

<sup>1</sup>Г. Петриченко, <sup>2</sup>Н. Гоц<sup>1</sup>ТОВ НВФ “Харків-Прилад”<sup>2</sup>Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

## СПОСІБ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ВИПРОМІНЕННЯМ РОЗПЛАВУ МЕТАЛУ В ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВЛЕННЯ

© Петриченко Г., Гоц Н., 2012

Розглянуто особливості вимірювання температури розплаву металу в процесі електрошлакового переплаву. Визначено недоліки контактної методи вимірювання температури з використанням термометрів. Обґрунтовано доцільність використання термометрів випромінювання для вимірювання температури розплаву, запропоновано конструкції зондів із вмонтованими приймачами випромінювання. Математично описано особливості вимірювання температури за випромінюванням в процесі електрошлакового переплавлення металу.

**Ключові слова:** термометр випромінювання, температура, впливні фактори.

**The article discusses the features temperature melt metal during electroslag remelting. Detected flaws contact method of temperature measurement using thermocouples. Feasibility of using radiation thermometers to measure temperature of the melt, proposed design probes with built-in receivers radiation. Mathematically describes the features of temperature measurement by radiation in the process of electroslag remelting of metal.**

**Key words:** radiation thermometer, temperature, influence factors.

### Постановка проблеми

Інтенсивний розвиток різних галузей авіаційної, ракетно-космічної, атомної техніки поставив перед металургами завдання виробництва сталей та сплавів з певними хімічним складом та властивостями, а також із заданим поєднанням службових властивостей, наприклад, дуже високої міцності при одночасно високій пластичності і в'язкості. Також з кінця 70–80-х років ХХ століття гострою стала проблема дефіциту чистих металів: W, Mo, Pt, Ni, Ti, Cr, V та їхніх сплавів. Отримання таких сталей, сплавів і чистих металів стало можливим завдяки розвитку напряму металургії, розробленого в Інституті електрозварювання ім. Е.О. Патона – електрошлакового переплавлення.

Електрошлакове переплавлення (ЕШП) – електрометалургійний процес, під час якого метал (витратний електрод) переплавляється у ванні електропровідного синтетичного шлаку під дією тепла, що виділяється в шлаку при проходженні через нього електричного струму. Електрошлаковий модифікований метал відрізняється від металу, отриманого відкритою плавкою, дрібнозернистою структурою, високою хімічною однорідністю, відсутністю чужорідних оксидних включень, повітряних бульбашок, пор, раковин, тріщин, низьким вмістом шкідливих домішок сірки і фосфору, рівномірною щільністю металу за всім об'ємом, а, отже, й ізотропністю фізико-механічних властивостей за всіма напрямками.

Саме температурний режим процесу плавлення і визначає властивості металу, отриманого шляхом електрошлакового переплавлення. Тому вимірювання температури як шлаку, так і розплаву металу в процесі ЕШП є актуальним.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розглянемо особливості процесу електрошлакового плавлення, який схематично зображено на рис. 1. Витратний електрод є відливкою, прокатним виробом або виробом з кованого металу, отриманим у мартенівській, дуговій, вакуумно-індукційній печах або кисневому конверторі. Як початкову сировину використовують цілісні витратні електроди або такі, що складаються з обрізків прокату, лому, відпрацьованих деталей тощо. Шлак складається з  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та інших компонентів, а його температура може становити близько  $2500^\circ\text{C}$  та зазвичай на  $150 - 200^\circ\text{C}$  вища за температуру плавлення металу. Розплавлений метал, проходячи крізь шар (до 50 см) рідкого шлаку, інтенсивно рафінується від шкідливих домішок і неметалевих включень. Електрошлакове рафінування металу відбувається в пливці рідкого металу на кінці електрода, що оплавляється, при проходженні крапель металу через шлакову ванну і на поверхні розділу шлакової і металевої ванн (рис. 1).

