокаційний систем з пропускну здатністю понад 20 ГГц у поєднанні з великою попередньою обробкою даних здатна виявляти та розрізняти відбиття від сталі та розливної суміші в кристалізаторі. Показано, що вимірювання рівня рідкої сталі на основі системи RADAR досягають точності 1 мм роздільної здатності в робочому діапазоні понад 150 мм.

Слід відмітити, що системи з пропускну здатністю в діапазоні 20 ГГц вимагають використання великих антен і дають промінь з широким кутом розкриття і тому сьогодні більш вживаними є ті, що працюють з пропускну здатністю 80...120 ГГц, для яких кут становить 2...6°.

Тобто наявний прогрес дозволяє сподіватися, що використання радарних датчиків і сучасних систем обробки даних дозволить в майбутньому їх використання при ЕШП не тільки для точного визначення положення поверхні шлакової ванни, але й границі шлак–метал.

Оптично-пасивні та активні (лазерні) датчики. Контроль рівня поверхні ванни в кристалізаторі може бути здійснено і за допомогою відеокамери або тепловізору з подальшою обробкою рівнів яскравості і/або температурного поля та їх перерахунку на розташування рівня поверхні шлаку.

Спеціалістами компанії «SMS group GmbH» [7] розроблено нову технологію вимірювання рівня

рідкого металу в кристалізаторі МБЛЗ, яка базується на використанні оптичного скляного волокна з решітками Fibre Bragg. Загалом 12 оптичних волокон, кожне з яких має 10 індивідуальних точок вимірювання температури, зчитуються спектрометром одночасно. У порівнянні з використанням термопар при цьому способі значно менше кабелів, а сигнал датчика набагато більш динамічний і на нього не впливає робота установки електромагнітного переміщення. Такий спосіб може бути перспективним і для ЕШП, оскільки дає широку зону контролю, що може допомогти утримувати границю шлак–метал.

Основною перевагою оптичного методу вимірювання є можливість розташування вимірювальної установки на віддаленні від кристалізатора в зручному для цього місці. Однак слід враховувати, що віддалення приладу вносить похибку виміру, яка посилюється при значному задимленні простору над кристалізатором, що є характерним для ЕШП, крім того прозорість розплавленого шлаку є обмеженою і змінною в ході процесу.

Різновидом оптичного датчика є лазерний, який передбачає триангуляційний вимір плям лазерних променів на поверхні розплавленого металу, що спостерігаються спеціальною оптичною системою з матрицею в складі датчика. Заявлена робоча температура для вимірюваного металу становить до 1000 °С, що робить його придатним тільки для роботи з металами з низькою температурою плавлення, наприклад з алюмінієм [8].

Провідний виробник оптичних датчиків компанія «Ergolines» розробила нову оптичну систему (OPD), яка дозволяє контролювати в реальному часі товщину порошку та рівень сталі при безперервному литті. У той час як мультиспектральна камера контролює витрату порошку шляхом спеціальної обробки зображень, лазерний сканер служить пристроєм управління первинним рівнем [9].

Аналогічний підхід напевно можна використати для встановлення часу додавання порцій свіжого шлаку при ЕШП при комбінації оптичного датчика з радіаційним чи індуктивним сенсором, який би контролював положення границі шлак–метал.

Тож використання оптичних датчиків для визначення розташування рівня шлаку є можливим, але точність вимірювання і відтворення результатів при їх використанні обмежені температурою металу/шлаку і істотно залежать від прозорості газового середовища над ванною розплаву.

Таким чином, можна стверджувати, що за виміром рівня шлаку і з залученням даних про швидкість подачі електрода та витягування зливка можна приблизно оцінити розташування границі

розділу шлак–метал, однак не достатньо точно зза похибки, яку може вносити утворення гарнісажу великої товщини. Оскільки товщина шару шлаку і його витрата на гарнісаж є доволі великою і не прогнозованою, то розташування шлакової ванни є додатковим показником. Додаткову похибку може вносити величина заглиблення електрода, оскільки в сучасних технологіях використовуються великі коефіцієнти заповнення. З найбільшою точністю положення металевої ванни за даними датчика про рівень шлакової ванни можна оцінити при використанні сучасної системи управління зі свінг-контролем, при якому занурення електрода контролюється системою автоматичного управління. Однак для електрошлакових технологій з витягуванням зливка в короткому кристалізаторі і, особливо, в Т-подібному навіть така точність не є достатньою, оскільки підйом металу в верхню широку секцію призводить до підвисання зливка і неможливості подальшого його витягування.

