

technological parameters from the normal regime, which can lead to overheating of slabs and their damage, as well as to gas overconsumption, and can be configured to diagnose underheating of metal.

The system is expected to be used as part of an integrated automated control system for a thick sheet rolling mill. The output signal of the system can be used in the automatic control system of the metal heating process in the methodical furnace.

Keywords: *integrated control system, thick sheet rolling mill, methodical furnace, heating mode, control and diagnostic system, artificial neural network, computer modeling.*

Стаття надійшла 15.03.2024 р.

УДК 621.791.92

doi.org/10.31498/2522-9990272024303136

Щербаков С. В., Черевко О. О.

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ СЕКЦІЙ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ МБЛЗ

Вирішення проблем із якістю слябів, виготовлених в умовах МБЛЗ, пов'язане з налагодженням і оптимізацією роботи системи автоматичного охолодження в секціях ЗВО та коригуванням роботи технологічного обладнання. Розрахунок оптимальних витрат води на секції зон вторинного охолодження є важливим завданням, що вирішується впровадженням комплексних підходів – від експериментальних досліджень до математичного моделювання із застосуванням сучасних програмно-технічних засобів аналізу.

В роботі розглянуто особливості розподілу щільності зрошення поверхні заготовки в зоні вторинного охолодження МБЛЗ. Сформульовано критерії оптимальної роботи обладнання зони вторинного охолодження, що впливають на якість готової продукції та ефективність технологічного процесу. Зроблено аналітичне дослідження потенційних можливостей використання математичного моделювання процесу охолодження заготовок в секціях ЗВО. Показано недостатню ефективність використання моделей на базі класичних рівнянь теплопровідності в зв'язку з певними труднощами та обмеженнями, обумовленими наявністю різних типів теплообміну між поверхнею заготовки, форсунками, зовнішнім середовищем, а також в зв'язку з неможливістю коректного врахування в моделюванні конструктивних особливостей обладнання, його технічного стану, поточних умов технологічного процесу.

Наведено альтернативні методики швидкої експериментальної оцінки роботи форсунок секцій вторинного охолодження, особливістю яких є можливість прямого отримання даних від об'єкту дослідження для подальшої обробки. Проведено аналіз ефективності методик та особливостей їх практичного застосування. Розроблено експериментальну установку та програмне забезпечення для оцінки стану форсунок та розрахунку статистичних характеристик якості охолодження поверхні заготовки з метою отримання рекомендацій щодо досягнення рівномірності тепловідведення та зменшення ймовірності утворення тріщин.

Ключові слова: *безперервна розливка, секції зони вторинного охолодження МБЛЗ, форсунки, методики експерименту, програмне забезпечення, візуалізація, статистичний аналіз.*

Машинобудування і зварювальне виробництво

Постановка проблеми. Охолодження форсунками на даний момент є єдиною контрольованою складовою процесу розливання сталі, що визначає максимальну продуктивність роботи МБЛЗ та оптимальну якість виробленої продукції.

Також слід враховувати, що при охолодженні високотемпературних поверхонь з використанням форсунок, виявляються суттєві залежності інтенсивності теплообміну від наступних факторів: типів форсунок та їх геометричних характеристик (наприклад, розгин вихідного отвору та конструкція, що формують відповідний факел), режимів охолодження (тиск води та повітря на вході в форсунку, висота встановлення над поверхнею тощо).

Всі ці фактори суттєво ускладнюють аналіз даних та їх узагальнення. В зоні вторинного охолодження якість та інтенсивність відведення тепла від сталеві заготовки безпосередньо залежать від характеристик форсунокового охолодження, взаємного розташування форсунок та інших конструктивних та технологічних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з головних проблем зони вторинного охолодження є нерівномірність відводу тепла з поверхні заготовки в секціях ЗВО в зв'язку з особливостями роботи форсунок. Істотний вплив на якість процесу охолодження мають технічні характеристики форсунок, їх взаємне розташування, відстань до поверхні заготовки, поточні витрати води [1]. Також відрізняються фізичні параметри відведення тепла, що обумовлюються конструктивними особливостями секцій. У зв'язку з цим можна виділити зону зрошення водою, зону контактного охолодження, зону конвекції та випромінювання.

