

УДК 621

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-5>

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАРЯЧОГО МЕТАЛУ

Суботін Олег Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-6095-5840
Scopus ID: 57210213880

Петрухін Ярослав Ігорович,

аспірант
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0009-0002-8208-6225

Солод Юлія Анатоліївна,

викладач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0000-2350-8403

Сімкін Олександр Ісакович,

кандидат технічних наук,
професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9939-7866
Scopus ID: 7006970867

Отримати сляб із мінімальними показниками ступеню забруднення окалиною та втратами енерго-ресурсів є актуальним завданням металургійного виробництва. Робота присвячена підвищенню якості прокату шляхом модернізації та дослідження автоматизованої системи стеження за якістю очищення поверхні сляба від первинної окалини. Це дозволить системі керування стану реалізувати адаптивний алгоритм керування параметрами гідрозбиву за результатами оцінки стану якості поверхні слябу. Для цього досліджено оптичну систему дистанційного контролю температури прокату з тепловізором в якості первинного перетворювача. Отримано розрахункові залежності, що описують зміну потужності випромінювання від довжини оптичного каналу і величини зовнішніх збурюючих факторів. Також отримано аналітичні вирази і розроблена методика розрахунку статичної характеристики тепловізора в залежності від характеристик середовища поширення оптичного сигналу і випромінювальної здатності певних марок сталей. Теоретично доведено, що діаграма випромінюваних сигналів має широку спрямованість, тому результати вимірювань практично не залежать від кута та відстані установки пристрою до об'єкту контролю. З'ясовано, що для забезпечення високої точності вимірювання температури виникає необхідність експериментальної перевірки коефіцієнтів випромінювання ряду матеріалів з метою визначення фактичної величини ослаблення енергії інформаційного сигналу, а також коригування оптимальної довжини каналу. Проведені дослідження доводять адекватність розроблених моделей і свідчать, що запропонований первинний перетворювач для контролю температури на основі тепловізора може ефективно використовуватися в системах дистанційного контролю температури прокату.

Ключові слова: прокатний стан, сляб, окалина, вимірювання температури, випромінювання, вимірвальний перетворювач, система контролю якості поверхні сляба, тепловізор, модель оптичного каналу.

Subotin Oleg, Petrukhin Yaroslav, Solod Yuliia, Simkin Oleksandr. Development and research of a measuring system for determining the temperature of hot metal

Obtaining a slab with minimal indicators of scale contamination and energy resource losses is an urgent task of metallurgical production. The work is devoted to improving the quality of rolled products by modernizing and studying the automated system for monitoring the quality of cleaning the slab surface from primary scale. This will allow the condition control system to implement an adaptive algorithm for controlling the hydraulic hammering parameters based on the results of assessing the quality of the slab surface. For this purpose, an optical system for remote

monitoring of the temperature of rolled products with a thermal imager as the primary transducer was studied. The calculated dependencies were obtained that describe the change in radiation power from the length of the optical channel and the magnitude of external disturbing factors. Analytical expressions were also obtained and a method for calculating the static characteristics of the thermal imager depending on the characteristics of the optical signal propagation medium and the emissivity of certain steel grades was developed. It was theoretically proven that the diagram of the emitted signals has a wide directivity, so the measurement results practically do not depend on the angle and distance of the device installation to the control object. It was found that to ensure high accuracy of temperature measurement, there is a need for experimental verification of the radiation coefficients of a number of materials in order to determine the actual value of the attenuation of the information signal energy, as well as to adjust the optimal channel length. The conducted studies prove the adequacy of the developed models and indicate that the proposed primary converter for temperature control based on a thermal imager can be effectively used in systems for remote temperature control of rolled metal.

Key words: rolling mill, slab, scale, temperature measurement, radiation, measuring converter, slab surface quality control system, thermal imager, optical channel model.

Вступ. Сучасні вимоги до якості прокату змушують суттєво переглянути технологію його виробництва для задоволення вимог як споживачів, так і національних інтересів держави. Зберегти конкурентоспроможність вітчизняного прокату можна підвищенням якості за рахунок впровадження сучасного автоматизованого обладнання. Одним із способів підвищення якості прокату ще на початковому етапі виробництва є видалення окалини з поверхні нагрітого металу із застосуванням системи гідрозбиву [1].

Застосування системи управління якістю прокату на етапі видалення первинної окалини з використанням високонапірного гідрозбиву передбачає регулювання ряду його параметрів: витрати та тиску води; підйому та опускання колекторів; швидкості рольгангу; включення додаткової секції гідрозбиву тощо. Це призводить до перевитрати енергоносіїв та підвищення витрат на виробництво продукції загалом [2].

На деяких виробництвах система управління прокатним станом регулює тільки швидкість рольгангу установки гідрозбиву в залежності від марки сталі, оскільки передбачається, що для різних сталей потрібен різний час на гідрозбив. У цьому випадку система керування видаленням окалини не має достатньої інформації для ефективного та якісного гідрозбиву. Це призводить до підвищеної витрати води та електроенергії без гарантії якісного видалення окалини [3].

Таким чином, отримати сляб із мінімальними показниками ступеню забруднення окалиною та втратами енергоресурсів стає актуальним завданням. Для вирішення такого завдання необхідно забезпечити систему управління інформацією про рівень забруднення окалиною поверхні слябу. Це дозволить системі керування стану реалізувати адаптивний алгоритм керування параметрами гідрозбиву (переміщення верхніх колекторів, витрата та тиск технічної води, швидкість рольгангу) за результатами оцінки стану якості поверхні слябу.

