

ОТРИМАННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ПІРОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ В ЗАДАЧАХ ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Розглянуто особливості діагностики та управління високотемпературними технологічними процесами за даними візуалізації. Обґрунтовано доцільність перетворення кольорового растрового зображення виробничої видової сцени у поле пірометричних даних. Запропоновано вдосконалену математичну модель визначення температурного растру для практичних застосувань. Визначено діагностичні критерії та способи інтерпретації пірометричних даних в задачах управління технологічними процесами зі значними локальними тепловими навантаженнями.

Ключові слова: *технічний зір, растрове зображення, спектральна пірометрія, експрес-діагностика, прийняття рішень, технологічний процес, процеси фізико-технічної обробки.*

Вступ

Підвищення виробничої ефективності та забезпечення якості продукції нерозривно пов'язані із глибиною та оперативністю діагностування станів виробничої системи та гнучкістю управління технологічним процесом. Вимога підвищення продуктивності та зниження собівартості виробництва зумовлює інтенсифікацію проведення технологічних операцій, що проявляється у збільшенні потужності підведення енергії в зону обробки та підвищенні динаміки технологічних перетворень. За такого підходу здійснення контролю якості тільки по завершенні операції в багатьох випадках приводить лише до констатації наявного стану, що часто робить неможливим упередження технологічного браку або економічно недоцільним його виправлення. Проведення оперативного контролю повинне відповідати ряду критеріїв: не чинити впливу на перебіг технологічних операцій, забезпечувати комплексність діагностичних даних, мати добру узгодженість з динамікою та базовими параметрами процесу обробки. Таким критеріям відповідає візуальний канал. Він забезпечує безконтактність отримання первинних даних, гарну апаратну та програмну вбудованість у виробничу систему, створює передумови неперервності контролю технологічних перетворень і оперативності здійснення управління ними. Слід зазначити, що візуальний канал є джерелом вхідних даних систем технічного зору, які вже набули поширення в ряді галузей [1] при здійсненні управління та оперативного контролю якості. Проте їхнє застосування в технологіях фізико-технічної обробки є обмеженим. Причиною є суттєва інформаційна збитковість візуальних даних, яка зумовлює неоднозначність їхнього опису та трактування. Дана обставина обумовлює актуальність отримання нових способів трансформації видових сцен технологічного походження у діагностичні ознаки та параметри управління виробничими процесами.

Метою даної роботи є розробка способів виділення інформаційних ознак для задач діагностики та управління процесами фізико-технічної обробки за даними візуального спостереження технологічної зони. Практична цінність дослідження полягає у підвищенні ефективності управління обробкою, оперативного виявлення відхилень перебігу технологічних операцій та стану обладнання, що забезпечує підвищення ефективності виробництва та позитивно позначається на якості кінцевої продукції.

Об'єктом дослідження є інформаційна технологія технічного зору, а його предметом – методи виділення, обробки та інтерпретації візуальних даних в задачах діагностики та управління.

Постановка задачі

У загальному випадку, діагностика та управління процесами фізико-технічної обробки потребують виділення інформативних ознак, за якими може бути проведена ідентифікація станів виробничої системи та характеру перебігу технологічного процесу. Ефективність як виділення такого виду ознак із даних візуалізації, так і їх інтерпретації значною мірою пов'язана із вирішенням наступних задач даного дослідження:

- виявлення продуктивних підходів щодо візуалізації видових сцен технологічних процесів фізико-технічної обробки;
- визначення способу мінімізації збитковості вхідних даних;
- отримання методу підсилення інформаційних ознак;
- розроблення методу визначення динамічних параметрів обробки за статичними видовими сценами;
- розроблення заходів з мінімізації ресурсних витрат при застосуванні методів візуалізації на актуальних для виробничих систем програмно-апаратних платформах.

