

УДК 621.745.5.06./07:536.5

Леонід Жуков¹, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0001-9067-8613>

Дмитро Петренко^{2*}, <https://orcid.org/0000-0002-7546-9503>

¹Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, бульв. Вернадського, 34/1, м. Київ, 03142, Україна

*Автор-кореспондент: dima-petrenko@meta.ua

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИЙ БЕЗПЕРЕРВНИЙ ОПТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ РІДКОГО МЕТАЛУ В МЕТАЛУРГІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

Анотація. У статті розглядається питання найбільш ефективного й безальтернативного безперервного оптичного термоконтролю металургійних агрегатів, які застосовуються в металургії енергетичного машинобудування. Мета роботи полягає в розробці та дослідженні технологій безперервного термоконтролю на основі класичної та спектральної (багатокольорової) пірометрії випромінювання. Для досягнення мети використано методи: аналізу лінійних джерел; експериментальних досліджень закономірностей впливу зон візування, часу зливання, інтенсивності перемішування й температури рідкого металу на однокольорову температуру його випромінювання у видимій та інфрачервоній ділянках спектра в виробничих умовах; статистичної обробки результатів прямих й опосередкованих вимірювань з оцінкою їх похибок. Встановлено домінуючу роль термометрії в структурі метрологічного забезпечення металургійних підприємств. Виконано аналіз обсягів виробництва світової металургійної машинобудування. Класифіковано з термометричних позицій металургійне обладнання, що використовується в металургії енергетичного машинобудування для отримання й обробки рідкого металу. Досліджено стабільність випромінювальних характеристик рідкого металу в вагранках, електродугових та індукційних печах за різних впливаючих факторів. Оцінено методичні похибки оптичних вимірювань температури рідкого металу при випусканні / зливанні з вагранок та електродугових печей на базі класичної однокольорової пірометрії випромінювання. В деяких визначених умовах вони не перевищують 1,0–1,5% з довірчою ймовірністю 0,997. В інших умовах ці похибки досягають 8%, через що необхідно переходити до спектральної термометрії. На сучасній елементній базі розроблено технології спектральних вимірювань випромінювальної здатності та температури, в тому числі симетрично-хвильові, двокольорові компенсаційні, а також засновані на рівнянні нелінійності спектрального розподілу випромінювальної здатності. Похибки вимірювань температури для нових технологій менше похибок відомої спектральної, а також класичної енергетичної та спектрального відношення термометрії відповідно у 2,3; 11,7–20,0 й 6,1–7,6 рази.

Ключові слова: металургія енергетичного машинобудування, безперервний оптичний термоконтроль, вагранка, електродугова піч, класична та спектральна пірометрія випромінювання.

1. Вступ

Переважаюча більшість виробничих процесів в металургії включає технологічні процеси та операції температурного впливу на основні та допоміжні матеріали. Тому температура тут є головним технологічним параметром, який визначає якість готової продукції й витрати, в тому числі енергетичні, на її отримання [1]–[2]. Провідні західні компанії пов'язують підвищення ефективності роботи своїх виробництв виключно з підвищенням метрологічної, в тому числі термометричної,

культури та з відповідним покращенням технологічної дисципліни. Технології безперервного термоконтролю та, насамперед, високотемпературного, відзначаються високою вартістю на світовому ринку. Ця вартість визначається високою наукоємністю й монополією промислово розвинених країн, у тому числі США, Німеччини, Великобританії, Японії та інших. Однак сучасні виробники цілком свідомо йдуть на такі витрати, розуміючи, що вони є найбільш швидкоокупними. Зазвичай строк окупності сучасних технологій безперервного вимірювання температури в металургії не перевищує 6–12 міс. [2].

Отримання, обробка й розливання рідкого металу – найбільш ресурсоємні та, насамперед, енергоємні технологічні процеси виробництва виливків. При виробництві виливків з сірого чавуну на цих етапах витрачається близько 55% загальних ресурсів, а у випадку ковкого й високоміцного чавуну з кулястим графітом витрати зростають до 70% [2]–[5]. Висока ресурсоємність отримання й розливання рідкого металу визначається як природою цих процесів, так і технічно невиправданими витратами внаслідок відхилень за основним технологічним параметром – температурою. Відсутність чи недосконалість температурного контролю й управління технологічними процесами неприпустимі для сучасного виробництва, тому що внаслідок цього знижується якість металопродукції, енергозатрати в 1,5–2,0 та більше разів перевищують розрахункові, можливі аварійні ситуації, знижується ресурс футерівки металургійних агрегатів. Проблема температурного контролю, особливо безперервного, є загальною для металургії машинобудування.

На рис. 1 наведено структуру метрологічного забезпечення найбільш показових сталеливарних підприємств японського концерну JFE Holdings Inc. (раніше Kawasaki Seitetsu) [6].

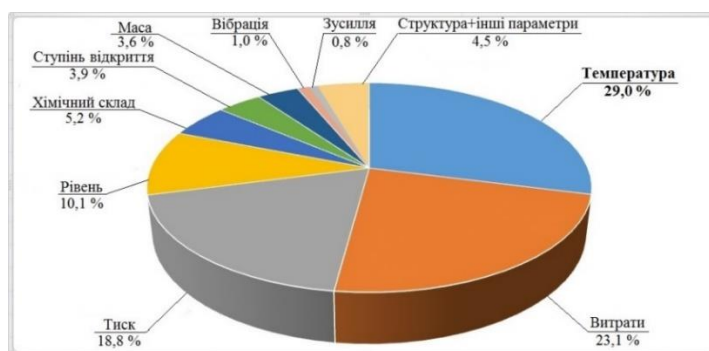


Рис. 1. Діаграма метрологічного забезпечення сталеливарних підприємств концерну JFE Holdings Inc.

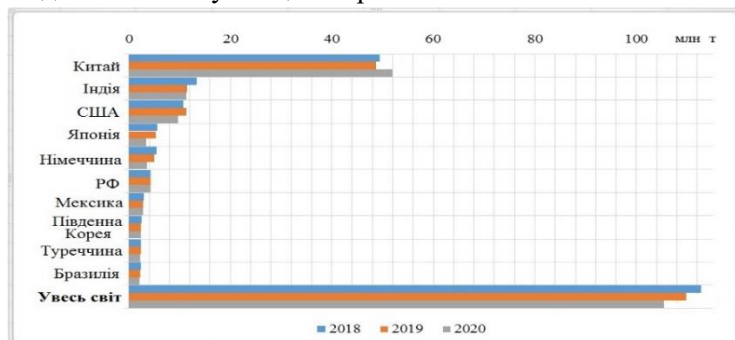
Рис.1 відображає дольовий розподіл кількості засобів вимірювальної техніки для різних технологічних параметрів, який безпосередньо корелює з витратами на метрологічне забезпечення. Близько третини (29%) засобів складають термометричні. За ними з перепадом більш ніж у 6% йдуть витратоміри для рідких та газоподібних середовищ. На вимірювання тиску та рівня припадає близько 19% й 10% засобів вимірювальної техніки відповідно. Ті 19%, що залишились, стосуються вимірювань хімічного складу, ступеня відкриття, маси, вібрації, зусиль, структури та інших технологічних параметрів. Як показує рис. 1, термометрія домінує за витратами на метрологічне забезпечення металургійних підприємств, що підтверджує актуальність досліджень та розробок в цьому напрямі.