Відомо, що в залежності від товщини й ступеню покриття окалиною знижується температура теплового випромінювання слябу [2,3]. Отже, розробка та впровадження вимірювальної системи визначення температури гарячого металу дозволить отримати інформацію щодо якості слябу, а отже й кількості окалини на ньому.

Це дозволить системі керування установки гідрозбиву забезпечити її роботу при мінімальних витратах енергоносіїв та максимальному очищенні слябу від окалини за рахунок коректного формування сигналів завдання для систем керування швидкісним режимом рольгангу та подачею води.

Як практичний результат очікується підвищення якості прокату за рахунок модернізації автоматизованої системи стеження за якістю очищення поверхні слябу від первинної окалини.

Метою роботи є підвищення якості прокату шляхом модернізації та дослідження системи вимірювання температури гарячого металу.

Методи та методики дослідження. Вихідною заготовкою для прокатного листа товщиною 5...50 мм на прокатному стані є сляби товщиною 60...250 мм, шириною 1900...2800 мм і довжиною до 10000 мм, що розігріті до температури 1100...1200 °С.

Аналіз експлуатації існуючих прокатних станів [4; 5] показує, що, наприклад, у вуглецевих сталях утворюється первинна окалина у вигляді «сухого» шару, а в легованих сталях – «липкого» шару, що міцно зчеплений з поверхнею металу.

Відомо, що товщина та структура шару окалини на різних етапах процесу виробництва смугового прокату різняться, що впливає на температуру випромінювання. Так, утворення окалини в методичній печі зменшує температуру випромінювання з 1100 °С до 800 °С за рахунок товщини окалини до 3,00 мм, в чорновій кліті – з 1100 °С до 1000 °С за рахунок товщини окалини до 0,25...0,75 мм, а на гарячекатаній

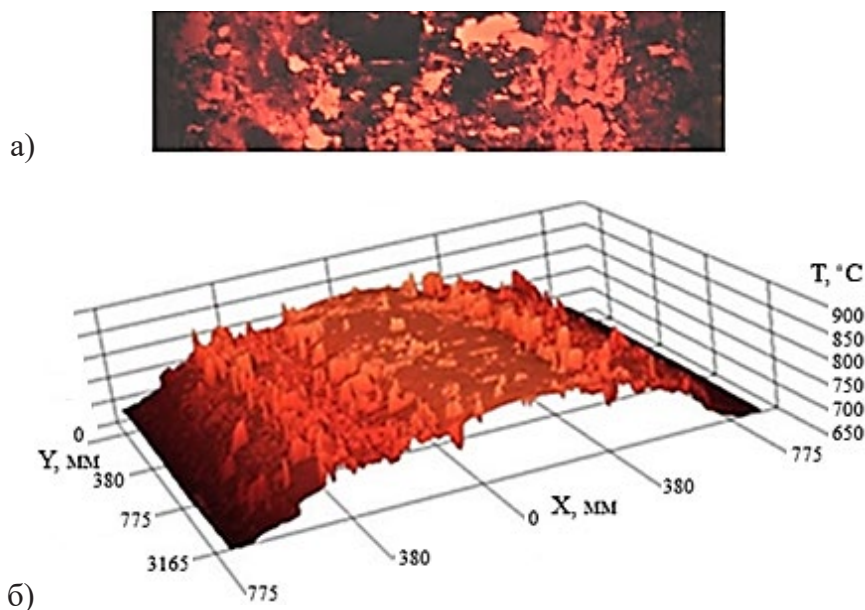


Рис. 1. Знімок ділянки поверхні слябу, ураженого окалиною (а) та розподіл температури за його поверхнею (б)

смуги – з 1100°C до 1050°C за рахунок товщини окалини до $0,10\dots 0,35$ мм. Отже, залежно від товщини та ступеня покриття окалиною знижується температура теплового випромінювання слябу на $0\dots 300^{\circ}\text{C}$.

При гідрозбиву відбувається видалення окалини водою, що подається на поверхню прокату через спеціальні форсунки під тиском до 60 МПа. Гідрозбив сприяє більш інтенсивному охолодженню металу при прокатці.

Вимірювання температури поверхні слябу є одним з небагатьох методів неруйнівного контролю параметрів заготівлі, що дозволяють проводити вимірювання у процесі її транспортування [6; 7].

Визначення температури поверхні металу, прихованої під шаром окалини, можливо комбінацією двох методів – методу екстраполяції та методу математичного моделювання. Суть поєднання методів полягає в скануванні температурної матриці сляба у напрямку його витягування, визначенні ділянки окалини та заміні даних на цій ділянці значеннями температури, що лінійно змінюються між значеннями на його межах. На рис.1,а наведений знімок ураженої окалиною ділянки поверхні слябу, а на рис.1,б – розподіл температури за його поверхнею.

Далі, комп'ютерною обробкою температурного знімка отримують розподіл наближеної до реальних значень температури поверхні заготівлі. Остаточо, розподіл температури по ширині сляба обчислюється шляхом усереднення її значень за довжиною на обмеженій ділянці поверхні.

На рис. 2 наведені результати розподілу температури, отримані після обробки температурного знімка за допомогою наведеної методики.