Підходи до візуалізації процесів фізико-технічної обробки

Виходячи із завдань діагностики та управління виробничими процесами, слід виділити ряд основних вимог до візуалізації зони обробки, а саме: забезпечення високого рівня інформативності та достовірності, а також простоти реалізації виділення ознак і параметрів процесу; мінімізації прояву паразитних артефактів, візуальних спотворень, завад та шумів; забезпечення безперервності та стабільності збору даних. На практиці належна якість візуалізації досягається за рахунок вдалого підбору таких параметрів, як ракурсу, спектральних діапазонів, часу та періодичності ведення спостереження, характеру підсвітки та масштабування зони обробки. В цілому, ефективність проведення візуалізації процесів обробки слід пов'язувати з комплексним урахуванням властивостей апаратно-програмного, метрологічного і методологічного забезпечення, що являє собою складну задачу.

Недостатній рівень формалізації технологічних процесів потребує проведення окремих досліджень, спрямованих на визначення оптимальних підходів до їхньої візуалізації. Це завдання в рамках даної роботи вирішувалося методами натурального моделювання, а також шляхом аналізу синтезованих зображень, отриманих методами чисельного та імітаційного моделювання. В якості базових технологічних процесів обрано зварювання та лазерну розмірну обробку, які є типовими представниками фізико-технічних методів.

На рис. 1 представлено отримані у результаті натурних досліджень дані візуалізації перебігу процесу лазерного різання конструкційної сталі на технологічній установці виробництва INEX systems (м. Черкаси) з імпульсним трьохквантронним АІГ-лазером потужністю 500 Вт. Кадри зображення отримано за допомогою монохромної камери Basler piA640-210gm з світлофільтром BP 850 (інфрачервоний діапазон) для моментів часу дії лазерного випромінювання (рис. 1а) та паузи між технологічними імпульсами (рис. 1б) при частоті 80 Гц.



Рис. 1 Варіація візуальних ефектів лазерної розмірної обробки

Аналіз зображення, яке представлено на рис. 1а, демонструє складність візуальної обстановки у зоні спостереження. Крім світлової плями п. 1, на зображенні є ряд інших візуальних артефактів, зокрема треки іскор п. 2, утворених в результаті згорання у повітряному потоці продувки диспергованих часток матеріалу, відблиски від поверхні заготовки та технологічного оснащення п. 3, паразитні ефекти оптичного тракту п. 4, утворені прозорим захисним екраном технологічної камери та об'єктивом відеосенсора. Окремо слід звернути увагу на структуру світлової плями. Вона має яскраво виражену центральну та суттєво розмиту периферійну частину. Центральна зона плями обмежена нерівномірним по формі контуром, що зумовлено різною щільністю і температурою продуктів газової ерозії, високим заломленням вторинного випромінювання у зоні взаємодії лазерного променя з матеріалом заготовки. Нестационарність процесів обробки спричиняє значну динаміку зміни як розмірів, так і форми світлової плями.

Зазначені обставини вкрай ускладнюють задачу виділення інформаційних ознак технологічного процесу за візуальними даними. Хоча більшість фрагментів зображення і несуть в собі інформацію про перебіг процесу обробки, але їх доцільно сприймати як елементи збитковості даних візуалізації в контексті дослідження конкретного фізико-технічного процесу. На відміну від рис. 1а, на зображенні рис. 1б такі прояви мінімізовано. Це зумовлено тим, що при припиненні підведення енергії в зону обробки єдиним джерелом світла стає зона термічного впливу п. 5, оскільки процеси теплопровідності та конвекційних втрат тепла мають значну інерційність, а рівень випромінювання розжареної ділянки, згідно закону Стефана-Больцмана, становить $I \sim T^4$ і є суттєвим за величиною. Недолік такого типу візуалізації полягає у критично низькому рівні інформативності. Так, за зображенням рис. 1б можливо визначити лише наближені параметри процесу, оскільки розміри зони п. 5 становлять 10..50 пікселів.

З аналізу отриманих натурних зображень можливо зробити ряд висновків та сформулювати наступні підходи до візуалізації технологічних процесів:

1. Характер перетворень об'єкту технологічного впливу у процесах фізико-технічної обробки має виразні візуальні прояви, зумовлені високим рівнем потужності потоку енергії, яка подається в область технологічного перетворення.

2. Внаслідок перерозподілу підведеної енергії у оброблюваному матеріалі утворюється теплове поле, причому фізичні рівні прояву теплових ефектів, як правило, є достатніми для формування інформативного сигналу в оптичному діапазоні та поза ним.