На рис. 2 представлено обсяги виробництва світової металургії машинобудування, в тому числі виробництва чавунних виливків по галузях машинобудування [7]–[11].

Обсяг виробництва світової металургії машинобудування у 2018 р. перевищував 112 млн т (рис. 2, а). При цьому світовим лідером є Китай, в якому вироблено майже половину виливків. У 2019 р. бачимо спад світового виробництва виливків на 2,6%. При цьому спад виробництва торкнувся 18 країн світу, в тому числі й Китаю [8], [11]. У 2020 р., внаслідок пандемії COVID-19, обсяг світового виробництва виливків знизився ще на 3,9%. В цей рік єдиною країною з позитивною динамікою обсягу виробництва став Китай.

Доля виливків з сірого, високоміцного й ковкого чавуну у світовій металургії машинобудування перевищує 70% (рис. 2, б) [9]. Це підкреслює важливість чавуну як основного конструкційного сплаву для деталей машин та механізмів. На 2-му та 3-му місцях знаходяться алюмінієві сплави й сталь відповідно.

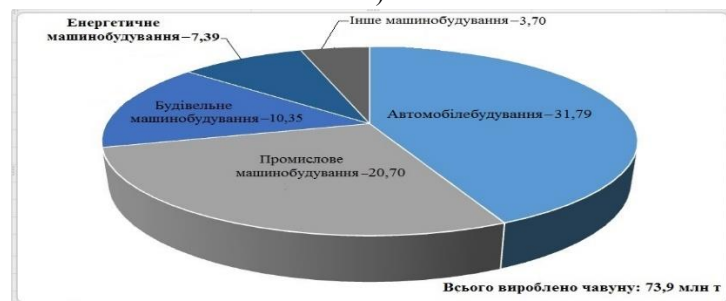
З аналізу розподілу виробництва чавунного литва (рис. 2, в) видно, що металургія автомобілебудування зберігає лідерство за обсягом виробництва [10]. Металургія енергетичного машинобудування знаходиться на 4-му місці й виробляє 10% литва.



а)



б)



в)

Рис. 2. Структура світової металургії машинобудування:

- а) обсяги виробництва виливків у різних країнах, млн т;
- б) розподіл обсягів виробництва металургії машинобудування за сплавами (2020 р.), млн т;
- в) розподіл обсягів виробництва чавуну за галузями металургії машинобудування (2020 р.), млн т

В табл. 1 наведено дольові обсяги виробництва металургії енергетичного машинобудування серед металургії машинобудування в деяких країнах.

Табл. 1. Частка виробництва металургії енергетичного машинобудування серед металургії машинобудування для деяких країн (2019 р.) [12]

Країна	Частка виробництва:	
	%	млн т
1. Китай	4,3	2,10
2. Індія	8	0,92
3. РФ	5	0,57
4. Німеччина	4	0,17
5. Мексика	8	0,40
6. Франція	4	0,21

В деяких країнах доля металургії енергетичного машинобудування значна й практично досягає 8%.

Мета роботи полягає в розробці та дослідженні термометричних технологій безперервного термоконтролю технологічних процесів отримання й розливання рідкого металу в металургії енергетичного машинобудування на основі методів класичної та спектральної пірометрії випромінення. Під технологією тут слід розуміти сукупність методів, засобів оптичних вимірювань температури, а також апріорної інформації про об'єкт вимірювань, яка необхідна для технічної реалізації безперервного контролю температури розплаву в металургійному агрегаті.

2. Методи та матеріали

Для отримання, обробки й розливання рідкого металу в металургії енергетичного машинобудування використовують різне металургійне обладнання, в тому числі [2], [5]:

- вагранки різних типів та конструкцій, зокрема вагранки зі стаціонарними й поворотними накопичувачами, сифонами для розділення металу й шлаку, відкритими й закритими зливними жолобами;

- електродугові печі;

- індукційні тигельні та канальні, плавильні, міксерні й розливні печі.

В принципі, продуктивність та ємність вказаних металургійних печей змінюється в межах 1–100 т/год й 1–200 т відповідно. Враховуючи технічні й технологічні характеристики металургійного обладнання, в металургії енергетичного машинобудування використовують моно-, дуплекс- і триплекс-процеси з наступними відповідними маршрутами руху металу в ливарних цехах:

- плавильна піч – ківш – форма;

- плавильна піч – міксер – ківш – форма;

- плавильна піч – міксер – розливний агрегат – форма.

З термометричних позицій серед вказаного металургійного обладнання слід виділити групу металургійних агрегатів прохідного типу. Типовим їх представником є вагранка. Теплотехнічними засобами агрегатів прохідного типу виключається нагрівання контрольованого на виході об'єму металу.

Конструкція й режими експлуатації електродугових печей добре узгоджені з використанням основної футерівки. При цьому електрична дуга забезпечує пряме нагрівання шлаку й різні види шлакової обробки рідкого металу в печі. Тому ці печі часто працюють в міксерному режимі навіть при значному споживанні електроенергії (ККД $\leq 25\%$). Наприклад, вони широко застосовуються в металургії енергетичного машинобудування при виробництві шапок з ковкого чавуну для електроізоляційних гірлянд на високовольтних підстанціях та лініях електропередачі. Зазвичай в міксерному (квазіпрохідному) режимі метал зливається в ківш з часовим інтервалом в кілька хвилин. В цьому випадку змонтована на зливному жолобі печі безконтактна термометрична система забезпечує квазібезперервне вимірювання температури рідкого металу.

Для оптимального управління ваграночним й електродуговим процесом цілком достатньо здійснювати безперервне вимірювання температури рідкого металу в струмені чи потоці при випусканні чи зливанні. Оптична термометрія тут не має альтернативи. В принципі, на сьогодні за інструментальними метрологічними характеристиками оптична термометрія не поступається термоелектричній. Тому вона використовується для побудови температурних шкал й еталонів, вимірювань підвищеної точності, а також для безперервних вимірювань середніх та високих температур і температур малогабаритних й рухомих об'єктів.

В оптичній термометрії слід розглядати 2 матеріальні субстанції – речовину, в нашому випадку метал, та поле, в нашому випадку – електромагнітне теплове випромінення металу. Випромінення переносить тепло, через що цілком природньо має енергію, ентропію та температуру. Будь-які оптичні термометри градууються за температурою термодинамічно рівноважного випромінення абсолютно чорного тіла. Тому вони вимірюють температуру випромінення. Завдяки високій ефективності, оптична термометрія у своєму розвитку випереджала становлення теорії теплового

випромінення. Перші оптичні термометри були розроблені у Франції та Росії у 80–90-х роках 19 століття (пірометри ле Шательє та Д.К. Поленова) [13]–[14]. На той час в оптичній термометрії ще не знали термодинамічних законів теплового випромінення й тому користувались поняттями «псевдотемператур», вимірюваних оптичними термометрами. Це невдале поняття не відповідає визначенню температури в термодинаміці, молекулярно-кінетичній теорії та статистичній фізиці. Наприклад, змінюючи випромінювальну здатність об'єктів, які термометруються, можливо створити такі умови, за яких об'єкт з нижчою «псевдотемпературою» буде передавати тепло та нагрівати об'єкт з вищою «псевдотемпературою». Це суперечить визначенню температури в термодинаміці як такому, що задає напрям передачі тепла. Тому д-р техн наук Л.Ф. Жуков запропонував використовувати більш обґрунтоване фізичне поняття «температура випромінення», одно-, дво- та багатокольорова, замість «псевдотемпература».