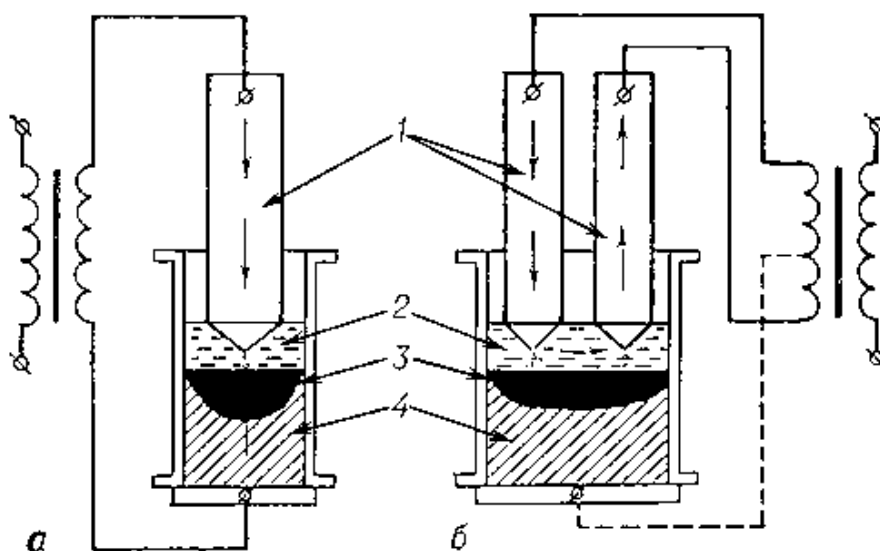


Рис. 1. Схема електрошлакового переплавлення з одним (а) і двома (б) електродами, що витрачаються:  
1 — витратний електрод; 2 — шар шлаку; 3 — металева ванна;  
4 — розплавлений метал із заданими властивостями, з якого формується злиток

Краплі рідкого електродного металу проходять крізь шар шлаку і утворюють під ним шар металу, з якого за послідовного твердіння у водоохолоджувальному кристалізаторі формується злиток. Змінюючи склад шлаку і температурний режим процесу, здійснюють вибіркове рафінування металу. В результаті того, що шар шлаку покриває розплавлений метал, тобто відсутній контакт металу з повітрям, вміст в металі сірки знижується в 2—5 разів, кисню і неметалічних включень — у 1,5—2,5 раза [1]. Електрошлаковий модифікований метал характеризується високою хімічною однорідністю та рівномірною щільністю металу за усім об'ємом, механічні властивості відливок з нього практично не відрізняються від властивостей кованої заготовки [2].

Методом ЕШП можна отримати злитки масою від десятків грамів до 200 тонн практично будь-якої форми, яка визначається формою кристалізатора. ЕШП застосовується в чорній металургії (шарикопідшипникові, конструкційні, нержавіючі, інструментальні сталі, жароміцні сплави), кольоровій металургії (хромиста бронза, нікелемідні сплави), важкому машинобудуванні (теплостійкі, високоміцні штампові, валкові сталі), при виробництві високотемпературної кераміки та камінному литві. З використанням ЕШП утилізують металобрухт чорних і кольорових металів, що відповідно поліпшує екологічну обстановку. Це виробництво відповідає вимогам санітарно-гігієнічних умов праці і гарантує збереження чистоти навколишнього середовища як на самих підприємствах, так і поблизу них. Експлуатація ЕШП значно дешевша і простіша, ніж сучасних індукційних печей.

На базі проведеного огляду ЕШЛ можна сформулювати такі особливості вимірювання температури розплаву металу:

- температура шлаку та розплавленого металу – до 3000°C;
- відсутність контакту розплавленого металу з повітрям внаслідок покриття металу шаром шлаку до 50 см;
- температура розплавленого металу нижча за температуру шлаку на 150 ÷ 200°C;
- агресивне хімічне середовище шлаку;
- наявність потужного електромагнітного поля.