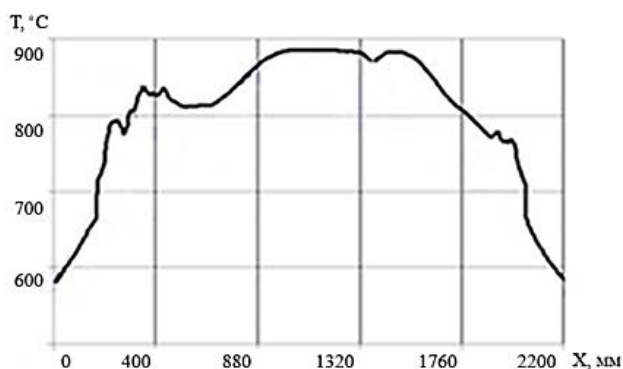


Рис. 2. Результати розподілу температури слябу за його шириною, отримані після обробки температурного знімка

У виробничих процесах досить часто виникають подібні завдання безконтактного вимірювання температури нагрітих металевих виробів. Найбільш зручними є методи визначення температури, засновані на реєстрації теплового випромінювання, що розповсюджується з поверхні нагрітого виробу. У якості вимірювального елемента зазвичай використовуються пірометри, а рідше – тепловізійна техніка [8; 9; 10].

Достовірність вимірювання температури металів понад 700°C можна забезпечити використанням високотемпературних тепловізорів [11].

Провідність металу, ступінь шорсткості поверхні та її окиснення можуть призводити до

сильної зміни спектральної залежності коефіцієнта теплового випромінювання від довжини хвилі λ порівняно з довідковими значеннями, як показано на рис. 3. В інфрачервоній ділянці спектра при довжині хвилі $\lambda > 10$ мкм коефіцієнт теплового випромінювання металів приблизно апроксимується формулою Друде (штрихові лінії на рис. 3) [12].

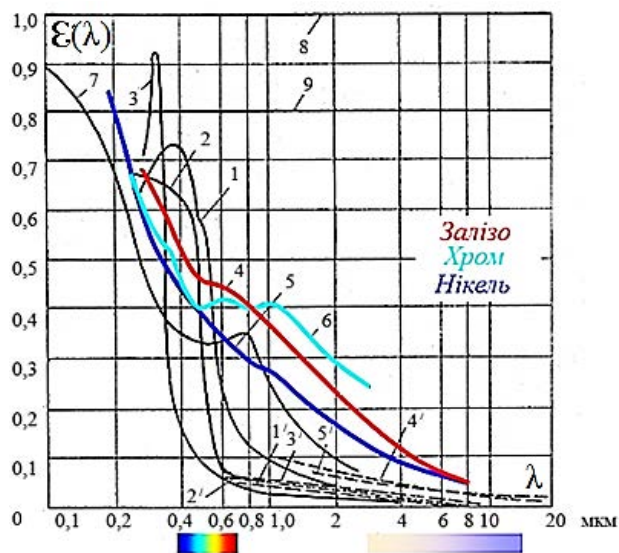


Рис. 3. Залежність спектрального коефіцієнта теплового випромінювання від довжини хвилі λ : 1,1' – мідь; 2,2' – золото; 3,3' – срібло; 4,4' – залізо; 5,5' – нікель; 6 – хром; 7 – алюміній; 8 – чорне тіло; 9 – сіре тіло

Аналіз залежності спектрального коефіцієнта теплового випромінювання від довжини хвилі λ показав, що для зменшення відносної похибки визначення істинної температури використовується спектральний діапазон, що лежить на стику видимої і ближньої інфрачервоної області спектра. У цьому діапазоні коефіцієнт випромінювання металів досить великий, що знижує вимоги до точності вимірювання порівняно з діапазоном 8...14 мкм (кольорові лінії на рис. 3) [4].

Крім товщини шару окалини треба також знати площу покриття окалиною поверхні слябу, яка визначається відповідно до розглянутої комбінованої методики. Розглянуто три сляби з різним ступенем покриття окалиною (рис. 4). Зліва направо кількість окалини на поверхні збільшується.

Для визначення площі покриття поверхні слябів окалиною прийнято метод з використанням сітки, яка програмно накладається на макет слябу (рис. 5). Тепловізор, як альтернатива, має функцію «Сигнальне забарвлення низької

температури», яка фарбуватиме області нижче заданої температури в синій колір (рис. 6).



Рис. 4. Сляби з різним ступенем забруднення загальної площі слябу: а) до 15%, б) до 70%, в) до 100%

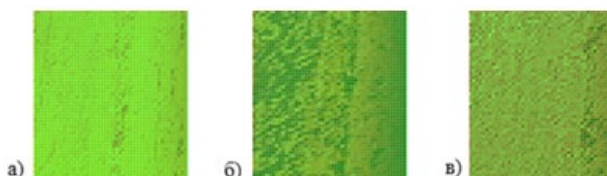


Рис. 5. Приклад накладання сітки на макети слябів з різним ступенем забруднення загальної площі слябу: а) до 15%, б) до 70%, в) до 100%

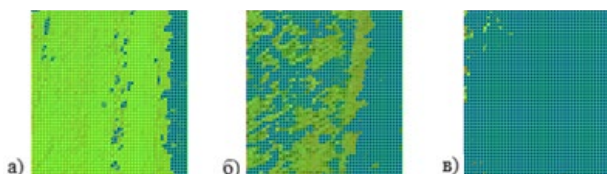


Рис. 6. Приклад роботи режиму «Сигнальне забарвлення низької температури» для визначення площі забруднення поверхні слябу окалиною: а) 11,3%, б) 60,4%, в) 94,4%

Система управління може забезпечити якість слябу зі ступенем забруднення до 5% від загальної площі – він буде взятий як еталон. Якщо площа покриття окалиною вище за еталонне значення, як показано в прикладах на рис. 6, поверхня заготовки піддається обробці гідрозбивом в залежності від кількості окалини.