3. Високий ступінь локалізації енергії та виражений температурний прояв процесів фізико-технічної обробки надає незаперечні аргументи на користь дослідження температурного поля з метою виявлення ознак для забезпечення контролю якості та організації управління.

4. З метою мінімізації завад, фіксацію візуальних даних доцільно проводити у моменти мінімального прояву всіх збурень, крім температурних (наприклад, у паузах між імпульсами технологічного впливу).

5. Бажано, щоб актуальна для діагностики зона температурного впливу займала не менше п'ятої частини зображення.

6. Слід надавати перевагу багатоканальним візуальним даним, що дозволить ефективніше виділяти інформаційні ознаки та визначати їх параметри завдяки роздільній обробки складових зображення та співставлення отриманих результатів.

Отримання поля температур за даними візуалізації процесу обробки

Сучасні цифрові відеосенсори мають гарні експлуатаційні характеристики і дозволяють отримувати багатоканальне растрове зображення в широкому спектрі випромінювання – від ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного. За необхідності можливо формувати візуальні дані шляхом комбінованого використання декількох сенсорів, що дозволяє значно розширити діапазон спостереження як у бік більш жорсткого ультрафіолету, так і в сторону дальнього інфрачервоного. Проте при виборі як відеосенсорів, так і способу обробки вхідних даних у випадку формування поля температури за даними візуалізації фізико-технічних процесів слід виходити з наступних міркувань.

Як відомо, в цілому енергетичні та спектральні характеристики абсолютно чорного тіла залежать лише від температури і описуються законами Планка, Релея-Джинса, Віна та Стефана-Больцмана. Однак їх пряме застосування для визначення температури супроводжується значною похибкою, зумовленою варіацією коефіцієнта направлено теплового випромінювання (КНТВ – «рівень чорноти») поверхні чи зони розплаву заготовки в межах 0,1..0,9. З цієї причини у випадках, коли відсутні реальні дані про КНТВ, використовують методи спектральної пірометрії [2-5]. Основне обмеження цих методів полягає у зниженні верхньої межі температур до рівня 4000 °С, що обумовлено переходом до області Віна внаслідок необхідності спрощення обчислень. Дане обмеження є прийнятним для випадку перетворення візуальних даних більшості технологічних процесів, в тому числі – процесів фізико-технічної обробки. Незважаючи на те, що температура в зоні дії енергетичного чинника може становити 20 000..50 000 °С, внаслідок високої інтенсивності випромінювання $I \sim T^4$ та високої швидкості адіабатичного розширення утвореної плазми вже за $\approx 10^{-5}$ с температура в зоні обробки спаде до температури розплаву (для сталі – звичайно не більше 1500 °С).

Модель Віна, згідно [4], за відомою інтенсивністю випромінювання на двох ділянках спектру, наприклад, зеленого та червоного каналу з довжиною хвилі λ_g та λ_r відповідно, дозволяє визначити температуру за формулою:

$$T_c = \frac{C_2}{\Lambda \ln((I_g / I_r)(\lambda_g / \lambda_r)^5)}, \quad (1)$$

де Λ – величина еквівалентної довжини хвилі для вимірювання спектральної температури, яка вираховується за формулою $\Lambda = \lambda_g \cdot \lambda_r / (\lambda_g - \lambda_r)$.

Вираз (1) можливо спростити виходячи з того, що значення довжин хвиль λ_g та λ_r можливо знайти за розподілом спектральної чутливості конкретної відеокамери:

$$T_c = \frac{C_3}{\ln(C_4 \cdot I_g / I_r)} \quad (2)$$

Перетворення кольорового растрового зображення видової сцени в поле температур за (2) ускладнене операціями множення, ділення і знаходження логарифма. З метою спрощення обчислень, шляхом варіацій змінних I_r і I_g був створений масив із 25 значень температур, з якого чисельними методами отримана регресійна залежність:

$$T_c = 370 + I'_r + 1,25 \cdot I'_g + 2,8 \cdot I'_b, \quad (3)$$

де I'_r , I'_g , I'_b – значення яскравості за червоним, зеленим та синім каналами відеокамери. Маркер «штрих» вказує, що яскравість не є істинною інтенсивністю випромінювання окремого каналу, а лише її аналогом, оскільки насправді значення I'_x пропорційне фотоструму та є інтегральною величиною в межах спектральної смуги. Необхідність введення параметра I'_b зумовлено накладанням суміжних спектральних пелюсток чутливості відеокамери. Отримана залежність (3) справедлива для таких матеріалів, як конструкційні та леговані сталі, чавун. Незважаючи на певну обмеженість, даний перелік охоплює переважну більшість використовуваних у типових технологіях фізико-технічної обробки матеріалів.