Датчики положення границі шлак–метал. Геометрична локація границі шлакової і металевої ванн є найбільш складною для вимірювання, оскільки вона розташована в водоохолоджуваному кристалізаторі між двома високотемпературними і дуже агресивними середовищами, які до того ж постійно змінюють свій об'єм. Рідка металева ванна твердне в кристалізаторі і оновлюється за рахунок плавлення електрода, а шлакова ванна втрачає шлак на гарнісаж і додається порціями свіжого шлаку або його компонентів. В той же час знання місця розташування цієї границі є необхідним для правильного встановлення продуктивності плавлення, щоб не допускати великого занурення електрода і вести процес з невеликою глибиною металевої ванни, що є запорукою однорідної структури і високої якості готового зливка.

Підтримання сталості рівня при електрошлаковому перепаві в короткому кристалізаторі з витягуванням зливка є її умовою стабільного ходу процесу і запобігання проливу металу та шлаку, і, як наслідок, безаварійності роботи печі. Значні коливання рівня металу викликають також й утворення поверхневих дефектів, які знижують якість зливка.

Визначення та підтримання положення границі розділу металевої і шлакової ванни в процесі ЕШП є однією з задач СУ плавкою. Зміна продуктивності процесу веде до зміни геометрії плавильного простору (і навпаки). Тож, щоб не було стрибків рівня потрібно уникати стрибків продуктивності плавлення. Складність полягає в тому, що в кристалізаторі ЕШП одночасно відбуваються і плавлення електрода, і формування зливка, а на поверхні меніску рідкометалевої ванни присутній

товстий шар шлаку. Система є інерційною і доволі повільно реагує на зміни продуктивності, що є перевагою ЕШП, але зменшує можливості оперативного реагування.

Основним елементом, що забезпечує роботу автоматичної системи стабілізації рівня в коротких кристалізаторах, зазвичай є датчик рівня металу, завданням якого є індикація положення границі розділу шлак–метал в кристалізаторі. Точність стабілізації рівня металу в кристалізаторі не повинна бути гірше за ± 5 мм, причому прилад має бути надійним і забезпечувати показання протягом тривалого часу — 100 год. і більше на промислових установках ЕШП.

У зв'язку з цим нижче виконано аналіз найбільш цікавих і перспективних розробок датчиків контролю рівня металу.

Температурні датчики (термопари). Вимірювання теплового поля кристалізатора за допомогою ряду термопар є одним із найбільш відомих і давніх методів контролю розташування границі шлак–метал, який використовували ще наші попередники, винахідники процесу ЕШП.

В роботі [1] наведено опис системи управління з використанням термопарних датчиків. Зокрема вказується, що для виробництва високоякісних сталевих зливок шляхом ЕШП з рухомих кристалізатором необхідно розробити систему управління (СУ), яка регулює швидкість витягування зливка з кристалізатора. Така система запрограмована на контроль рівня границі шлак–метал, який вимірюється термічними датчиками, що детектують різкі зміни теплового потоку від розплавленого металу і шлакової ванни. Такий тип СУ був встановлений в цеху ЕШП металургійного заводу «Серп і молот», яка забезпечила необхідну швидкість реагування, надійність і вибірковість. Температурний датчик складається з циліндричної, водоохолоджуваної капсули, яка містить дві мініатюрні термопари, з'єднані диференційно і закарбовані «нагаряче» в донці капсули. Термопарні голівки розміщені одна над одною в напрямку руху кристалізатора [1].

Сьогодні у стінку кристалізатора у її вертикальній площині встановлюється цілий ряд термопар, які знімають теплове поле. По показникам цього поля судять про зміну рівня металу. Однак термопарні датчики застосовуються частіше в дослідницьких цілях, оскільки вимагають використання додаткових розрахунків або математичного моделювання (наприклад, за кінцево-різницевою схемою обчислення теплових потоків).