Виходячи із закону Віна, маємо наступне пірометричне рівняння для класичної енергетичної однокольорової термометрії:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_1} = \frac{\lambda_1}{C_2} \ln(\varepsilon_1), \quad (1)$$

де $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ [К·м] – друга радіаційна стала.

Це рівняння пов'язує температуру об'єкта (металу) T з однокольоровою температурою його випромінення S_1 через значення випромінювальної здатності ε_1 на робочій хвилі λ_1 . Рівняння (1) визначає можливість класичної енергетичної однокольорової пірометрії випромінення. Вона може використовуватися в умовах термодинамічно рівноважного випромінення без температурної поправки, а також забарвленого чи «сірого» випромінення з використанням температурної поправки (задання значення ε_1).

Для класичної двокольорової (спектрального відношення) пірометрії випромінення рівняння (1) набуває наступного вигляду:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_{2\kappa}} = \frac{\lambda_{екв}}{C_2} \ln(\varepsilon_{екв}), \quad (2)$$

де $\lambda_{екв} = \lambda_2 \cdot \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ [м] – еквівалентна довжина хвилі двокольорової пірометрії випромінення;

$\varepsilon_{екв} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$ – еквівалентна випромінювальна здатність двокольорової пірометрії випромінення.

Рівняння (2) пов'язує температуру об'єкта T з двокольоровою температурою його випромінення $S_{2\kappa}$ через $\varepsilon_{екв}$ на $\lambda_{екв}$ і розкриває можливість пірометрії спектрального відношення. Вона може застосовуватися у випадках термодинамічно рівноважного та «сірого» випромінення без температурної поправки, а також забарвленого випромінення з використанням температурної поправки (задання значення $\varepsilon_{екв}$). Порівнюючи рівняння (1) та (2) видно, що збільшення кількості робочих довжин хвиль розширює можливість оптичної термометрії (збільшується кількість випадків, за яких виключається методична похибка) та підтверджує актуальність переходу до спектральної (багатокольорової) пірометрії випромінення, в якій на сьогодні зазвичай використовують від 3 до 500 довжин хвиль [15]–[19]. Система пірометричних рівнянь для 3-х робочих довжин хвиль матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} - \frac{1}{S_1} &= \frac{\lambda_1}{C_2} \ln(\varepsilon_1), \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_2} &= \frac{\lambda_2}{C_2} \ln(\varepsilon_2), \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_3} &= \frac{\lambda_3}{C_2} \ln(\varepsilon_3). \end{aligned} \quad (3)$$

В ній 4 невідомі ($T, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) та 3 прямо вимірювані однокольорові температури випромінювання S_1 - S_3 . Оскільки кількість невідомих перевищує кількість рівнянь, система (3) має нескінченну множину розв'язків. Подальше збільшення кількості робочих хвиль та рівнянь в системі також виключає знаходження єдиного розв'язку системи. Найбільш реальним шляхом вирішення цієї задачі є вираження значення випромінювальної здатності на деякій довжині хвилі через її значення на сусідніх довжинах хвиль – по суті перехід до апроксимації спектрального розподілу випромінювальної здатності певною функцією. Виконані авторами комплексні дослідження показують, що для цього необхідно використовувати не менше 3-х робочих хвиль [20]. При цьому для ідентифікації правильного розв'язку, а також при суттєво нелінійних й інверсійних (з інверсією знаку коефіцієнта нелінійності по спектральним діапазнам) спектральних розподілів випромінювальної здатності необхідно використовувати додаткові хвилі порівняння λ_c та інверсії λ_i .

Стрімкий розвиток та мініатюризація оптоелектроніки, мікропроцесорних та комп'ютерних технологій, оптоволоконної техніки забезпечує елементну базу для реалізації спектральних методів оптичної термометрії. Авторами розроблено наступні спектральні методи вимірювань температури та випромінювальної здатності:

- симетрично-хвильової пірометрії випромінювання [21]. Принцип вимірювання ґрунтується на залежності значень випромінювальної здатності на середній довжині хвилі робочого спектрального діапазону від її значень на симетрично розміщених граничних хвилях;
- двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання [22]. Принцип вимірювання ґрунтується на залежності температури об'єкта від двокольорових температур його випромінювання для реального та дзеркального розподілів випромінювальної здатності;
- вимірювання випромінювальної здатності, засновані на отриманому рівнянні нелінійності спектрального розподілу випромінювальної здатності [20]. В основу принципу вимірювання покладено взаємозв'язок коефіцієнта нелінійності спектрального розподілу випромінювальної здатності для середньої хвилі зі значеннями випромінювальної здатності на граничних хвилях через прямо виміряні однокольорові температури випромінювання на робочих хвилях (лінійний, дводіапазонний, параболічний методи).

На рис. 3 наведено функціональну схему установки, розробленої для експериментальних спектральних досліджень та якісної оцінки впливу стабільності випромінювальної здатності рідкого металу та пропускання відповідного проміжного середовища на температури випромінювання металу в виробничих умовах.

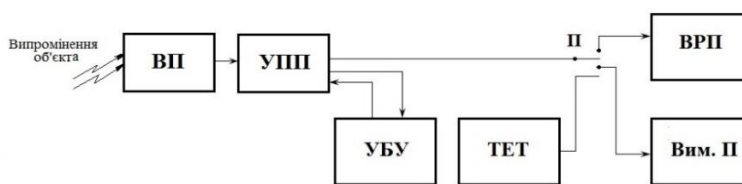


Рис. 3. Функціональна схема експериментальної установки

Установка включає універсальний пірометричний перетворювач (УПП) з візирним пристроєм (ВП) та універсальним блоком управління (УБУ), вимірювальний реєструючий прилад (ВРП), вимірювальний прилад (Вим. П) та термоелектричний термометр (ТЕТ). Перемикач (П) забезпечує почергове під'єднання УПП та ТЕТ до ВРП та Вим. П. Установка укомплектована УПП двох типів. Тепловий приймач випромінювання (термобатарей), флюоритова оптика та змінні смугові інтерференційні світлофільтри УПП першого типу забезпечують дослідження в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях спектра (0,12–8,00 мкм). УПП другого типу має фотонний германієвий приймач випромінювання (фотодіод), оптику зі скла К8, касети зі змінними смуговими світлофільтрами та забезпечує дослідження в діапазоні від 0,28 мкм до 2,00 мкм. Оскільки установка призначена для якісних досліджень (визначення найбільш стабільних умов по випромінювальній здатності та пропусканню проміжного середовища), важливою є саме часова й температурна стабільність її метрологічних характеристик, а не їх абсолютні значення.