Згідно з умовами експлуатації системи дистанційного вимірювання температури розігрітого металу на стані доречно застосувати промисловий тепловізор фірми FLIR серії A310, який має точність вимірювання температури до 2% та можливість передачі даних й управління з комп'ютера в режимі реального часу за допомогою спеціального програмного забезпечення. Для забезпечення необхідного класу захисту тепловізор поміщений у захисний охолоджуваний кожух. Основні технічні характеристики тепловізора наведена в табл. 1 [13].

Таблиця 1
Технічна характеристика тепловізора FLIR A310

Параметри	Величини
Діапазон температур, °C	300...2000
Живлення	по Ethernet, PoE IEEE 802.3af клас 0
Область вимірів	10 вікон з мін./макс./середнє
Спектральний діапазон, мкм	7,5...13
Діапазон робочої температури, °C	від -15 до 50
Похибка	±2°C або ±2% від показань
Передача потокового відео Ethernet	MPEG-4, MPEG-4 ASP @ L5
Живлення від зовнішнього джерела,	12...24 пост. струму

При дослідженні первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) оптичного типу розглядаються, як правило, через зв'язок між вхідною величиною $x_{вх}$ і розподілом потужності світлового випромінювання $P(x)$ в конкретному середовищі розповсюдження [14].

Розрахунок розподілу потужності випромінювання в каналі розповсюдження оптичних сигналів (КРОС) з зосередженим джерелом випромінювання є дуже складною задачею, тому що потужність світлового випромінювання $P(x)$ залежить від довжини каналу (L_k), тілесного кута випромінювання ($2\rho_B$), коефіцієнта відбиття (K_B), від параметрів самого випромінювача, місця його розташування і іншого. Тому, використання тепловізора в якості первинного вимірювального перетворювача полегшує задачу його розрахунку.

Розрахункова схема тепловізора як елемента оптичної системи вимірювання температури з розосередженим джерелом випромінювання наведена на рис. 7, де прийняти наступні позначення: ДВ – джерело випромінювання, ФП – фотоприймач, КО – контрольований об'єкт, K_B – коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта, ρ_B – кут виходу променя, D – діаметр апертури лінзи, L_k , $L_{п}$ – довжина каналу та променя відповідно, X_0 – відстань від лінзи до фотоприймача.

Для тепловізора, що реалізує оптичну локацію, зручно розглядати окремо потужність відбитого прямого випромінювання $P_{пр}(x)$ і відбитого під кутом до бічної поверхні об'єкта контролю $P_{кут}(x)$, які є складовими сумарної потужності $P(x)$, що потрапляє на фото приймальний пристрій (ФП)

$$P(x) = P_{пр}^B(x) + P_{кут}^B(x). \quad (1)$$

На основі математичної моделі ПВП оптичного типу і наведених вище міркувань, розподіл потужності випромінювання в КРОС визначається виразом

$$P_{пр}^B(x) = P_0 \exp(-K_x \cdot x) K_B = I^2 \frac{S}{x^2} \exp(-K_x \cdot x) K_B, \quad (2)$$

де $K_x = \frac{1}{4\pi}$ – природні втрати в КРОС, x – довжина оптичного каналу, м.

Деяко складніше буде питання визначення потужності відбитого під кутом світлового потоку $P_{кут}(x)$.

Джерелом випромінювання є сам контрольований об'єкт, поміщений на осі, де окрема його ділянка дає пучок променів з малою апертурою – в межах кута $2\rho_B = \Omega$.

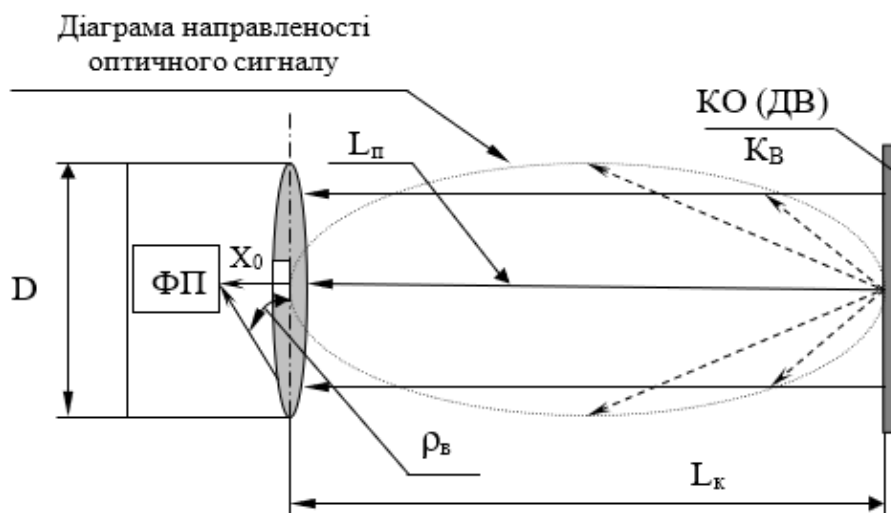


Рис. 7. Розрахункова схема тепловізора як елемента оптичної системи вимірювання температури

Будь-який об'єкт має свою величину випромінювальної здатності, яка визначається коефіцієнтом випромінювання K_B . Практично зміна K_B визначається збільшенням кута випромінювання, через що відбувається збільшення довжини шляху променю, а це призводить до часткової втрати потужності випромінювання.