Недоліком такої схеми є велика кількість термопар, необхідність розробки та адаптації правильного алгоритму і математичної моделі, врахування

теплової інерції при підйомі і опусканні рівня. Велике число точок вимірювання ускладнює систему управління, а відповідне число вимірювальних проводів — роботу та ремонт кристалізатора. Відзначимо, що при ЕШП застосування даної системи має додаткові обмеження, пов'язані з похибкою вимірювання через різну і непрогнозовану товщину шлакового гарнісажу, який працює як утеплювач і заважає оперативній фіксації різниці температур між шлаковою і металевою ваннами.

Радіоактивні датчики. Одними з найбільш поширених при ЕШП з коротким кристалізатором і в машинах безперервного лиття заготовок сьогодні є радіоактивні датчики близького типу. Радіоактивний датчик зазвичай складається з 2-х основних частин: радіоактивного джерела випромінювання (випромінювача з радіоактивним ізотопом, наприклад, Co-60, Cs-137) і приймача (сцинтиляційного лічильника), розташованих за стінкою кристалізатора. Приймач фіксує зміну ширини зони випромінювання при її перекритті піднімаючим металом, який не повинен перевищувати діапазон коливань фонового випромінювання.

Принцип роботи з радіоактивним датчиком на печі ЕШП з Т-подібним кристалізатором викладено в роботі [10]. Сигнал для контролю рівня рідкого металу створюється за допомогою радіоактивного ізотопного сцинтилятора Co-60. Вимірювальні прилади встановлюють у верхньому кінці вузької частини кристалізатора. Якщо рівень металу стає занадто високим, сигнал, який надсилається радіоактивним джерелом і виявляється сцинтилятором, встановленим на протилежній стороні форми, буде зниженим. Така зміна сигналу змушує систему управління витягувати піддон (зі зливком), що призведе до зниження рівня металу.

Систему контролю положення границі розділу шлак–метал з використанням принципово нового варіанту використання безконтактного датчика рівня з гама-випромінювачем Na-22 запропоновано в патенті [11]. Датчик функціонує за принципом уловлювання відбитого сигналу, що за даними авторів дозволяє використовувати його для кристалізаторів великого діаметру. Датчик використано в системі управління печі електрошлакового переплаву ЕШП-15/30У, яку було спроектовано для випуску суцільних і порожнистих зливок.

В роботі [12] описано вдосконалений радіометричний датчик рівня рідкого металу у кристалізаторі машини безперервного лиття, який дозволяє вирішити проблему постійного лиття в закритому просторі при неможливості визначення факту власного положення меніску рідкої сталі через вплив розливної суміші невизначеної товщини,

що спотворює результати. Роздільна розшифровка показань вертикального пакету сцинтиляційних кристалів, які використовують замість одиночного кристалу, дозволяє з високою точністю визначити і рівень меніска, і товщину шару порошку завдяки їхньої різної щільності.

Цікавим є рішення [13], яке передбачає одночасне використання датчиків двох типів — радіаційного і електромагнітного, що дозволило авторам контролювати товщину шлакової суміші на поверхні металу в кристалізаторі блюмової машини БЛЗ.

Для ЕШП при діаметрі кристалізатора меншому за 500...600 мм випромінювач і приймач можуть бути розташовані діаметрально, а при виплавці зливків більших розмірів через погіршення потужності сигналу їх розміщують на кінцях хорди. В останньому випадку через екранування стінкою кристалізатора та високий рівень фонового і вторинного радіаційного випромінювання точність визначення границі шлак–метал є меншою. У цих умовах необхідно збільшувати перешкодозахищеність приймача при збереженні або збільшенні порогу його чутливості та потужності джерела радіоактивного випромінювання, що робить його більш небезпечним.

До переваг радіоактивних датчиків відносять: точність вимірювання, стабільність роботи в умовах сильних електромагнітних полів, їх швидкодію, можливість контролю рівня металу через стінку кристалізатора. Основними недоліками є їх екологічна шкідливість та небезпека опромінювання персоналу, що вимагає застосування додаткових заходів безпеки при поводженні з джерелами радіації та складнощі їх утилізації.