3. Результати та обговорення

З використанням описаної вище експериментальної установки отримано діаграмні записи однокольорової температури випромінювання рідкого чавуну для вагранки, електродугової та індукційної печей в різних умовах (рис. 4).

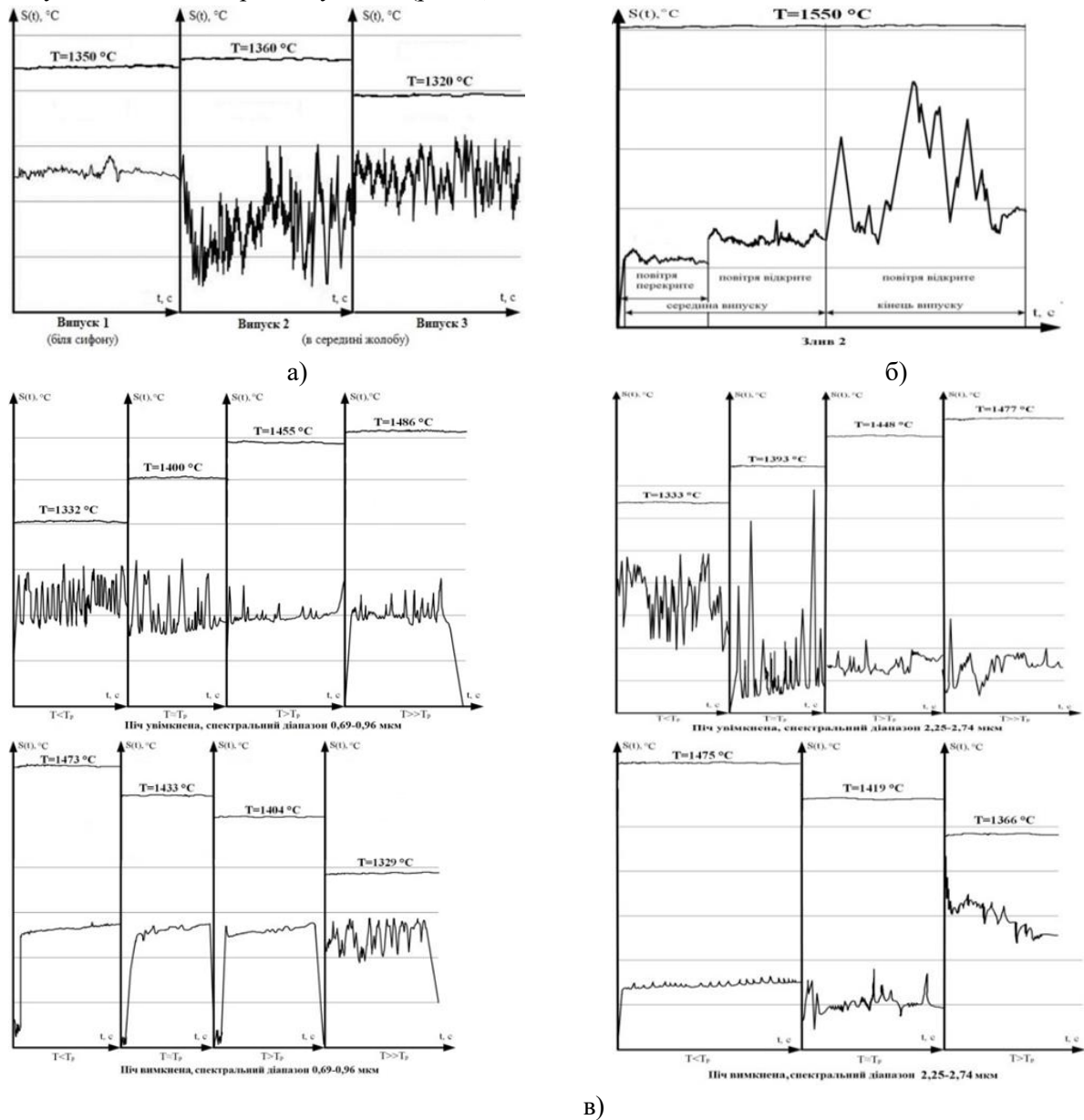


Рис. 4. Діаграмні записи (залежності від часу) однокольорової температури випромінювання рідкого чавуну при: а) випусканні з вагранки; б) на жолобі при зливанні з електродугової печі в умовах періодичного видалення домішок з проміжного середовища стисненим повітрям; в) плавці в індукційній печі

Температура рідкого металу перевищує однокольорову температуру його випромінювання, яка під впливом випадково змінних випромінювальної здатності та пропускання супутнього проміжного середовища (відповідно до формули (1)) змінюється в широких межах. Ця різниця (тобто методична похибка), при характерних для залізовуглецевих розплавів спектральних розподілах випромінювальної здатності, у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру сягає більше 8% [20]. Діапазон змін однокольорової температури випромінювання залежить від зони та часового інтервалу візування, робочого спектрального діапазону, інтенсивності перемішування й температури металу (рис. 4). Крім того, значно впливає на S_1 співвідношення температур металу (T) й термодинамічної рівноваги (T_p) основної металургійної реакції окиснення вуглецю й відновлення кремнезему ($T < T_p$, $T \approx T_p$, $T > T_p$, $T \gg T_p$) (рис. 4, в).

Аналогічний вплив на двокольорову температуру випромінення $S_{2\lambda}$ мають випадково змінні випромінювальна здатність та пропускання супутнього проміжного середовища. При цьому $S_{2\lambda}$ може бути як вище, так і нижче температури металу (див. формулу (2) при $\varepsilon_{екв.} > 1$ та $\varepsilon_{екв.} < 1$). Як впливає з рис. 4, обираючи оптимальні умови для вимірювання одно- та двокольорових температур випромінення, можна суттєво знизити дестабілізуючий вплив на них вищенаведених факторів. Для цього використовують просторову та часову селекцію, а також оптимальний робочий спектральний діапазон, температурні поправки відповідно до формул (1) та (2), а також спеціальні алгоритми обробки первинної пірометричної інформації (в тому числі інтегрування, запам'ятовування максимальних чи мінімальних повторюваних значень). Іноді, в реальних умовах, це суттєво знижує методичну похибку класичної пірометрії випромінення.

Методами статистичної обробки результатів прямих вимірювань та оцінювання їх випадкових похибок підтверджено високу метрологічну ефективність застосування розроблених рішень на базі класичної однокольорової пірометрії випромінення для вимірювання температури розплавів у вагранках та електродугових печах (табл. 2).