Довжина шляху променю, що вийшов під кутом ρ_B до осі, дорівнює:

$$L_n = \frac{(L_k + X_0)}{\cos \rho_B} = \frac{X}{\cos \rho_B}. \quad (3)$$

Тоді зміна коефіцієнта відбиття визначається виразом:

$$\rho_{розр} = K_B \cdot \exp\left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B\right), \quad (4)$$

де $\rho_{розр}$ – розрахунковий коефіцієнт відбиття.

Тоді, досить точну для практичних розрахунків формулу для визначення потужності відбитого під кутом ρ_B світлового випромінювання можна отримати з виразу (1) з урахуванням (4).

$$P_{кут}^B(x) = P_0 \exp(-K_x X) \cdot K_B \exp\left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B\right). \quad (5)$$

Тоді, для тепловізора, що реалізує оптичну локацію, сумарна потужність випромінювання, що падає на ФП, дорівнює:

$$P(x) = P_0 \exp(-K_x X) \cdot K_B + P_0 \exp\left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B\right) \cdot K_B = P_0 K_B \left[\exp(-K_x X) + \exp\left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B\right) \right] \quad (6)$$

Очевидно, що основна потужність випромінювання, відбитого від поверхні об'єкта, буде зосереджена на осі оптичної системи.

Згідно розрахунковій схемі вимірювання температури з розосередженим джерелом випромінювання кут ρ_B визначається з виразу:

$$\operatorname{tg} \rho_B = \frac{D/2}{X_0}, \quad \gamma = \arctg \frac{D}{2X_0}, \quad (7)$$

де D – діаметр лінзи, м, X_0 – внутрішній оптичний канал, м.

Для випадку оптичної локації, коли джерелом випромінювання є сам контрольований об'єкт, величина X характеризує довжину шляху променю і може бути заданою на рівні L_k .

Запропонована інтерпретація математичної моделі вимірювача температури з тепловізором дозволяє провести розрахунок розподілу потужності випромінювання $P(x)$ на фотоприймачі при різних значеннях коефіцієнтів випромінювання K_B і довжини каналу, а також визначити оптимальну довжину каналу, при якій

випромінюваний оптичний сигнал буде впевнено фіксуватися на приймальному кінці перетворювача.

Таким чином, вираз (6), перетворений до виду

$$\frac{P(x)}{P_0} = K_B \left[\exp(-K_x X) + \exp\left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B\right) \right] \quad (8)$$

є основним при розробці методики розрахунку перетворювача і його можна вважати рівнянням статичної характеристики тепловізора. Статична характеристика дозволяє визначити основні параметри, а також режим роботи вимірювального перетворювача температури.

Зважаючи на складність інтегральних виразів (8), що описують математичну модель тепловізора, його доцільно вирішувати чисельним методом на ПК. При цьому актуальним питанням залишається визначення фактичних значень коефіцієнтів випромінювання для матеріалів різного виду і теплового стану. Порівняння отриманих коефіцієнтів з розрахунковими дозволить перевірити адекватність запропонованої моделі.

На рис. 8 наведені залежності значення сумарної потужності $P(x)$ на фотоприймачі від загальної довжини оптичного каналу X .

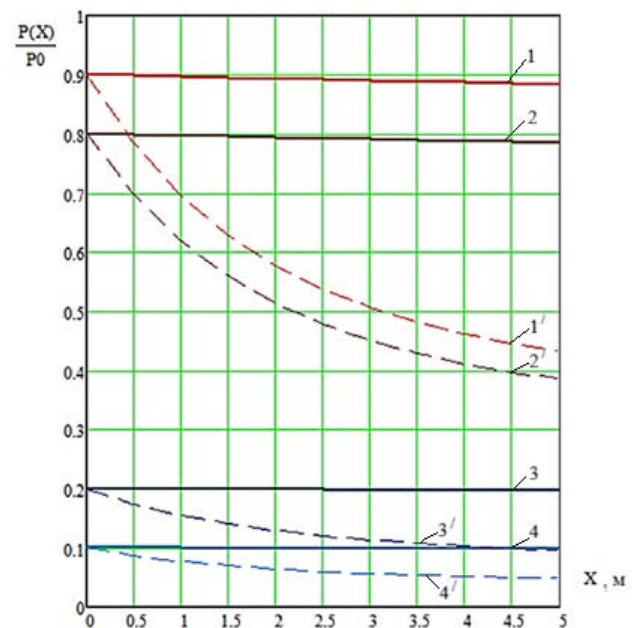


Рис. 8. Суміщені статичні характеристики вимірювальних систем з тепловізором (безперервні лінії) та пірметром (пунктирні лінії) для сталей: вуглецева (1,1'), хромонікелева (2,2'), хромиста (3,3'), жаростійка (4,4')