Точність визначення температури для обробки зазначених матеріалів за виразом (3) в діапазоні 600..1500 °С в середньому становить ± 15 °С. Однак такої точності можливо очікувати лише за умови калібрування відеокамери. Дана проблема зумовлена розкидом характеристик камер та неможливістю забезпечення абсолютної стабільності процесу їх виготовлення. Калібрування відеокамери проводять шляхом співставлення температури, отриманої методом спектральної пірометрії, з температурою поверхні, яка визначена еталонним пірометром. Усунення відхилення проводиться шляхом проведення корекції їх оптичних характеристик виконанням гамма-корекції та балансу білого.

Обчислення за виразом (3) дозволяють визначати за сформованим внаслідок теплових процесів зображенням значення температур у довільних точках зони спостереження та отримувати їхні технологічно значимі параметри. На рис. 2 представлено результати обробки модельного кольорового растрового зображення технологічної зони процесу імпульсного зварювання сталі (рис. 2а) при формуванні температурного профілю AB (рис. 2б). Як видно, метод має обмеження щодо визначення температурних показників в області з критично низькими значеннями яскравості I'_r , I'_g та I'_b за відповідними спектральними каналами (околиця точки A), проте у сталі теплові рівні таких ділянок, як правило, не викликають основних або супутніх технологічних перетворень.

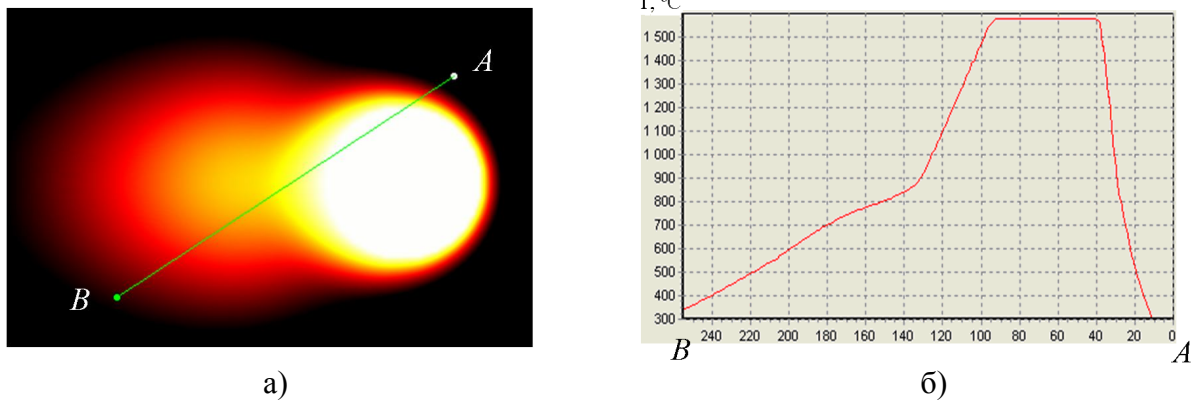


Рис. 2 Визначення температурного профілю за даними спектральної пірометрії

Моделі трансформації зображення видової сцени у множину ознак

Високий рівень спотворень та інформаційна збитковість отриманого сигналу висуває додаткові вимоги до вибору таких математичних моделей трансформації даних візуалізації, які б забезпечували отримання адекватних оцінок об'єкта спостереження за умови допустимого рівня ресурсних затрат на підтримання цього процесу.