Табл. 2. Похибки вимірювань температури за допомогою класичної однокольорової пірометрії випромінення [2]

Тип агрегата	Діапазон вимірюваних температур $T_{min}-T_{max}$, °C	Число вимірювань N	$\sigma(\Delta T_{1\lambda})$, °C	$\sigma(\delta T_{1\lambda}) = \frac{\sigma(\Delta T_{1\lambda})}{(T_{min} + T_{max})/2} \cdot 100\%$, %	$\Delta T_{дов.} = 3 \cdot \sigma(\Delta T_{1\lambda})$ при $P_{дов.} = 0,997$, °C	$\delta T_{дов.} = \frac{\sigma(\delta T_{1\lambda})}{(T_{min} + T_{max})/2} \cdot 100\%$ при $P_{дов.} = 0,997$, %
Вагранка з безперервним випусканням чавуну через відкритий сифонний жолоб	1417–1440	20	2,2	0,15	6,6	0,45
Електродугова піч типу ДС-5МТ	1578–1615	10	3,1	0,19	9,3	0,57

Тут

$$\sigma(\Delta T_{1\lambda}) = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot (\sum_{i=1}^N \Delta T_{1\lambda,i}^2 - \sigma^2(\Delta T_{ТЕТ}))} = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot (\sum_{i=1}^N (T_{1\lambda,кор,i} - T_{ТЕТ,i})^2 - \sigma^2(\Delta T_{ТЕТ}))} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot (\sum_{i=1}^N (\frac{1}{\frac{1}{S_{1i}} + \frac{\lambda_1}{C_2} \ln(\varepsilon_1)} - T_{ТЕТ,i})^2 - \sigma^2(\Delta T_{ТЕТ}))}$$

– оцінка середнього квадратичного відхилення (СКВ) випадкової складової похибки вимірювань температури розплаву класичною однокольоровою пірометриєю випромінення; $T_{ТЕТ}$ – значення температури розплаву, отримане зразковим термоелектричним термометром, який складається з термоелектричного перетворювача ТПР-2075 й потенціометра постійного струму ПП-63; $\sigma(\Delta T_{ТЕТ}) = 2,5^\circ\text{C}$ – оцінка СКВ випадкової складової похибки вимірювань температури розплаву зразковим термоелектричним термометром [2];

$$\varepsilon_{1\lambda} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{1\lambda,i} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \{ \exp(\frac{C_2}{\lambda_1} (\frac{1}{T_{ТЕТ,i}} - \frac{1}{S_{1i}})) \} \quad - \quad \text{оцінка настроювального значення}$$

випромінювальної здатності на робочій хвилі λl для введення температурної поправки у формулу (1) класичної однокольорової пірометрії випромінення. Температурна поправка необхідна для

виключення систематичної складової похибки вимірювання температури, обумовленої відмінністю від одиниці випромінювальної здатності розплаву, який термометрується.

Дані, наведені в табл. 2, ілюструють дуже низькі похибки вимірювань температури класичною однокольоровою пірометрією випромінення. Треба підкреслити, що ці результати отримано на металургійному обладнанні при дотриманні ідеальних термометричних умов, зокрема при:

- оптимальних зонах, часових інтервалах й спектральних діапазонах візування;
- виконанні вимог з технічного обслуговування випускних льоток й зливних сифонів (максимально можливий діаметр, регулярна очистка від шлаку для отримання чистого струменя та ін.);
- певних марках залізовуглецевих сплавів (наприклад, сірий чавун).

В реальності на металургійних агрегатах такі стабільні умови трапляються надзвичайно рідко, тому зазвичай граничні похибки класичної пірометрії випромінення, обумовлені випадковими змінами випромінювальної здатності розплаву, сягають 1,0–1,5% (причому, це з введеною за термоелектричним термометром температурною поправкою для виключення систематичної складової похибки). Без температурних поправок – 8% і більше.

На рис. 5 представлено практичну реалізацію безперервного термоконтролю рідкого металу при випусканні чи зливанні з вагранок та електродугових печей на базі класичної пірометрії випромінення.

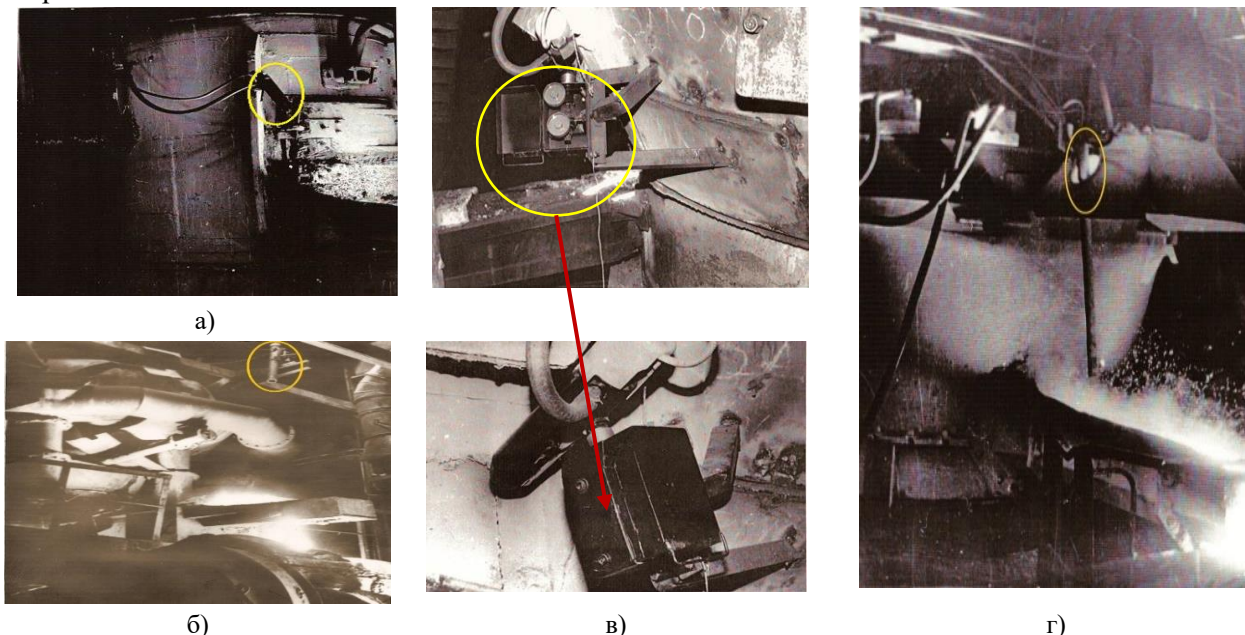


Рис. 5. Безперервний контроль температури рідкого металу при випусканні з вагранок зі стаціонарним (а) та поворотними (б, в) накопичувачами, із закритим (б) та відкритим (в) сифонним жолобами, а також зливанні з електродугової печі (г)

Наведені вище технології забезпечують автоматичне безперервне вимірювання, реєстрацію та регулювання температури рідкого металу з вищевказаними похибками, а також кількість його випусків та зливів. Дійсно, це можливо іноді, за умови високої кваліфікації персоналу, який виконує вимірювання й обслуговує агрегат. Однак в переважній більшості випадків методична похибка вимірювання температури залишається високою та не відповідає вимогам металургії. Підвищити точність термоконтролю в інших випадках можливо з використанням сучасних спектральних (багатокольорових) технологій оптичної термометрії.

На рис. 6 наведено функціональні схеми й елементи систем безперервного контролю температури розплавів при випусканні чи зливанні з вагранок та електродугових печей, в яких реалізовано методи класичної та спектральної пірометрії випромінення.