Сьогодні ведуться роботи по розробці датчиків на основі інших типів радіаційного випромінювання, наприклад рентгенівського, як більш керованого і такого, що не викликає вторинної радіації. Однак останнім часом за причини шкідливості радіоактивного випромінювання для робітників використання таких скорочується.

Електромагнітні (індуктивні, вихрострумові) датчики. Електромагнітні датчики, до яких відносять індуктивні та вихрострумові, сьогодні вважають найдосконалішими системами для вимірювання рівня розплавленого металу у кристалізаторі з високою точністю та швидким часом відгуку.

Електромагнітні датчики складаються з генератора магнітного поля і приймача, який реагує на вторинне магнітне поле, що збуджується вихровими струмами (Фуко). Наближення рідкої сталі до генератора збільшує величину вихрових струмів і, відповідно, напруженість вторинного магнітного поля, яка й вимірюється таким датчиком.

За цим загальним принципом дії вже розроблено та використовується досить велике різноманіття конструкцій електромагнітних приладів для вимірювання рівня металу [14–17].

Автори роботи [15] розробили датчик, який складається з котушки збудження овальної форми в центрі корпусу та двох котушок приймача овальної форми, з'єднаних для формування градіометричної котушки, розташованої симетрично від центральної. Датчик пронизує розплав магнітним полем змінного струму, що генерує вихрові струми, які в свою чергу породжують вторинне магнітне поле. Первинне поле пригнічується градіометричними приймаючими котушками, що призводить до гарного співвідношення сигнал–фон для вторинного поля. Перетворення від амплітуди магнітного поля до рівня рідини здійснюється шляхом калібрування та згодом пристосування до даних сигмоподібної функції [15].

Вихрострумовий датчик рівня в кристалізаторі МБЛЗ, що працює на основі методу посилення позитивного зворотного зв'язку, розроблено в роботі [16]. Цей новий безконтактний вимірювач здатен визначати рівень розплавленої сталі в кристалізаторі незважаючи на вплив шару розливальної суміші. Точність вимірювача рівня становить ± 1 мм при швидкій відповіді. Більше того, з теоретичного аналізу електромагнітного поля вимірювального рівня було розроблено диференціальний тип котушки детектування. Цей тип вимірювача рівня є більш стійким до впливу навколишнього середовища, наприклад, до положення стінки форми [16].

Електромагнітні датчики відрізняються по положенню вимірювання. Є такі, що розміщуються на верхньому фланці кристалізатора або такі, що вбудовують у його стінку. Зазвичай датчики, що розташовані над шлаковою/металевою ванною, забезпечують стабільне вимірювання на обмеженій відстані (0...200 мм). Зважаючи на сильне теплове випромінювання від ванни, датчики розміщують в корпусах з водяним охолодженням. Вихрострумові рівнеміри на фланці кристалізатора добре підходять для безперервного лиття, але для ЕШП вони мало корисні, оскільки можуть використовуватися лише як датчик розташування верхнього рівня шлакової ванни. Крім того сучасна практика ЕШП передбачає використання витратних електродів, які забезпечують високий коефіцієнт заповнення кристалізатора, тож місця в зазорі між електродом і кристалізатором недостатньо для датчика.

При установці датчика за стінкою мідного кристалізатора відбувається сильне екранування сигналу, тож точність показань невелика навіть при великій потужності індукованого сигналу.

Тому зрозуміло, що бажано максимально наблизити датчик до границі поділу шлак–метал. Гарною чутливістю (± 1 мм) володіють електромагнітні датчики, вбудовані в стінку кристалізатора, які застосовуються як в процесі ЕШП, так і при безперервному литті.