Виділення інформаційних ознак, які забезпечують ефективний синтез керуючих та діагностичних рішень, передбачає здійснення ряду перетворень наступного змісту. В загальному випадку вхідні дані відеоспостереження відповідають простору $V \subseteq m \cdot N^2$, де m – розмірність простору, оскільки сучасні відеосенсори дозволяють підтримувати багатоканальний режим, який забезпечує фіксацію спектральних складових видимого (RGB-модель) та/або інфрачервоного (IR) діапазону. У ряді випадків розмірність простору розширюють за рахунок композиції сигналів від сенсорів декількох типів, які охоплюють ультрафіолетовий, рентгенівський діапазони і навіть потік вторинних електронів, однак таке розширення опису вхідного сигналу у контексті пірометрії не актуальне. В подальшому розгляді простір відеоданих буде обмежено видимим діапазоном, що задовольняє потребам управління та діагностування фізико-технічних процесів обробки. Такий підхід дозволяє розглядати простір відеоданих як композицію підпросторів $R \subseteq V$, $G \subseteq V$ і $B \subseteq V$ за спектральними складовими сигналу відеосенсора.

Зниження збитковості відеоданих пропонується виконати шляхом трансформації простору V у простір температур T :

$$f(RGB): V \rightarrow T, \quad (4)$$

де $f(RGB)$ – функція перетворення кольорового растрового зображення в поле температур, в якості якої доцільно використовувати вираз (3), при цьому слід приводити значення температур в цілочисельний вигляд, що дозволить сформулювати простір $T \in N^2$. Розміри простору температур будуть визначатися роздільною здатністю $K \times M$ конкретного відеосенсору, де K – кількість пікселів по вертикалі, а M – по горизонталі.

В загальному випадку простір T містить декілька областей $\{P_z\}$, $z=1..Z$, які можуть трактуватися як інформативні і описуються виділеними за деякими критеріями Q_z множинами точок температурного растру $t \in T | Q_z$. При цьому окремі області P_g і P_h , $\{g, h\} \in z$, можуть бути як незалежними ($P_g \cap P_h = \emptyset$), так і вкладеними ($P_g \subseteq P_h$).

Такі області, в свою чергу, мають трансформуватися у множину ознак O_z , на основі яких формуються діагностичні чи управляючі рішення. Задача розділення окремих областей з множини $\{P_z\}$, яка може бути актуальною для випадку значної часової та просторової нерівномірності підводу енергії в зону обробки або значної анізотропії теплофізичних властивостей матеріалу, в межах даної статті не розглядається.

Розглянемо випадок наявності в області формування видової сцени лише однієї області ознак технологічного процесу P . Нехай ця інформативна область характеризується межами за її крайніми точками по вертикалі: $n = \min(y)$ і $m = \max(y)$, – та по горизонталі: $k = \min(x)$ і $l = \max(x)$, які відповідають лініям растру по координатам X та Y .

Всю множину P слід сприймати як ізотропну, оскільки виділення області з простору T здійснювалось за прийнятим критерієм Q , який не передбачає диференціацію її елементів. У технологічних задачах для проведення діагностики та синтезу управляючих рішень часто більш цінними є не окремі елементи множини P , а її геометрична форма та параметри положення, які можуть бути визначеними за множиною точок обмежуючого контуру $D = \{d_f\}$ цієї області. Перелічені характеристики у даному випадку будуть складати множину візуальних ознак технологічного процесу O . Операція виділення контуру D має вигляд трансформації $D = FrP = \bar{P} \setminus \text{int } P$. Дана операція являє собою третій рівень зниження збитковості початкових відеоданих V .

Подальше зниження збитковості можливо досягнути шляхом параметризації множини D за ознаками форми та положення за наближеними моделями: прямокутна, кругла, еліпсоїдна, краплеподібна область і т.п. Обчислення зазначених параметрів проводиться шляхом статистичної обробки множини D з подальшою класифікацією за ознакою найбільшої подібності з урахуванням того, що положення кожної точки контуру визначається координатами $d_f = (x_f, y_f)$.

Доцільно на початковому етапі параметризації визначити координати центра ваги $C=(X_c, Y_c)$ області P за точками контуру D , використавши для цього значення статичного моменту інерції.