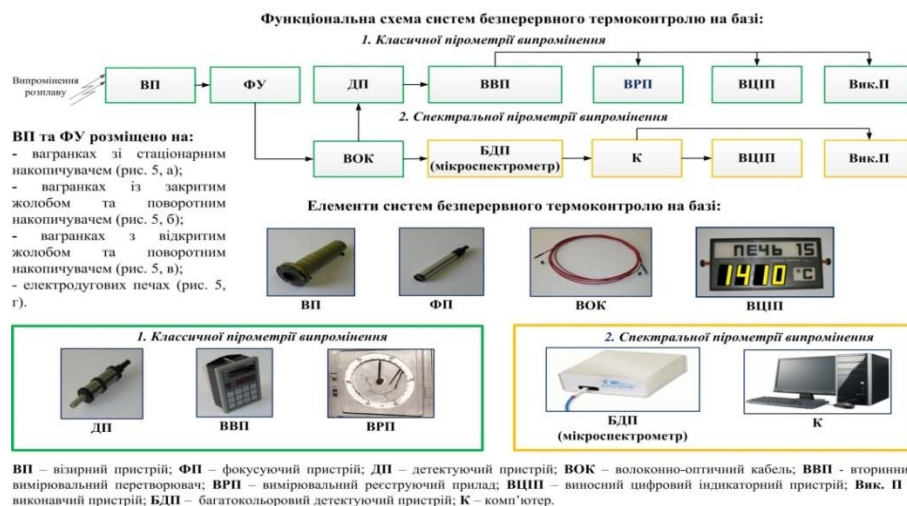


Рис. 6. Функціональні схеми й елементи систем безперервного оптичного контролю температури рідкого металу при випусканні / зливанні з вагранок / електродугових печей, в яких реалізовано методи класичної та спектральної пірометрії випромінювання

Первинні частини співпадають для обох термометричних систем і включають розміщені на металургійних агрегатах ВП, ФП й ВОК. Вторинна частина системи для класичної пірометрії випромінювання містить ДП, ВВП, ВРП та ВЦП, а у випадку спектральної пірометрії випромінювання – БДП, К та ВЦП. ФП фокусує та спрямовує до ВОК теплове випромінювання розплаву, який термометрується. ДП та БДП перетворюють теплове випромінювання металу на робочих хвилях у відповідні вимірювальні електричні сигнали й передають їх на ВВП чи К, які оброблюють ці сигнали відповідно до заданих алгоритмів методів пірометрії випромінювання. Інформація про отримані значення температури розплаву передається на ВЦП для дистанційної індикації, а також на Вик. П з метою видачі управляючих сигналів для утримання температури в металургійному агрегаті в заданих межах. ДП та БДП розроблені, відповідно, на базі фотонного сендвіч-детектора PIN-DSS (OSI-Optoelectronics, США) [23] та мікроспектрометра S2000 (Ocean Insight Inc., США) [24]. Сендвіч-детектор забезпечує роботу системи на 2-х довжинах хвиль у видимій та ближній інфрачервоній областях спектра для реалізації класичної енергетичної однокольорової та спектрального відношення пірометрії випромінювання. Мікроспектрометр має 2048 робочих хвиль в діапазоні 0,5–1,1 мкм та забезпечує роботу системи в спектральному режимі. ВРП та К слугують для обробки первинної пірометричної інформації відповідно до алгоритмів класичної та спектральної пірометрії випромінювання.

Методами математичного моделювання й обробки результатів опосередкованих вимірювань показано, що за умов випадково змінної випромінювальної здатності методичні похибки вимірювань температури на базі нових спектральних технологій менше похибок відомої спектральної, а також класичної енергетичної та спектрального відношення термометрії відповідно у 2,3; 11,7–20,0 та 6,1–7,6 рази [20]–[21].

В табл. 3 наведено техніко-економічні показники розроблених технологій безперервного термострою рідкого металу [2].

Індукційні тигельні плавильні печі не входять до виділеної з термометричних позицій групи металургійних агрегатів прохідного типу. Тому для повного використання їх технологічних можливостей необхідно безперервно вимірювати температуру металу безпосередньо в печі. Найбільш прийнятним варіантом розв'язання цієї важливої задачі є світловодні технології. Світловодний контроль не обмежує експлуатацію індукційних тигельних плавильних печей, в тому числі завантаження шихтових матеріалів, зливання та переливання металу, скачування шлаку, а також науглецювання, модифікування та легування металу. Такий термострою ефективніший, ніж безконтактний, також у випадках індукційних каналних, міксерних й розливних печей [2].

Нові технології безперервного термострою забезпечують значне підвищення якості металопродукції й зниження ресурсозатрат, в тому числі енергозатрат, на її отримання. Безперервний

контроль температури являє собою ідеальну базу для технічної реалізації автоматичного регулювання температури розплавів, інтегрованого до складу автоматизованої системи керування процесом одержання, обробки чи розливання рідкого металу. Це дозволяє підняти рівень виробництва на якісно новий рівень, автоматизувати найбільш складні в управлінні процеси, в яких доводиться мати справу з високотемпературними металевими розплавами.

Табл. 3. Техніко-економічні показники безперервного термоконтролю

Об'єкт	Найменування показника					
	Зниження браку «за температурою», %	Зниження угару шихти, %	Підвищення ресурсу футерівки, %	Підвищення температури металу на випуску, °С	Зниження витрат:	
					коксу, %	електроенергії, %
Вагранка	30–70	10–30	–	≈ 40	6–10	–
Електродугова піч	20–30	5	25–35	–	–	15–20

Пропоновані для металургії енергетичного машинобудування термометричні розробки опубліковані у вітчизняних та зарубіжних наукових журналах, а також захищені 23-ма патентами України.

Розробки пройшли широку апробацію в лабораторних та виробничих умовах на підприємствах металургії машинобудування, в тому числі енергетичного. Ці найбільш жорсткі для термометрії умови підтверджують реальність адаптації такого термоконтролю для котлоагрегатів ТЕС/ТЕЦ в галузі енергетики.

4. Висновки

Таким чином, в результаті аналізу встановлено, що термометрія складає близько третини від загальних затрат в структурі метрологічного забезпечення металургії енергетичного машинобудування. Обсяг виробництва металургії енергетичного машинобудування (за масою виготовленого чавуну) сягає 10% від загального обсягу виробництва металургії машинобудування. Сірий, високоміцний та ковкий чавун за обсягом виробництва разом складають 70%.

Показано, що отримання та розливання рідкого металу – найбільш ресурсоємні та, насамперед, енергоємні технологічні процеси виробництва виливків. При виробництві виливків з сірого чавуну на цих етапах витрачається близько 55% загальних ресурсів, а для ковкого й високоміцного чавуну затрати зростають до 70%. Для технічної реалізації цих процесів використовуються вагранки, електродугові й індукційні печі.

З термометричних позицій у вказаному металургійному обладнанні слід виділити групу металургійних агрегатів прохідного та квазіпрохідного типів, до яких належать вагранки та електродугові печі. Показано, що для них оптична термометрія не має альтернативи.