Розробка та використання електромагнітного (індуктивного) датчика рівня металу при ЕШП. Власний багаторічний досвід застосування різних датчиків рівня при ЕШП (оптичних, контактних, термодарних, індуктивних і радіоактивних), а також порівняльний аналіз даних літератури щодо датчиків, які працюють на машинах безперервного лиття, був використаний при створенні нового індуктивного датчика рівня. Враховували й те, що в обох процесах присутні сильні електромагнітні поля, причиною появи яких при ЕШП є протікання потужного струму (до 100 кА й більше) в ланцюгу електрод–шлакова ванна–металева ванна, а при безперервному литті — спеціальні пристрої для гальмування потоків металу в кристалізаторі та перемішування рідкої серцевини. Потужні електромагнітні поля є завадою передачі сигналів від датчиків, що необхідно враховувати і встановлювати спеціалізовані екрановані кабелі.

Принцип роботи розробленого індуктивного датчика полягає в використанні спеціального трансформатора з робочими і вимірювальними обмотками, де наводяться зустрічні магнітні потоки [17, 18]. Тож розроблений датчик хоча й використовує ефект наведення вихрових токів в розплаві, але за методом вимірювання він фактично є диференційним трансформатором. При появі в зоні розташування датчика розплавленого шлаку та металу відбувається ослаблення магнітних потоків наведеними вихровими струмами, причому в силу багаторазової різниці в електропровідності розплавленого металу та шлаку це ослаблення є суттєво різним.

Завдяки цьому й максимальному наближенню вимірювача до розплаву датчик дуже чутливий до зміни положення металу в зоні детектування.

На рис. 1 наведена принципова схема роботи індуктивного датчика вимірювання положення границі розділу між шлаком та металом, яку було розроблено в ІЕЗ майже 50 років назад [1]. Сьогодні в цю схему вимірювання різниці у вихрових токах, що датчик ініціює в шлаці та металі, внесено суттєві зміни, що дозволило зменшити розміри датчика і спростити його монтаж в корпус кристалізатора (рис. 2, а, б).

Створений індуктивний датчик ДУИ-20 пройшов всебічну перевірку в лабораторних умовах та успішно використовується на промислових печах ЕШП в Україні та за кордоном для контролю положення границі шлак–метал в кристалізаторах

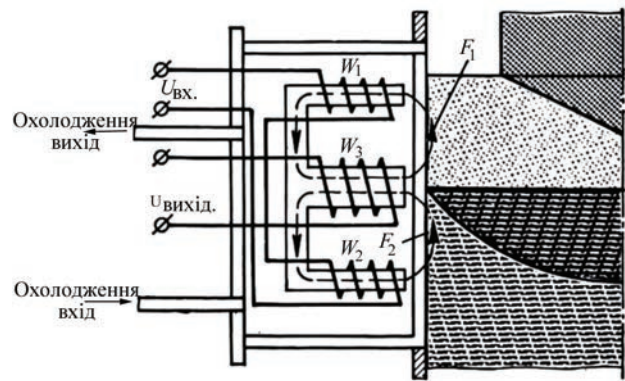


Рис. 1. Принципова схема роботи індуктивного датчика вимірювання положення границі розділу шлак–метал: U — напруга; W — трансформатор; F — магнітний потік

діаметром від 300 до 2000 мм (взагалі будь якого розміру, бо діаметр не впливає на точність вимірювання). Датчик ДУИ-20 перевірено при реалізації різних технологій ЕШП, зокрема, для виготовлення суцільних і порожнистих зливків та електрошлакового наплавлення в процесах ЕШП з рідким металом (ЕШП РМ). Точність вимірювання положення границі розділу шлак–метал є не гіршою за ± 1 мм, діапазон вимірювання не менше 20 мм, а при встановленні двох датчиків ДУИ-20 його може бути збільшено до 30...40 мм без зони нечутливості. Якщо датчики рознести на значну відстань у вертикальній площині, то утворюється зона нечутливості між датчиками і індикація границь розділу стає можливою на її межах в діапазоні 20 мм з кожного боку.