Для вимірювання температури розплаву металу широко використовуються контактний метод вимірювання температури з використанням термоелектричного перетворювача, що кріпиться на зонд для занурення в розплавлений метал. Термопару захищають чохлам з кварцового скла, стійкого до термоудару. Після кожного виміру чохол замінюють, оскільки кварцове скло сильно деформується при високій температурі. Періодично замінюється і окиснена ділянка термоелектродів поблизу робочого спаю термопари шляхом змотування «свіжішого» дроту з котушок зонда. Зонд під'єднано до щитового вторинного приладу за допомогою компенсаційного кабелю.

У розплав металу крізь шар шлаку занурюється зонд, на якому кріпиться термоперетворювач (рис. 2). Зонд завдовжки до 2500 мм, довжина з'єднувального кабелю до електронного блоку – 1000 мм, вигнутий під кутом 150°. Задля запобігання внаслідок високих температур передчасному контакту термоперетворювача зі шлаком, який при високих температурах є високохімічно-активним і може привести до руйнування термоперетворювача, термоперетворювач розміщується в капсулі з кварцу і захищений ковпачком із легкого металу, який дужне швидко руйнується після занурення термоперетворювача в метал. У кварцовій трубці головки термоперетворювача знаходиться чутливий елемент (ЧЕ). У пакетах ПТПП використовується ЧЕ платина-платинородій; у пакетах ПТПР — платинородій-платинородій, у пакетах ПТВР — вольфрамрений-вольфрамрений [3]. Після занурення термоперетворювача в метал після руйнування захисного ковпачка термоперетворювач контактує з металом. Вихідний сигнал термоперетворювача пропорційний до значення вимірюваної температури розплаву металу.

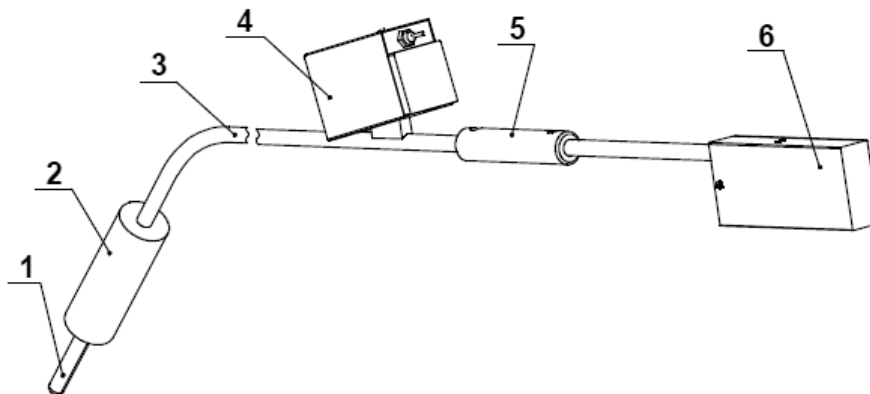


Рис. 2. Термозонд поплавкового типу:

- 1 – захисний ковпачок термопари; 2 – поплавок; 3 – металевий шланг;
- 4 – пристрій візуалізації значення температури розплаву металу;
- 5 – ручка; 6 – коробка з котушками для запасного дроту

Під час роботи використовують як одноразові, так і багаторазові термопари. Одноразову термопару розміщують у паперовій гільзі в кварцовому балоні, що запобігає передчасному руйнуванню термопари і має тонкий захисний наконечник із металу, який розплавляється за дії високої температури, коли зонд пробиває шар шлаку – надалі термопара контактує безпосередньо з металом до завершення вимірювання та повного руйнування. Час вимірювання до 5 с. Багаторазові термопари закріплюються на дні графітового наконечника, закріпленого безпосередньо на арматурі, який є закритий і фактично вимірюють температуру поверхні графіту. Але для того, щоб температура графіту зрівнялась з температурою металу, потрібно більше ніж 5 с. Тому зонд

знаходиться в металі час, необхідний для зрівняння температури графіту та металу. Хімічно агресивний нагрітий шлак може пошкодити сам зонд.