В результаті комплексних досліджень вагранок, електродугових та індукційних печей як об'єктів безперервного безконтактного термоконтролю встановлено, що найбільш ефективним для них є безперервний контроль температури рідкого металу в струмені чи потоці при випусканні; квазібезперервний контроль температури рідкого металу в потоці при зливанні; світловодний безперервний контроль температури рідкого металу безпосередньо в індукційних печах.

У випадку класичної однокольорової пірометрії випромінювання просторова та часова селекція, а також оптимальний робочий спектральний діапазон, температурні поправки й запропоновані алгоритми обробки первинної пірометричної інформації за певних умов знижують граничні методичні похибки вимірювань температури з 8% до 1,0–1,5%. Для задоволення потреб металургії в інших умовах розроблено технології спектральних (багатокольорових) вимірювань температури й випромінювальної здатності, в тому числі симетрично-хвильові, двокольорові компенсаційні, а також засновані на рівнянні нелінійності спектрального розподілу випромінювальної здатності. Похибки вимірювань температури для нових технологій менше похибок відомої спектральної, а також класичної енергетичної й спектрального відношення термометрії відповідно у 2,3; 11,7–20,0 та 6,1–7,6 рази.

Пропонований безперервний термоконтроль забезпечує значне зниження ресурсозатрат в металургії енергетичного машинобудування.

Посилання

1. Temperature measurement of liquid metal. Heraeus Electro Nite. URL: https://www.heraeus.com/media/media/hen/media_hen/products_hen/iron/temperature_measurement_in_liquid_metal.pdf (дата звернення: 17.04.2023).
2. Жуков Л.Ф. Исследование и разработка методов и средств температурного контроля и ресурсосберегающих технологических процессов получения жидкого чугуна в литейном производстве: дисс. д-ра техн. наук. Киев, 1992. 505 с.
3. Metal Casting Market: Global Industry Analysis and Forecast (2022–2029). *Maximize market research*. September 2022. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/metal-casting-market/1613/> (дата звернення: 05.02.2023).
4. Paudel S., Nagapurkar P., Smith J. Improving process sustainability and profitability for a large U.S. gray iron foundry. *14-th AICHE Annual Meeting*. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/267346357_392009_Improving_Process_Sustainability_and_Profitability_for_a_Large_US_Gray_Iron_Foundry (дата звернення: 17.04.2023).
5. Futas P., Pribulova A., Pokusova M. Possibilities Reducing of Energy Consumption by Cast Iron Production in Foundry. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 998. P. 36–41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.998.36>
6. Iwamura T. Survey on Sensing Technology in Steel Industry. *Journal of The Society of Instrument and Control Engineers*. 1990. Vol. 29. Iss. 6. P. 508–517. <https://doi.org/10.11499/sicej11962.29.508>
7. Census of World Casting Production. Total Casting Tons Hits 112 Million. *Modern Casting*. December 2019. P. 22–25.
8. Census of World Casting Production. Total Casting Tons Dip in 2019. *Modern Casting*. January 2021. P. 28–30.
9. Census of World Casting Production. Fewer Castings Made in 2020. *Modern Casting*. December 2021. P. 28–30.
10. Iron Castings Market by End-user, Product, and Geography – Forecast and Analysis 2023–2027. *Technavio*. November 2022. URL: <https://www.technavio.com/report/iron-castings-market-industry-analysis?&search=Iron%20Casting%20Market> (дата звернення: 05.02.2023).
11. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Світовий ринок металевих виливків 2018–2020: виробництво, країни, технології. *Процеси лиття*. 2021. № 1(143). С. 57–64.
12. WFO Global Foundry Report–2020. The World Foundry Organization. 2020. 180 p.
13. Крутиков В.Н., Фрунзе А.В. О прослеживаемости современных пирометров к первичному эталону единицы температуры и классификации методов пирометрии. *Измерительная техника*. 2012. № 2. С. 32–37.
14. Рибо Г. Оптическая пирометрия. Пер. с франц. М.–Л.: ГТТИ, 1934. 455 с.
15. Madura H., Kastek M., Piątkowski T. Automatic compensation of emissivity in three-wavelength pyrometers. *Infrared physics and technology*. 2007. Vol. 51. Iss. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.11.001>
16. Cezairliyan A., Foley G.M., Morse M.S., Miiller A.P. Six-wavelength millisecond-resolution pyrometer. *Temperature its Measurement and Control in Science and Industry*. Ed. by J. F. Schooley. Vol. 6. AIP, New York, 1993. P. 757–762.
17. Cassady L., Choueiri E. High accuracy multicolor pyrometry for high temperature surfaces. *28-th Int. Electric Propulsion Conf. (Toulouse)*. 2003. P. 17–21. URL: https://www.researchgate.net/publication/242125663_High_Accuracy_Multicolor_Pyrometry_for_High_Temperature_Surfaces (дата звернення: 05.03.2023).
18. Felice R. The spectropyrometer – a practical multi-wavelength pyrometer. *AIP Conference Proceedings*. 2003. <https://doi.org/684.10.1063/1.1627211>
19. Felice R. Pyrometry for liquid metals. *Advanced materials & processes*. 2008. P. 31–33.
20. Жуков Л.Ф., Петренко Д.О. Методи опосередкованих вимірювань випромінювальної здатності вольфраму і залізовуглецевих сплавів. *Український метрологічний журнал*. 2022. № 1. С. 20–27. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258801>
21. Zhukov L.F., Kornienko A.L. New technologies of symmetric-wave multicolour thermometry and their metrological characteristics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014. Vol. 87. No. 2. P. 489–497. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1036-y>

22. Жуков Л.Ф., Петренко Д.А., Корниенко А.Л. Двухцветовая компенсационная термометрия металлических сплавов и ее инструментальные погрешности. *Процессы литья*. 2016. № 5(119). С. 48—58.
23. Two color photodiodes PIN-DSS. URL: <https://www.osioptoelectronics.com/media/pages/products/photodetectors/two-color-sandwich-photodiodes/pin-dss-si-top/70717c79e2-1675100411/dual-sandwich-detectors.pdf> (дата звернення: 01.02.2023).
24. S2000 Miniature Fiber Optic Spectrometers and Accessories. Operation Manual and User's Guide. URL: https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Ocean%20Optics/S2000_Operating_Manual.pdf (дата звернення: 01.02.2023).