Визначення статичного моменту інерції варто проводити роздільно по осям:

$$X_c = \frac{1}{S} \cdot \sum_{j=n}^m (x_j^- - x_j^+) \cdot (x_j^+ + (x_j^- - x_j^+)/2),$$

$$Y_c = \frac{1}{S} \cdot \sum_{j=n}^m (x_j^- - x_j^+) \cdot y_j$$
(5)

де S – нормована площа, яка обчислюється за формулою $S = \sum_{j=n}^m (x_j^- - x_j^+)$, x_j^+ та x_j^- – координати точок входження у область та виходу із неї, які виділяються за усередненими температурами базису за критеріями швидкості зміни температури $\frac{\partial T}{\partial x} > \Delta T_{out}$ і $\frac{\partial T}{\partial x} < \Delta T_{in}$ відповідно.

Параметр приведенного радіусу R області P знаходиться за значенням площі температурної області:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$
(6)

Даний параметр є зручним для опису динаміки процесу фізико-технічних перетворень та оцінки кількості підведеної в зону обробки енергії.

Використання еліпсоподібних моделей і, як їхнього розширення – краплеподібних моделей, – є доцільним для встановлення характеристик розвитку процесу технологічних перетворень, у яких відбувається переміщення точки підведення енергетичного впливу відносно оброблюваного матеріалу. Алгоритм побудови та аналізу моделей такого типу має наступний вигляд. За множиною точок обмежуючого контуру $D = \{d_f\}$ виділеної області P встановлюються базові точки еліпсу, за якими визначаються елементи еліпсу та виконується його побудова.

Виділення уявної осі симетрії зручно проводити за зміною радіус-вектора ρ , що потребує переходу з декартової в полярну систему координат. Аналогом такого переходу є розгортка контуру, на якій кожній точці d_f ставиться у відповідність значення ρ_f :

$$\rho_f = \sqrt{(x_f - X_c)^2 + (y_f - Y_c)^2} \quad (7)$$

За даними розгортки знаходяться глобальний максимум A_0 із множини радіус-векторів. Дана операція здійснюється шляхом аналізу локальних максимумів розгортки A_w , які знаходяться за різницевою схемою:

$$A_0 = \text{Arg max}(A_w), \quad (8)$$

$$\text{де } A_w = \rho_f, \text{ якщо } \begin{cases} \rho_f - \rho_{f-1} > 0 \\ \rho_{f+1} - \rho_f < 0 \end{cases}.$$

Знайдені положення центра мас та точки глобального максимуму контуру визначають лінію осевої симетрії області P .

Зазначимо, що при наявності більше ніж однієї точки глобального максимуму контуру (наприклад, для випадку форми контуру зони температурного впливу у вигляді кола, що спостерігається при підведення енергії до заготовки без здійснення її переміщення відносно джерела енергії) використання моделі типу еліпс втрачає сенс.

Для визначення точки перетину A_1 уявної осі симетрії з протилежної сторони по відношенні до положення точки глобального максимуму необхідно здійснити перебір усіх точок контуру D за виключенням точок околу A_0 за критерієм найменшої відстані до прямої (A_0, C) .

Прив'язка уявної осі симетрії (A_0, A_1) дозволяє розбити область P на підмножини P_a і P_b , причому $P_a \cap P_b = \emptyset$. Послідовно визначаючи довжини горизонтальних відрізків кожної із областей P_a і P_b , можливо отримати значення оцінки площі областей S_a і S_b . Цінність цих оцінок полягає в тому, що при первинному аналізі даних візуалізації значення $\varepsilon = S_a / S_b$ може характеризувати рівень симетрії області P .

Отже, приведена послідовність трансформації зображення видової сцени дозволяє отримати достатньо широку множину візуальних ознак технологічного процесу, серед яких ознаки форми, статистичні, точкові, контурні, сегментаційні та остовні ознаки.

Інтерпретація результатів обробки даних растрової пірометрії

Трактування результатів обробки пірометричних даних доцільно провести з прив'язкою до вхідних даних візуалізації, що реалізовано у вигляді проекції зображення видової сцени процесу неперервного зварювання, приведеної на рис. 3. Маркерами круглої форми помічено множину точок контурів, кожний із яких обмежує область певного діапазону температур за критерієм $T_i < T_p < T_{\max}$, де T_p – температура довільної точки з простору T , а T_i – значення температури, обране за критерій селекції. Так, контур п. 1 відображає область точок, температура у яких більша за 550 °С, контур п. 2 – 750 °С, а контур п. 3 – 1000 °С.