Розрахунки проводилися з використанням програми MathCAD. Для розрахунку прийнятий

тепловізор типу FLIR A310 з наступними параметрами: $K_x = 0.02$, $X_0 = 0.025$ м, $D = 0.03$ м. Коефіцієнти випромінювання взяті для різних марок сталей використовуваних в прокатному виробництві: окислена вуглецева сталь ($K_v = 0.87...0.9$), хромиста нержавіюча сталь ($K_v = 0.17...0.26$), хромонікелева нержавіюча сталь ($K_v = 0.72...0.88$), жаростійкі сплави ($K_v = 0.1...0.13$). Діапазони коефіцієнтів відповідають діапазону температури 800...1100 °С, що забезпечує точний вимір температури випромінювання.

Структури математичної моделі системи вимірювання температури на основі пірометра та тепловізора ідентичні. З урахуванням поправки коефіцієнта природніх втрат сигналу в оптичному каналі K_x для тепловізора замість коефіцієнта відбиття вводиться коефіцієнт випромінювання K_v .

На рис. 8 наведені суміщені статичні характеристики вимірювальних систем з тепловізором (безперервні кольорові лінії) та пірометром (пунктирні кольорові лінії) в якості вимірювального елемента. Ці характеристики представляють собою залежності відносного значення сумарної потужності $P(x)/P_0$ на фотоприймачі (вимірювальному елементі) від загальної довжини оптичного каналу X для окисленої вуглецевої сталі з $K_v = 0.9$, хромистої нержавіючої сталі з $K_v = 0.2$, хромонікелевої нержавіючої сталі 0X18N10 з $K_v = 0.8$ та жаростійкого сплаву з $K_v = 0.1$. Значення потужності P_0 відповідає максимальній потужності випромінюванню при $X = X_0$.

Результати дослідження математичної моделі системи вимірювання з тепловізором показують, що на відстані візування нагрітого об'єкту 5 м втрата потужності сигналу не перевищує 2% (відповідає технічним характеристикам обраного тепловізора). При цьому в моделі

з пірометром при тих самих умовах роботи приладу потужність падає на 50%.

На основі моделювання формується база коефіцієнтів випромінювання відповідних марок сталей, що прокочуються. База даних використовується системою для вибору потрібного значення коефіцієнта випромінювання для коректної роботи тепловізора [15].

У програму системи управління також занесена залежність ступеня покриття слябу окалиною (V , %) від площі покриття окалиною (S , мм²), та залежність товщини шару окалини (M , мм) від мінімальної температури (T_{\min} , °С), як показано на рис. 9,а та рис 9,б відповідно. Як правило, товщина шару окалини варіюється в межах 0...3 мм, а температура теплового випромінювання – в межах 1100...800°С.

Сумарна площа всіх зачищених ділянок на одному листі повинна бути не більше 2% його площі (ДСТУ 8803:2018) [16]. За зразок приймається сляб зі ступенем покриття окалиною до 5% загальної площі заготівлі.

Після обробки сляба в першій секції установки гідрозбиву вихідний тепловізор реєструє температуру теплового випромінювання та обчислює ступінь покриття окалиною та її товщину. У разі, якщо $V > 35\%$ та $M < 1,5$ мм, то включається програма обробки слябу попереднього режиму, але зняття окалини відбувається вже у додатковій секції установки.

Результати та дискусії. Статична характеристика вимірювального перетворювача з тепловізором відповідає аналогу з пірометром, що підтверджує адекватність проведених розрахунків. Але результати досліджень та моделювання для системи вимірювання температури з тепловізором показали її суттєві відмінності.

Результати вимірювання системи на основі тепловізора не залежать від кута візування.

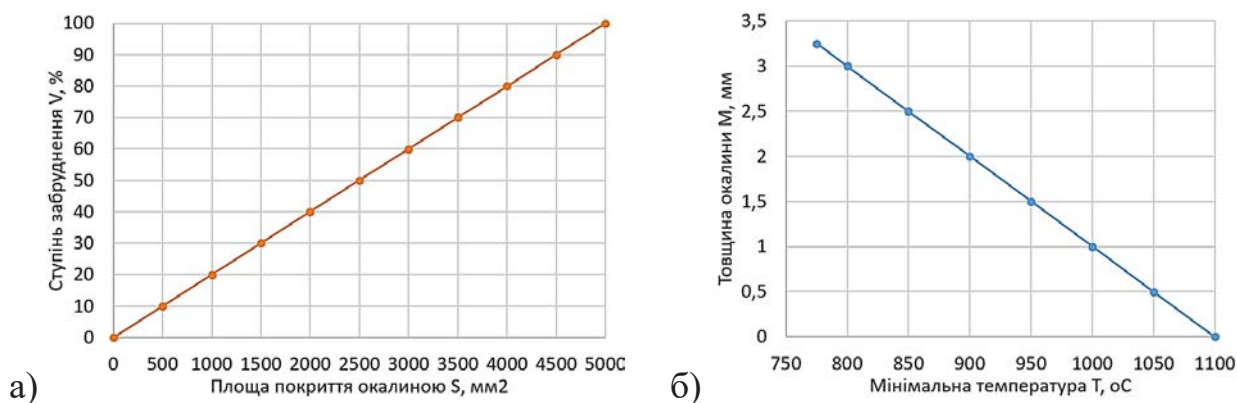


Рис. 9. Графіки залежності ступеня покриття слябу окалиною від площі забруднення (а) та товщини шару окалини від температури (б)

Перетворювач реєструє спектральне випромінювання – хвилі різної довжини та кольору, які випромінює сам об'єкт. Тому, на відміну від системи вимірювання з пірометром, діаграма зміни потужності сигналу на фотоприймачі $P(x)/P_0$ від кута випромінювання відсутня [4; 14].