Необхідно зауважити, що під час електрошлакового переплавлення доводиться декілька десятків разів вимірювати температуру металу за кожен плавку. Вартість термоперетворювача становить приблизно 1÷2\$ та становить приблизно половину вартості гільзи. Навіть за відносно невисокої вартості одного термоперетворювача за наявності на підприємстві декількох печей, які працюють постійно, витрати на придбання термоперетворювачів з гільзами є значними.

Основними недоліками контактного вимірювання температури розплаву металу в процесі ЕШЛ можна вважати такі:

- висока інерційність вимірювання;
- значні матеріальні витрати на придбання та заміну перетворювачів;
- вплив потужного електромагнітного поля на роботу термоперетворювача;
- вплив високої температури шлаку, крізь який проходить контактний термоперетворювач, на результати вимірювання температури;
- вплив матеріалу захисного ковпачка на властивості розплавленого металу;
- пошкодження частини зонда під час тривалого занурення термоперетворювача в розплавлений метал.

Тому актуальною є задача розроблення безконтактного способу вимірювання температури розплаву металу в процесі електрошлакового переплавлення.

### Виклад основного матеріалу

Вищевказаних недоліків позбавлений безконтактний метод вимірювання температури за випроміненням, який має такі переваги: можливість дистанційного багатократного вимірювання температури розплаву металу під високим електричним потенціалом в агресивному середовищі з високою швидкістю. Автори запропонували два способи використання термометра випромінення. Перший спосіб полягає у вимірюванні температури поверхні графітового наконечника в замкненому просторі. Другий спосіб – вимірювання температури металу, що увійде до зонда після руйнування захисного ковпачка. Перевагою першого способу є те, що один і той самий зонд можна використовувати більше одного разу, фактично до повного його руйнування. Перевагою другого способу є забезпечення безпосереднього оптичного контакту між поверхнею металу і пірометром.

Запропоновано такі конструкції зонда з для безконтактного вимірювання температури розплаву металу в процесі ЕШН (рис. 3 та 4). Як пірометр для запропонованого способу вимірювання температури металу пропонується застосовувати волоконний оптичний пірометр із оптичною голівкою, встановленою безпосередньо в установчій арматурі. Оптична голівка без електронних елементів спроможна витримувати набагато вищі температури. Блок електроніки можна винести у відносно безпечну частину установчої арматури і встановити безпосередньо в тій частині, за яку триматиме оператор. Для апробації способу вимірювання температури за допомогою пірометра було обрано існуючу конструкцію установчої арматури, з відповідними доробками для можливості роботи як із закритим, так і з відкритим зондом. Це забезпечено набором змінних перехідних насадок, що встановлюються вже після оптичної голівки пірометра і дають змогу закріплювати на собі або відкритий, або закритий зонд.

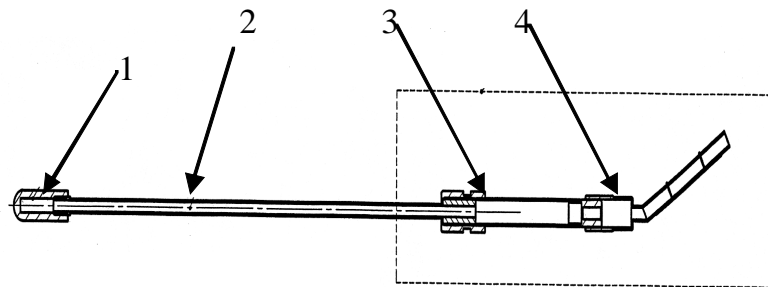


Рис. 3. Конструкція експериментальної установчої арматури:  
1 – закритий зонд; 2 – перехідна насадка; 3 – перехідник для встановлення насадок,  
4 – установка арматури з встановленим пірометром