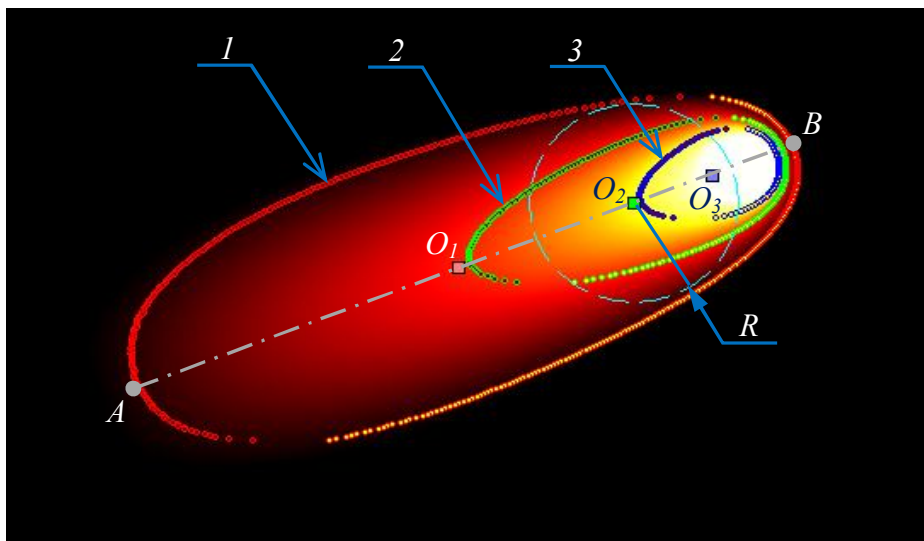


Рис. 3 Результати цифрової обробки даних растрової пірометрії

Форма контуру п. 1 відповідає моделі типу еліпс, для нього виділена велика вісь AB та центр ваги O_1 . Контури п. 2 та п. 3 класифікуються як об'єкти краплеподібної форми. Як видно, центра ваги O_3 області п. 3 не співпадає з центром підводу енергії. Дана обставина засвідчує необхідність обережного підходу при виборі діапазону температур для виділення області та трактуванні отриманих ознак візуалізації.

Рознесення центрів O_1 , O_2 і O_3 , які характеризують положення зон з різними температурними рівнями, можна інтерпретувати як прояв просторової динаміки процесу підводу енергії, за яким, враховуючи час затримки між окремими кадрами, можливо визначити напрям та швидкість переміщення джерела технологічного впливу.

Іншу форму оцінки динаміки процесу обробки надає аналіз співвідношення площ фігур, обмежених виділеними контурами, оскільки вони відображають енергетичні та часові параметри енергетичного впливу. При цьому раціональним кроком є мінімізація опису геометрії використовуваної моделі шляхом переходу від натуралістичних до приведених аналітичних моделей. Прикладом такого підходу є опис краплеподібної області п. 2 з центром ваги O_2 концентричним колом радіусу R . Додатковою перевагою запропонованого методу є можливість діагностування характеру перерозподілу теплової енергії у межах світлової плями за розмірами, формою та взаємним положенням окремих температурних зон.

Висновки

Проведене дослідження засвідчило високий потенціал пірометричних даних як джерела інформативних ознак для організації діагностування та управління фізико-технічними методами обробки. Встановлено, що обмеження температурного діапазону для типових процесів фізико-технічної обробки робить можливим спрощення існуючих моделей спектральних пірометричних вимірювань [2-5] шляхом використання регресійної залежності (3). Запропонований метод забезпечує прийнятну точність вимірювань у діапазоні 600..1500 °С при використанні відеокамер видимого діапазону, що у більшості випадків охоплює мінімальні теплові рівні, які можуть викликати структурні перетворення матеріалу, появу тріщин та інших технологічних дефектів. При наявності візуальних даних ближнього інфрачервоного діапазону випромінювання, нижня межа може бути зміщеною до рівня 250 °С, що дозволяє не обмежувати область застосування запропонованої методики лише високотемпературними процесами.