Згідно з параметрами тепловізора, похибка вимірювання не перевищує $\pm 2\%$ від показань, що дорівнює модельній точності роботи системи.

Можна зробити висновок, що зменшення коефіцієнта випромінювання ніяк не позначається на потужності (якості зображення), що реєструється тепловізором.

Висновки. На підставі наведених досліджень процесів прийому оптичних сигналів отримано розрахункові залежності, що описують зміну потужності випромінювання від довжини оптичного каналу та коефіцієнта випромінювання. Це дозволило розробити методику розрахунку статичної характеристики системи вимірювання температури на основі тепловізора залежно від характеристик середовища розповсюдження оптичного сигналу та випромінювальної здатності певних марок сталей. Отримані результати дозволяють визначити оптимальну довжину оптичного каналу (загалом або для конкретного виду матеріалу й виробу) для отримання максимальної достовірності контролю.

Теоретичні дослідження показали, що діаграма випромінюваних сигналів має широку спрямованість, оскільки тепловізор фіксує спектральне випромінювання. Отже, результати

вимірювань практично не залежать від кута та відстані установки пристрою. Відстань до об'єкта контролю обмежується тільки роздільною здатністю камери. Натомість для забезпечення високої точності вимірювання температури виникла необхідність експериментальної перевірки коефіцієнтів випромінювання ряду матеріалів з метою визначення фактичної величини ослаблення енергії інформаційного сигналу, а також коригування оптимальної довжини каналу.

Тепловізор має вбудовані фільтри для поліпшення якості зображення (на пропускання атмосфери й оптики та їх прозорість, на часткове відображення, на видимому відбиту температуру, тощо), що підвищує його стійкість до перешкод й позитивно впливає на точність контролю температури. Тобто, перетворювач практично нечутливий до перешкод будь-якого типу.

Проведені дослідження доводять адекватність розроблених моделей і свідчать, що розроблений первинний перетворювач для контролю температури на основі тепловізора може ефективно використовуватися в системах дистанційного контролю температури прокату.

Також він може бути використаний як первинний перетворювач в інформаційних системах контролю та адаптивних системах управління технологічними процесами холодної та гарячої прокатки чорних та кольорових металів, здійснювати контроль наявності заготовок на будь-яких технологічних лініях та в термічних установках на тлі інтенсивних оптичних та електромагнітних перешкод різної природи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Суботін О.В. Інформаційне забезпечення систем управління прокатних станів. International scientific conference "MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education": conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2023. Vol. 2. Pp. 68-71. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-102>.
2. Миронов К.А., Дмитрієнко О.В. Способи енергозбереження в пристроях для гідрозбивання окалини. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*. № 2, 2022. С. 45-48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2022.2.07>.
3. Ієвлев М.Г., Корбут В.Б. Енергозберігаюча автоматизована система гідрозбивання окалини для стана гарячої прокатки. *Науково-технічна інформація*. 2012. № 1 (51). С.44-48.
4. Суботін О.В. Підвищення достовірності контролю технологічних параметрів і швидкодії інформаційно-вимірювальних систем прокатних станів: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.11.16. Донецьк, 2000. 216 с.
5. George Kelk Corporation. KELK Sensors for Rolling Mills. Description and Specifications. Ontario, Canada, 1998.
6. Бондаренко О. Г. Визначення інформативних параметрів та обґрунтування правила порогової ідентифікації дефектів у тепловому неруйнівному контролі. *Методи та прилади контролю якості*. № 2 (51), 2023. С. 5-15. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-2\(51\)-5-15](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-2(51)-5-15).
7. Акуленко О. С. Система дистанційного моніторингу температури на основі пірометрів із автоматичною передачею даних для подальшого аналізу : магістерська дис. : 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Київ, 2024. 142 с. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71871>.
8. Неня О.В. Сучасні тепловізори для спеціального та повсякденного застосування. Сучасна спеціальна техніка. 2016. № 4. С. 108-120.
9. Озонович А., Панчук О. Методи і засоби вимірювання розподілу температури. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2017. Том 78. С. 34-41.
10. Юзьвак О. О. Автоматизована тепловізійна система для моніторингу стану підземних тепломереж: магістерська дис.: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Київ, 2024. 96 с.