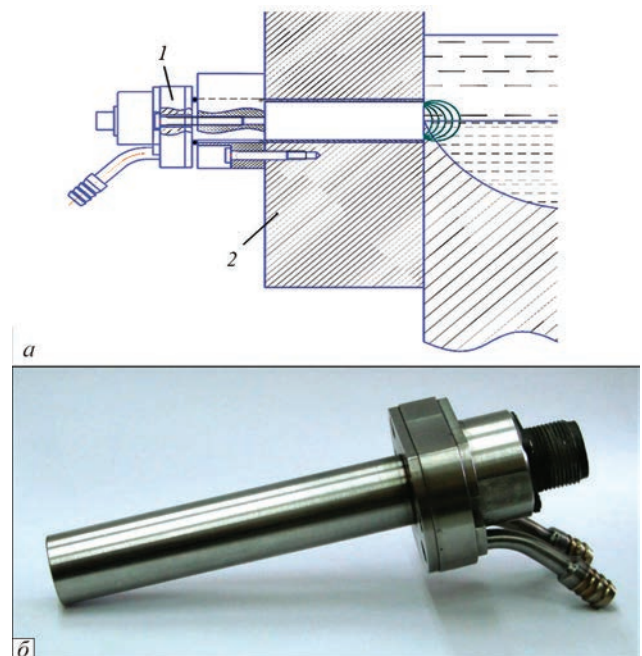


Рис. 2. Схема розміщення датчика рівня в стінці кристалізатора (а) і зовнішній вигляд датчика ДУИ-20 (б): 1 — датчик; 2 — кристалізатор

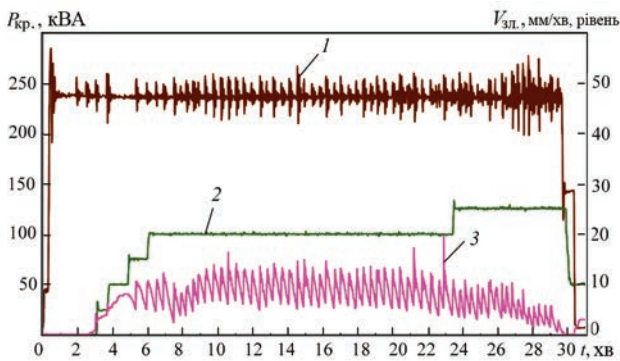


Рис. 3. Діаграма параметрів процесу ЕШП РМ при проведенні наплавки: 1 — $P_{кр}$; 2 — $V_{зл}$; 3 — рівень

Датчик ДУИ-20 показав високу стійкість при експлуатації на різних заводах, де він успішно застосовується як індикатор границі положення розділу шлак–метал, і є одним з основних сигналів, що відпрацьовує СУ піччю ЕШП. Розроблена система управління враховує та контролює не тільки електричні і масогеометричні параметри процесу в часі, але й постійно корегує положення границі шлак–метал. Орієнтуючись на сигнал датчика система управління при підвищенні рівня подає команду на прискорення витягування зливка з кристалізатора, а при зниженні рівня до обумовленого технологією мінімуму — на підвищення продуктивності плавлення електроду або заливку чергової порції рідкого металу в процесі ЕШП РМ.

На рис. 3 представлена діаграма параметрів гібридного процесу ЕШП РМ [19–22] при виробництві ремонтної наплавки чавунного прокатного валка діаметром 350 мм [23]. Наплавлений шар формували подачею рідкого металу в зазор між стінкою токопідвідного кристалізатора і віссю, встановленою в його центрі. Вісь (№ 31918, марка чавуну СПХН60), на яку наплавляли метал, мала діаметр 244 мм. В якості електроду для одержання рідкого металу використовували відпрацьований чавунний валок сортопрокатного стану. На графіку показано реєстрограму системи управління печі, на якій вхідну потужність у шлакову ванну ($P_{кр}$) надано в кВА, швидкість витягування зливка ($V_{зл}$) в мм/хв та значення сигналу датчика при цьому в мм (рівень).

Покази датчика починаються вже з третьої хвилини плавлення, коли після подачі перших порцій рідкого металу рівень дзеркала металевої ванни досягає нижнього краю зони вимірювання датчика. Кожна нова порція рідкого металу викликає підйом рівня металевої ванни. Відповідно зливок формувався зі сталою підведеною потужністю та швидкістю витягування. Для демонстрації можливостей датчика на 23-й хвилині плавлення швидкість витягування було збільшено і на діаграмі відразу стало помітне падіння рівня металу.