RESOURCE-SAVING CONTINUOUS OPTICAL CONTROL OF LIQUID METAL TEMPERATURE IN METALLURGY OF ENERGY MACHINE BUILDING

Leonid Zhukov¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0001-9067-8613>
Dmytro Petrenko^{2*}, <https://orcid.org/0000-0002-7546-9503>

¹General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine;

²Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, 34/1, Vernadskogo Blvd., Kyiv, 03142, Ukraine

*Corresponding author: dima-petrenko@meta.ua

Abstract. *The article is devoted to the problem of the most effective and non-alternative continuous optical temperature control of metallurgical aggregates in machine building metallurgy. The aim of the article is to develop and investigate the technologies of continuous temperature control on the base of classical and spectral (multicolor) thermometry. To achieve the aim, the next methods have been used: analysis of literature sources; experimental investigations of influence regularities of sighting zones, time of tapping, intensity of mixing and liquid metal temperature on one color radiation temperature of liquid metal in visible and infrared spectrum ranges under industrial conditions; statistical processing of the results of direct and indirect measurements with their errors estimation. It has been found the main role of thermometry in the metrological support structure of metallurgical plants. The production volumes of world machine building metallurgy have been analyzed, particularly, the part of metallurgy of energy machine building in it. Metallurgical equipment to be used for liquid metal obtaining and treatment has been classified from thermometric position. The stability of radiation characteristics of liquid metal in cupola, arc and induction furnaces has been investigated under conditions of different impact factors. The methodical errors of optical temperature measurements of liquid metal during tapping from cupola and arc furnaces on the base of classical energy thermometry have been estimated. In special determined cases these errors don't exceed 1,0–1,5% with confidence level 0,997. Under another conditions these errors reaches 8% and this fact stimulates transition to the spectral thermometry. With the use of modern elemental base, the technologies of spectral measurements of temperature and emissivity have been developed. The technologies include: symmetric-wave, two-color compensative, as well as based on nonlinearity equation of emissivity spectral distribution. The temperature measurement errors of new technologies are lower than the same ones of known spectral, as well as classical energy and spectral ratio thermometry in 2,3; 11,7–20,0 and 6,1–7,6 times.*

Keywords: metallurgy of machine building, continuous optical temperature control, cupola furnace, arc furnace, classical and spectral thermometry.

References

1. Temperature measurement of liquid metal. Heraeus Electro Nite. URL: https://www.heraeus.com/media/media/hen/media_hen/products_hen/iron/temperature_measurement_in_liquid_metal.pdf (Last accessed: 17.04.2023).
2. Zhukov, L.F. (1992). Issledovaniye i razrabotka metodov i sredstv temperaturnogo kontrolya i resursoberegayushchikh tekhnologicheskikh protsessov polucheniya zhidkogo chuguna v liteynom proizvodstve: Dr. of Tech. Sc. Kiev, 505 p. [in Russian].
3. Metal Casting Market: Global Industry Analysis and Forecast (2022–2029). (2022, September). *Maximize market research*. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/metal-casting-market/1613/> (Last accessed: 05.02.2023).

4. Paudel, S., Nagapurkar, P., & Smith, J. (2014). Improving process sustainability and profitability for a large U.S. gray iron foundry. *14-th AIChE Annual Meeting*. URL: https://www.researchgate.net/publication/267346357_392009_Improving_Process_Sustainability_and_Profitability_for_a_Large_US_Gray_Iron_Foundry (Last accessed: 17.04.2023).
5. Futas, P., Pribulova, A., & Pokusova, M. (2020). Possibilities Reducing of Energy Consumption by Cast Iron Production in Foundry. *Materials Science Forum*, 998, 36–41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.998.36>
6. Iwamura, T. (1990). Survey on Sensing Technology in Steel Industry. *Journal of The Society of Instrument and Control Engineers*, 29(6), 508–517. <https://doi.org/10.11499/sicej1962.29.508>
7. Census of World Casting Production. (2019, December). Total Casting Tons Hits 112 Million. *Modern Casting*, 22–25. URL: <https://www.qgdigitalpublishing.com/publication/?m=&l=1&i=637245&p=24> (Last accessed: 12.04.2023).
8. Census of World Casting Production. Total Casting Tons Dip in 2019. (2021, January). *Modern Casting*, 28–30. URL: <https://www.qgdigitalpublishing.com/publication/?i=687958&p=30> (Last accessed: 12.04.2023).
9. Census of World Casting Production. Fewer Castings Made in 2020. (2021, December). *Modern Casting*, 28–30. URL: <https://www.qgdigitalpublishing.com/publication/?i=730025&ver=html5&p=28> (Last accessed: 12.04.2023).
10. Iron Castings Market by End-user, Product, and Geography – Forecast and Analysis 2023–2027. (2022, November). *Technavio*. URL: <https://www.technavio.com/report/iron-castings-market-industry-analysis?&search=Iron%20Casting%20Market> (Last accessed: 05.02.2023).
11. Gnatush, V.A., & Doroshenko, V.S. (2021). World market of metal castings 2018–2020: production, countries, technologies. *Casting processes*, 1(143), 57–64 [in Ukrainian].
12. WFO Global Foundry Report–2020. (2020). The World Foundry Organization, 180 p.
13. Krytukov, V.N., & Frunze, A.V. (2012). O proslzhivayemosti sovremennykh pirometrov k pervichnomu etalonu yedynitsy temperatury i klassifikatsii metodov pirometrii. *Measuring technique*, 2, 32–37 [in Russian].
14. Ribo, G. (1934). *Opticheskaya pirometriya*. Translation from French. Moscow–Leningrad: State publishing house of technical and theoretical literature, 455 p. [in Russian].
15. Madura, H., Kastek, M., & Piątkowski, T. (2007). Automatic compensation of emissivity in three-wavelength pyrometers. *Infrared physics and technology*, 51(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.11.001>
16. Cezairliyan, A., Foley, G.M., Morse, M.S., & Miiller, A.P. (1993). Six-wavelength millisecond-resolution pyrometer. *Temperature its Measurement and Control in Science and Industry*, 6, AIP, New York, 757–762.
17. Cassady, L., & Choueiri, E. (2003). High accuracy multicolor pyrometry for high temperature surfaces. *28-th Int. Electric Propulsion Conf. (Toulouse)*, 17–21. URL: https://www.researchgate.net/publication/242125663_High_Accuracy_Multicolor_Pyrometry_for_High_Temperature_Surfaces (Last accessed: 05.03.2023).
18. Felice, R. (2003). The spectropyrometer – a practical multi-wavelength pyrometer. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/684.10.1063/1.1627211>
19. Felice, R. (2008). Pyrometry for liquid metals. *Advanced materials & processes*, 31–33.
20. Zhukov, L.F., & Petrenko, D.O. (2022). The methods of indirect emissivity measurements of tungsten and iron-carbon alloys. *Ukrainian Metrological Journal*, 1, 20–27 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258801>
21. Zhukov, L.F., & Kornienko, A.L. (2014). New technologies of symmetric-wave multicolour thermometry and their metrological characteristics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87, 2, 489–497. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1036-y>
22. Zhukov, L.F., & Petrenko, D.A., & Kornienko, A.L. (2016). Dvukhtsvetovaya kompensatsionnaya termometriya metallicheskih splavov i yeye instrumental'nyye pogreshnosti. *Casting processes*, 5(119), 48–58.
23. Two color photodiodes PIN-DSS. URL: <https://www.osioptoelectronics.com/media/pages/products/photodetectors/two-color-sandwich-photodiodes/pin-dss-si-top/70717c79e2-1675100411/dual-sandwich-detectors.pdf> (Last accessed: 01.02.2023).
24. S2000 Miniature Fiber Optic Spectrometers and Accessories. Operation Manual and User's Guide. URL: https://neuropsychics.ucsd.edu/Manuals/Ocean%20Optics/S2000_Operating_Manual.pdf (Last accessed: 01.02.2023).

Надійшла до редакції: 03.05.2023