11. Сергеева К.О. Вимірювання температури сталі у конвертері. *Металознавство та обробка металів*. 2010. № 1. С. 36-38. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/63617>.
12. Ashcroft N.W., Mermin N.D. *Solid state physics*. Cengage Learning. 2022.
13. Стационарні тепловізійні камери Flir A310 для моніторингу температур у виробничих процесах. Електронний ресурс. URL: <https://www.flir.kiev.ua/ua/flir-a310.html>.
14. Subotin O. Photoelectric measuring transducers in environmental and objects monitoring systems. In book: *Teaching and subjects on bio-medical engineering. Approaches and experiences from the BIOART-project* / O. Subotin, V. Rudenko, A. Cherniavskiy, A. Kovalenko, S. Dobriak. Leuven, 2021. Pp. 64-85. ISBN 978-94-641-4245-7.
15. Subotin O.V., Petrukhin Ya.I., Liuta A.V., Novikov D.S. Information-measuring systems for monitoring the technological parameters of rolling mills. *Scientific World Journal*, 2026, № 35-01, pp. 186-198. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2026-35-01-089>
16. ДСТУ 8803:2018. Прокат товстолістовий з вуглецевої сталі звичайної якості. Київ. 2018. 54 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78625

REFERENCES:

1. Subotin, O.V. (2023). Informatsiyne zabezpechennya system upravlinnya prokatnykh staniv [Information security of rental management systems]. International scientific conference "MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education": conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvija: "Baltija Publishing". Vol. 2. P. 68-71 [in Ukrainian].
2. Mironov, K.A., Dmytrienko, O.V. (2022). Sposoby enerhozberezhennya v prystroyakh dlya hidrozbyvannya okalyny [Energy saving methods in devices for hydro-scaling]. *Hydraulic machines and hydraulic units*. №. 2. Pp. 45-48 [in Ukrainian].
3. Iyevlyev, M.H., Korbut, V.B. (2012). Enerhozberihayucha avtomatyzovana systema hidrozbyvannya okalyny dlya stana haryachoyi prokatky [Energy-saving automated slag hydro-beating system for hot rolling mill]. *Naukovo-tekhnichna informatsiya*. № 1 (51). Pp. 44–48 [in Ukrainian].
4. Subotin, O.V. (2000). Pidvyshchennya dostovirnosti kontrolyu tekhnolo-hichnykh parame-triv i shvydkodiyi informatsiyno-vymiryval'nykh system pro-katnykh staniv: dys. na zdobuttya naukovooho stupenya kand. tekhn. nauk: 05.11.16 [Increasing the reliability of control of technological parameters and the speed of information and measuring systems of rolling mills: dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.11.16]. Donets'k, 216 s. [in Ukrainian].
5. George Kelk Corporation (1998). [KELK Sensors for Rolling Mills]. Description and Specifications. Ontario, Canada.
6. Bondarenko, O. G. (2023). Vyznachennya informatyvnykh parametriv ta obgruntuvannya pravyla porohovoyi identyfikatsiyi defektiv u teplovomu neruynivnomu kontroli [Determination of informative parameters and justification of the rule of threshold identification of defects in thermal non-destructive testing]. *Methods and devices of quality control*. No. 2 (51). Pp. 5-15 [in Ukrainian].
7. Akulenko, O.S. (2024). Systema dystantsiynoho monitorynhu temperatury na osnovi pirometriv iz avtomatychnoyu peredacheyu danykh dlya podal'shoho analizu : mahisters'ka dys. : 174 Avtomatyzatsiya, komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi ta robototekhnika [Remote temperature monitoring system based on pyrometers with automatic data transfer for further analysis: Master's thesis: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics]. Kyiv. 142 p [in Ukrainian].
8. Nenyta O.V. (2016). Suchasni teplovizory dlya spetsial'noho ta povsyakdennoho zastosuvannya [Modern thermal imagers for special and everyday use]. *Modern special equipment*. No. 4. P. 108-120.
9. Ozogovych A., Panchuk O. (2017). Metody i zasoby vymiryuvannya rozpodilu temperatury [Methods and means of measuring temperature distribution]. *Measuring equipment and metrology*. Vol. 78. P. 34-41.
10. Yuzvak O. O. (2024). Avtomatyzovana teploviziynna systema dlya monitorynhu stanu pidzemnykh teplomerezh: mahisters'ka dys.: 174 Avtomatyzatsiya, komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi ta robototekhnika [Automated thermal imaging system for monitoring the condition of underground heating networks: master's thesis: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics]. Kyiv, 96 p.
11. Sergeeva, K.O. (2010). Vymiryuvannya temperatury stali u konverteri [Measuring the temperature of steel in a converter]. *Metallurgy and metal processing*. No. 1. P. 36-38 [in Ukrainian].
12. Ashcroft, N. W., Mermin, N. D. (2022). [Solid state physics]. Cengage Learning.
13. Flir (2026). Flir A310 stationary thermal imaging cameras for monitoring temperatures in production processes. <https://www.flir.kiev.ua/ua/flir-a310.html>. Accessed 10 Apr 2026.
14. Oleg Subotin, Vladislav Rudenko, Anton Cherniavskiy, Andriy Kovalenko, Serhii Dobriak (2021). [Photoelectric measuring transducers in environmental and objects monitoring systems]. In book: *Teaching and subjects on bio-medical engineering. Approaches and experiences from the BIOART-project*. Pp. 64-85.
15. Subotin, O.V., Petrukhin, Ya.I., Liuta, A.V., Novikov, D.S. (2026). [Information-measuring systems for monitoring the technological parameters of rolling mills]. *Scientific World Journal*. № 35-01. Pp. 186-198. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2026-35-01-089>.
16. DSTU 8803:2018. Prokat товстолістовий з вуглецевої сталі звичайної якості [Rolled thick sheets of carbon steel of ordinary quality]. Kyiv. 2018. 54 p.



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 10.04.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.05.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026