Досвідом експлуатації вбудованого індукційного датчика (в Т-подібних кристалізаторах для виплавки суцільних і порожнистих зливків, а також в струмопідвідних кристалізаторах при наплавленні валків прокатних станів) беззаперечно доведено, що датчик ДУИ-20 здатен стабільно працювати в промислових умовах більш як добу безперервно на протязі декількох місяців. Введення сигналу положення металевої ванни з системи вимірювання положення границі шлак–метал MLOC-2M (з використанням розробленого індуктивного датчика ДУИ-20) в систему автоматичного управління процесом ЕШП дозволяє забезпечити точність визначення границі шлак–метал і за рахунок цього стабілізувати та убезпечити роботу печі ЕШП та обладнання, автоматизувати ведення процесу електрошлакового переплаву. Датчик є перспективним для використання в гібридних процесах ЕШП та інших, де підтримання постійного положення границі поділу фаз розплавів з різними властивостями є важливим, а рівно й для безперервного лиття. Певним обмеженням використання розробленого датчика є те, що він є вбудованого типу і для його встановлення потрібен наскрізний отвір у стінці кристалізатора. У даний час ведуться роботи над зменшенням розміру і зміненням форми датчика з метою уможливлення його розміщення в невеликому зазорі між секціями кристалізатора.

Висновки

1. Аналіз принципів дії, переваг і недоліків різних типів датчиків для контролю рівня розплавів в кристалізаторах ЕШП та датчиків, що використовують при МБЛЗ в проекції перспектив їх використання при ЕШП, показав значний прогрес у конструкціях і використанні оптичних і індуктивних датчиків, точність яких залежить від їх розміщення і змінюється в залежності від умов ведення процесу: наявності перешкод у вигляді пилу і випаровувань для оптичних систем; зміни температури шлаку/металу; утворенні твердого гарнісажу для електромагнітних вимірювачів.

2. Вдосконалений електромагнітний (індуктивний) датчик вбудованого типу досліджено в лабораторних і випробувано в промислових умовах на печах ЕШП з витягуванням зливку з коротких (Т-подібних і струмопідвідних) кристалізаторів для визначення та стабілізації положення границі шлакової і металевої ванн.

3. Розроблений індуктивний датчик (ДУИ-20) і система вимірювання MLOC-2M продемонстрували високу точність (± 1 мм) детектування границі метал–шлак у кристалізаторах промислових печей ЕШП.

4. Введення сигналу датчика рівня рідкого металу в автоматичну систему управління процесом ЕШП дає можливість стабілізувати роботу печі та забезпечити роботу обладнання.