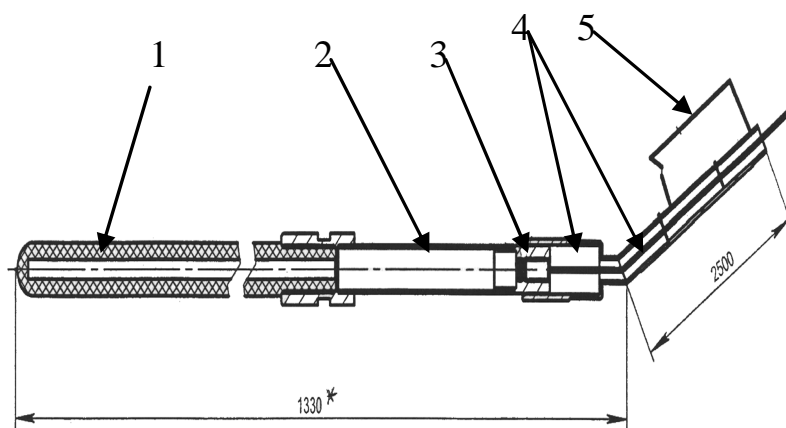


Рис. 4. Варіант конструкції експериментальної установчої арматури із закритим зондом:

- 1 – закритий зонд; 2 – перехідник для встановлення насадок;  
 3 – оптична головка волоконного пірометра; 4 – волоконний оптичний кабель;  
 5 – блок електроніки оптоволоконного пірометра

Як закритий зонд застосовують графітовий наконечник. Як відкритий зонд було вирішено застосувати існуючі пробовідбірники, дещо спрощені і перероблені для цілей експерименту. Фактично пробовідбірники є картонними одноразовими циліндричними пакетами із захисною кришкою на кінці. Закріплюються такі пробовідбірники на арматурі так само, як і завжди.

Розглянемо особливості процесу вимірювання температури розплавленого металу під час електрошлакового плавлення за допомогою термометра випромінювання. Температура об'єкта пов'язана з потоком випромінювання за законом Планка згідно з рівнянням 1 [4]:

$$L(\lambda, T) = \int_0^{\infty} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda, \quad (1)$$

де  $C_1=3,7417749 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2=0,01438769$  м·К, [5];  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання,  $\varepsilon(\lambda, T)$  – коефіцієнт випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта;  $T$  – температура об'єкта.

На потік випромінювання, що сприймається приймачем в певному спектральному діапазоні, можуть впливати такі чинники: значення коефіцієнта випромінювання металу, фонове випромінювання та пропускання проміжного середовища.

$$L(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) L_0(\lambda, T) \tau(\lambda, T) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_B(\lambda, T) \tau(\lambda, T) d\lambda, \quad (2)$$

де  $\varepsilon(\lambda, T)$  – коефіцієнт випромінювання поверхні металу;  $\tau(\lambda, T)$  – коефіцієнт пропускання проміжного середовища;  $L_0(\lambda, T)$  – густина потоку випромінювання АЧТ;  $L_B(\lambda, T)$  – густина потоку фонового випромінювання.

Розглянемо докладніше характер впливу цих чинників при вимірюванні температури за випромінюванням розплаву металу в ЕШП. Метали зазвичай мають невисоке значення коефіцієнта випромінювання в інфрачервоній області, яке зменшується зі збільшенням довжини хвилі. Але з ростом температури зменшується електрична провідність металу внаслідок теплового збудження молекулярної решітки, що викликає зростання значення його коефіцієнта випромінювання [7]. Температура розплавленого металу може сягати від 1500 до 2500°C, при цьому температура шлаку може бути вища на 200 °С. Для процесу ЕШП недоцільно використовувати пірометри, що працюють у діапазоні видимих довжин хвиль, оскільки необхідно автоматизувати процес вимірювання. Тому ці високотемпературні вимірювання доцільно проводити в високотемпературній близькій інфрачервоній області від 1 до 2 мкм, тобто робочий спектральний діапазон засобу вимірювання  $\lambda_1 \div \lambda_2$  має лежати в цій спектральній області.

До того ж необхідно зазначити, що оскільки приймач випромінення конструктивно вбудований в один кінець графітової трубки, другий кінець якої занурюється в розплавлений метал, то це створює ефект АЧТ, що підвищує значення коефіцієнта випромінення розплавленого металу, значення якого прямуватиме до одиниці –  $\varepsilon(\lambda, T) \rightarrow 1$ .