Раціональним кроком щодо підвищення ефективності та достовірності методів виділення ознак технологічного процесу за його температурними проявами слід вважати фіксацію візуальних даних в паузах між імпульсами технологічного впливу із затримкою, величина якої повинна перевищувати час релаксації всіх збурень, крім температурних, та технологічно допустиму мінімізацію розмірів зони спостереження. Важливим є також забезпечення багатоканальності візуальних даних, що підвищує ефективність виділення інформаційних ознак та визначення їх параметрів завдяки роздільній обробці складових зображення та співставлення отриманих результатів.

В цілому проведенне дослідження підтвердило можливість за даними растрової пірометрії виділяти широкий набір інформаційних ознак, які дозволять встановити статичні та динамічні параметри перебігу технологічного процесу. Запропоновані заходи зі зменшення інформаційної збитковості та спрощення моделей візуалізації забезпечують зниження обчислювальної складності та мінімізацію ресурсних витрат при виділенні візуальних ознак, що створює хороші передумови для їхньої комп'ютерної підтримки на базі вбудованих систем реального часу. Отримані переваги актуальні для управління і діагностики таких високодинамічних фізико-технічних процесів, як лазерна, плазмова, газо-плазмова обробка, електронно-променево та електрозварювання.

Література

7. Computer vision [Електронний документ] / [Edited by Xiong Zhihui]. – Rijeka, Croatia: In-teh, 2008. – 538 p. – Режим доступу: www.intechweb.org
8. Магунов А. Н. Измерение температуры объектов с неизвестной излучательной способностью методом спектральной пирометрии / А. Магунов // Научное приборостроение. – 2010. – Т. 20, № 3. – С. 22 – 26.
9. Сеньков А. Г. Трехспектральная пирометрия металлов на основе современных трехцветных многоэлементных фотоприемников / А. Г. Сеньков, В. А. Фираго // Вестник БГУ. – Сер. 1. – 2007. – № 1. – С. 54 – 61.
10. Моделирование двухцветного пирометра со световодным трактом для металлургических печей / [Е. И. Марукович, Л. Ф. Жуков, Ю. Н. Кочкин и др.]. // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (56). – С. 48-58.
11. Тымкул В. М. Математическая модель работы пирометра двойного отношения [Електронний документ] / В. М. Тымкул, Ю. А. Фесько // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2007. – Т. 4, № 2. – Режим доступу: <http://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-raboty-pirometra-dvoynogo-otnosheniya>

Стаття надійшла 17 . 10 . 2014
 Прийнято до друку 07 . 11 . 2014

Аннотация

А. В. Ярмилко

Получение и интерпретация пирометрических данных в задачах диагностики и управления технологическими процессами.

Рассмотрены особенности диагностики и управления высокотемпературными технологическими процессами по данным визуализации. Дано обоснование целесообразности преобразования цветного растрового изображения производственной видовой сцены в поле пирометрических данных. Предложена усовершенствованная математическая модель определения температурного растра для практических применений. Определены диагностические критерии и способы интерпретации пирометрических данных в задачах управления технологическими процессами со значительными локальными тепловыми нагрузками.

Ключевые слова: *техническое зрение, растровое изображение, спектральная пирометрия, экспресс-диагностика, принятие решений, технологический процесс, процессы физико-технической обработки.*

Summary

A. V. Yarmilko

Obtaining and interpretation of the pyrometric data for the problem of diagnostics and controlling of the technological processes

In the article features of the imaging-based diagnosis and controlling of the high-temperature processes are considered. The expediency of converting the color bitmap images of the production scenes to the form of the pyrometric data field was substantiated. The improved mathematical model of the thermal raster field definition for practical applications was proposed. The diagnostic criteria and methods of pyrometric data interpretation for the tasks of controlling the processes with significant local thermal loads have been established.

Key words: *technical vision, bitmap image, spectral pyrometry, rapid diagnosis, decision making process, engineering process, processes of physics-technical treatment.*