Список літератури/References

1. Medovar, B.I., Boyko, G.A. (1991) *Electroslag technology*. Springer Science & Business Media.
2. eokyoung, A., Beaman, J., Williamson, R., Melgaard, D. (2010) Model-based control of electroslag remelting process using unscented Kalman filter. *J. of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME*. DOI 132. 10.1115/1.4000660.
3. www.elmet-roll.com.ua
4. Kubin, M., Scheriau, A., Knabl, M. et al. (2013) Operational experience of large sized ESR plants and attainable quality of ESR ingots with a diameter of up to 2600 mm. In: *Proc. of LMPC*. DOI 10.1007/978-3-319-48102-9_8.
5. <https://www.australtek.com/products/steellevel.html>
6. Van den Berg, F., Yang, H. (2011) Real-time meniscus level and slag thickness measurement by RADAR. Pt II: Results on liquid steel and melting mould powder. In: *Proc. (DESAI, December 2–3, 2011, Jamshedpur, India)*. <http://eprints.nmlindia.org/4603/1/21-28.pdf>
7. Liefucht, D., Reifferscheid, M., Schramm, T. et al. (2013) HD mold — a new fiber-optical-based mold monitoring system. *Iron and Steel Technology*, **10**, 87–95.
8. <https://www.precimeter.com/zh-hans/.../laser-triangulation/proh-mould-edition/>
9. <http://www.ergolines.it/products/ptc/?str=1>
10. Alghisi, D., Milano, M., Paziienza, L. (2005) From ESR to continuous CC-ESRR process: Development in remelting technology towards better products and productivity. *La Metallurgia Italiana*, **1**, 21–32.
11. Levkov, L.Ya., Kamantsev, S.V., Krieger, Yu.N. et al. (2012) *A method for controlling the level of a liquid metal or slag bath in a mold and a device for its implementation*. RF Pat. 2456118 [in Russian].
12. Fabrizzoni, M., Mikhelov, G., Del Corso, F. et al. (2015) New radiometric sensor for measurement of liquid metal level in mold. *Chyornye Metally*, **6**, 54–62 [in Russian].
13. Korshikov, S.P., Fomin, V.I., Ustinov, A.I., Formakidov, A.M. (2019) Development and implementation of system for determination of actual level of metal and slag mixture thickness in mold of BCCM of JSC OEMK. *Metallurg*, **9**, 37–40 [in Russian].
14. <https://www.vuhz.cz/images/snimace-kontiliti/pdf/mold-level-measuring-system.pdf>
15. Ratajczak, M., Hernandez, D., Richter, T. et al. (2017) Measurement techniques for liquid metals IOP. *Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **228**. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/228/1/012023>.
16. Sano, K., Ando, S., Kawase, Y. et al. (2014) The eddy-current type continuous casting mold level meter. *Tetsu-to-Hagane*, **100**, 30–31.
17. Medovar, B.I et al. (1996) In: *Proc. of 38 MWSP (Cleveland, USA, 13–16 Oct. 1996)*, 83–87.
18. Petrenko, V., Medovar, L., Tkachenko, V. (2012) Modern sensors for metal level indication for ESR and CCM moulds. In: *Proc. of 5th Intern. Congress on the Science and Technology of Steelmaking (ICS 2012, Dresden)*, Publish. on CD. Paper ID 1307.
19. Medovar, L., Stovpchenko, G., Fedorovskiy, B., Petrenko, V. (2013) ESR technologies utilizing liquid metal: Process, equipment and products. In: *Proc. of 5th Baosteel Biennial Academic conference BAC-2013*. Publish. on CD.
20. Yanwu Dong, Zhouhua Jiang, Medovar, L. et al. (2013) Temperature distribution of electroslag casting with liquid metal using current conductive ring. *Steel Research International*, **84(10)**, 1011–1017. <https://doi.org/10.1002/srin.201300041>
21. Polishko, G., Stovpchenko, G., Medovar, L., Kamkina, L. (2019) Physicochemical comparison of electroslag remelting with consumable electrode and electroslag refining with liquid metal. *Ironmaking & Steelmaking*, **46(8)**, 789–793. DOI: 10.1080/03019233.2018.1428419.
22. Zaitsev, V., Medovar, L., Stovpchenko, G. et al. (2016) Reliable steel-copper anodes for direct current electric arc furnaces manufactured by electroslag remelting under two circuits diagram. In: *Proc. of the 2nd Medovar Memorial Symposium (MMS100) (07–10 June 2016, Kyiv, Ukraine)*, 211–215.
23. Medovar, L.B., Chernets, A.V., Grabovsky, Ts.F. et al. (2000) Experience in manufacture and application of rollers for ESS LM. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 3–9 [in Russian].

MODERN SENSORS OF LIQUID METAL LEVEL FOR ESR IN A SHORT COLLAR MOULD

V.L. Petrenko¹, G.P. Stovpchenko^{1,2}, V.A. Tkachenko¹, D.V. Kolomiets¹, L.B. Medovar¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

²Engineering Company PC «ELMET-ROLL».

P.O. Box 259, 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Possibilities and limitations of existing types of level sensors for detecting the interface between metal and slag pools at electroslag remelting of ingots of different sizes in a short collar mold with ingot withdrawing are presented. The built-in type induction sensor of proprietary design, allowing measurement of the location of the slag-metal boundary with high precision has been developed and tested. The use of the signal of DUI-20 level sensor in the ESR control system makes it possible to operate a stable technological process in the automatic mode and to produce solid, hollow and surfaced electroslag ingots of the highest quality in short collar (of constant cross-section, T-shape and current supplying) moulds. Ref. 23, Fig. 3.

Key words: metal level sensor; slag-metal interface; electroslag remelting; short collar mould; control system

Надійшла до редакції 02.04.2020