Джерелом фонового випромінення можуть бути стінки графітової трубки які нагріваються шлаком до температури, вищої за температуру розплавленого металу. Графіт є найтугоплавкішим матеріалом з температурою та тиском в потрібній точці графіту (графіт–рідкий вуглець–пара) із значеннями приблизно 5000 К та 100 бар [6]. Згідно з даними [7], для діапазону температур від 1000 до 3000 К для різних видів штучного графіту при довжині хвилі 0,65 коефіцієнт випромінення знаходиться в межах 0,80–0,95. У спектральному діапазоні від 1 до 10 мкм значення коефіцієнта випромінення різних видів штучного графіту знаходиться в інтервалі від 0,75 до 1,00. На основі залежностей, наведених у [7], можна сказати, що коефіцієнт випромінення графіту для цих температурного та спектрального діапазонів є практично сталим, а отже, має наближено селективний характер.

Тобто, при багатократному відбиванні випромінення від стінок графітової трубки ефективна густина потоку випромінення визначається за формулою:

$$\begin{aligned}
 L_{ef}(\lambda, T) &= \\
 &= \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_0(\lambda, T) + \varepsilon_{B1}(\lambda, T) L_B(\lambda, T) (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \varepsilon_{B1}(\lambda, T))^n (1 - \varepsilon(\lambda, T))^n \right) = \\
 &= \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_0(\lambda, T) + (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot L_B(\lambda, T) \cdot \varepsilon_{B1}(\lambda, T) \cdot \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_{B1}(\lambda, T)) \cdot (1 - \varepsilon(\lambda, T))}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Умова – нехтування впливом багатократних відбивань фонового випромінення. На основі залежності (4) загальною умовою нехтування багатократними відбиваннями для системи об'єкт-фон є виконання наступного співвідношення, [8]:

$$\lim \frac{1}{1 - (1 - \varepsilon_B(\lambda, T)) (1 - \varepsilon(\lambda, T))} \rightarrow 1. \tag{4}$$

З цієї формули можна зробити висновок, що неврахування вже другого відбивання можливо за умови, якщо виконується співвідношення :

$$(1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot (1 - \varepsilon_B(\lambda, T)) \ll 1. \tag{5}$$

Ефективний коефіцієнт фонового випромінення за багатократного відбивання випромінення [9] прямуватиме до 0 у випадку наближено рівного або меншого значення температури стінок та температури металу, що робить мінімальним вплив багатократних відбивань випромінення на сигнал пірометра. Для цього доцільно застосовувати захисну арматуру для графітової трубки. До того ж графітова трубка є закритим об'ємом, який наближено можна вважати абсолютно чорним тілом, що робить мінімальним вплив зовнішнього фонового випромінення від сторонніх об'єктів на результат вимірювання температури. Ці умови визначають, що вплив фонового випромінення на результати вимірювання буде незначним, що дає нам змогу знехтувати його впливом.

На проходження випромінення від поверхні металу крізь оглядове вікно до приймача випромінення можуть впливати такі фактори згідно з виразом 6:

- випромінення поглинається газами та матеріалом світловода, що утворюють проміжне середовище, яке характеризується коефіцієнтом поглинання  $\tau_{noz}(\lambda, T)$ ;
- проміжне середовище додає власне випромінення, що характеризується коефіцієнтом випромінення  $\tau_{вип}(\lambda, T)$ ;
- випромінення послаблюється внаслідок розсіювання на частинках, молекулах та аерозолях, присутніх у проміжному середовищі, що характеризується коефіцієнтом розсіювання  $\tau_{роз}(\lambda, T)$ .

$$\tau(\lambda, T) = f(\tau_{noz}(\lambda, T), \tau_{вип}(\lambda, T), \tau_{роз}(\lambda, T)). \tag{6}$$

Оскільки це є основний чинник, який впливатиме на потік випромінення від розплавленого металу до приймача випромінення, то доцільно для вимірювання температури використовувати метод спектрального відношення сигналів у двох близьких за спектром спектральних каналах. З врахуванням відмінностей між пропусканням проміжного середовища в двох спектральних каналах термодинамічну температуру визначатимуть за формулою:

$$T^{-1} = T_{\kappa}^{-1} - \frac{1}{C_2} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \ln \frac{\tau(\lambda_2, T)}{\tau(\lambda_1, T)}, \quad (7)$$

Умовна температура методу спектрального відношення (кольорова температура)  $T_{\kappa}$  визначається на основі відношення між сигналами  $S_i(\lambda, T)$  у двох спектральних каналах термометра випромінення:

$$T_{\kappa}^{-1} = -\frac{A}{C_2} \cdot \ln \frac{S_2(\lambda, T)}{S_1(\lambda, T)}. \quad (8)$$

Незалежно від практичної реалізації двоканального термометра випромінення сигнал  $i$ -го каналу пірометра можна описати формулою

$$S_i(\lambda_i, T) = q_i \cdot \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \frac{\varepsilon(\lambda_i, T) \cdot \tau(\lambda_i, T) \cdot \tau_{Fi}(\lambda_i) \cdot R_i(\lambda_i, T) \cdot C_1}{\lambda_i^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_i \cdot T}\right) - 1 \right]} d\lambda + S_{Di}(T_p) + S_{Ni}, \quad (9)$$

де  $q_i$  – стала, що залежить від конструкції пірометра;  $\tau(\lambda, T)$  – коефіцієнт пропускання проміжного середовища;  $\tau_{Fi}(\lambda)$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи;  $R_i(\lambda)$  – спектральна чутливість приймача випромінення та оптичної системи;  $S_{Di}(T_p)$  – сигнал, пропорційний власному випроміненню приймача випромінення;  $S_N$  – сигнал, пропорційний значенню шумів приймача випромінення та електронного тракту.

### Висновки

Отже, як видно з проведеного дослідження особливостей вимірювання температури за випроміненням в процесі ЕШП, переважно на результат вимірювання впливатиме пропускання випромінення проміжним середовищем між поверхнею розплаву металу та приймачем випромінення. Тому для безконтактного вимірювання температури доцільно використовувати метод спектрального відношення та термометра випромінення з двома спектральними каналами. Доцільно також додатково дослідити поглинальні властивості газів, що можуть утворюватися в графітовому наконечнику в процесі ЕШП, у близькій інфрачервоній області. Вплив інших факторів, таких як коефіцієнт випромінення поверхні та фонове випромінення, може бути нехтівно малим. Це забезпечує можливість високоточного вимірювання температури розплаву металу в процесі ЕШП з використанням термометра випромінення, що покращить якість виробів з металу з заданим поєднанням їх службових властивостей.

1. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. *Электрошлаковый переплав*. – М.: *Металлургия*, 1970. – 239 с.
2. <http://www.omskzkz.ru/process/index.php>.
3. <http://priborist.com>
4. Госсорг Ж. *Инфракрасная термография. Основы, техника, применение*. – М. Мир, 1988. – 399 с.
5. Брянский Л.Н., Дойников А.С. *Краткий справочник метролога*. – М.: *Изд-во стандартов*, 1991. – С. 79.
6. Bundy F.P., Bassett W.A., Weathers M.S. et al. *The Pressure-Temperature Phase and Transformation Diagram for carbon; Update Through, 1994* // *Carbon*. 1996. vol 34, № 2. p.141–153.
7. *Излучательные свойства твердых материалов* / Под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: *Энергия*, 1974. – 470 с.
8. Гоц Н.Є., Гриневиц Б.Ю., Засименко В.М. *Умова нехтування впливом багатократних відбивань за наявності фонового випромінювання* // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – Львів: *Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2002. – № 60. – С. 131–132.
9. Гоц Н.Є. *Підвищення точності вимірювання температури за випроміненням поверхні обертових об’єктів: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.11.04 / Національний університет “Львівська політехніка”*. – Львів, 2003. – 20 с.