На сьогодні проблемою є неможливість повного експериментального дослідження теплового стану заготовки та інтенсивності її охолодження. Тому в дослідженнях використовують методи математичного моделювання. Найбільш широко в даний час застосовуються математичні моделі, засновані на двовимірному рівнянні теплопровідності, в якому особливості переносу тепла в двофазній зоні враховані за допомогою ефективних величин теплоємності та теплопровідності [2]. Але розробка та використання подібних моделей обмежуються складнощами аналітичного опису роботи форсунок зони вторинного охолодження, пов'язаними з багатофакторністю фізичних процесів теплопередачі.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка експериментальної методики дослідження процесу охолодження безперервнолитих заготовок у ЗВО МБЛЗ та надання практичних рекомендацій щодо оптимізації роботи форсунок секцій вторинного охолодження.

Основний матеріал дослідження. В результаті аналізу математичних моделей теплового стану безперервнолитих заготовок зроблено висновок, що граничні умови для рівнянь теплопровідності задаються у вигляді фіксованих значень коефіцієнта тепловіддачі для кожної секції вторинного охолодження. Однак, характер теплообміну всередині секції не є однаковим через наявність різних способів тепловіддачі за рахунок безпосереднього зрошення факелом форсунки, контактного охолодження роликками, конвекції, випромінювання. Дані особливості обмежують застосування математичного моделювання у зв'язку з неможливістю повного та коректного аналітичного опису впливу на процес охолодження всіх вищезгаданих факторів.

Тому, з метою спрощення задач з оптимізації роботи обладнання секцій вторинного охолодження доцільно звернутися до експериментальних методів досліджень, що дозволяють отримати результати, які ґрунтуються на реальних характеристиках, отриманих безпосередньо від досліджуваного об'єкта із застосуванням різних методик.

Для оперативного експрес-аналізу (контролю) розподілу щільності рідини і властивостей форсунок серед перспективних методів можна виділити наступні:

- CFD-моделювання;
- механічний патернатор;
- лазерна візуалізація (LSI).

Машинобудування і зварювальне виробництво

CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics modeling) являє собою програмне моделювання потоків [3]. З його допомогою на підставі фізико-хімічних характеристик об'єкта, що досліджується, можна обчислити характеристики поточкових процесів, використовуючи обчислювальні та фізико-математичні методи. Використання цієї методики дозволяє отримати практичні переваги фізичного моделювання з підвищеною точністю. Точність обчислень є однією з основних причин використання цього способу. Але суттєвими недоліками є складність обчислень, тривалий час проведення підготовчих етапів, необхідність чисельного розв'язання рівнянь, істотна вартість устаткування. Це робить цей спосіб недоступним для проєктів з малим бюджетом.

Механічний патернатор (вимірювач розподілу розпилення) є найбільш прямим методом оцінки розподілу рідини, що забезпечується форсункою або системою форсунок (рис. 1). Даний метод корисний для швидкої та точної оцінки зміни розподілу розпиленого матеріалу при використанні різних типів форсунок, при різних відстанях до об'єкта та між форсунками. Робота механічного патернатора полягає в збиранні об'ємного розподілу рідини. Рівномірність розпилення (щільність зрошення) визначається рівнями рідини в накопичувальних ємностях (трубках). Однією з головних переваг механічного патернатора є прямий та точний метод оцінки розподілу об'єму рідини у факелі розпилення форсунки. Відносна простота експлуатації дозволяє швидко отримувати дані. Труднощі в використанні даного методу викликані складністю локалізації середовища, що розпилюється, в вимірювальних ємностях [3].



Рисунок 1 – Механічний патернатор

Лазерна візуалізація LSI (Laser Speckle Imaging) (рис. 2) заснована на вимірюванні інтенсивності світла, розсіяного крапельно-повітряним середовищем при пропусканні лазерного променя через факел форсунки. Інтенсивність розсіяного світла прямо пропорційна площі поверхні розпиленої рідини. Цю площу можна розглядати як узагальнений параметр диспергування. Завдяки LSI можна обробити довільну кількість зображень для подальшого дослідження перехідного процесу розпилення водної суміші. Також на основі декількох зображень розпилення можна виконати моделювання усередненого розпилення водної суміші [3].

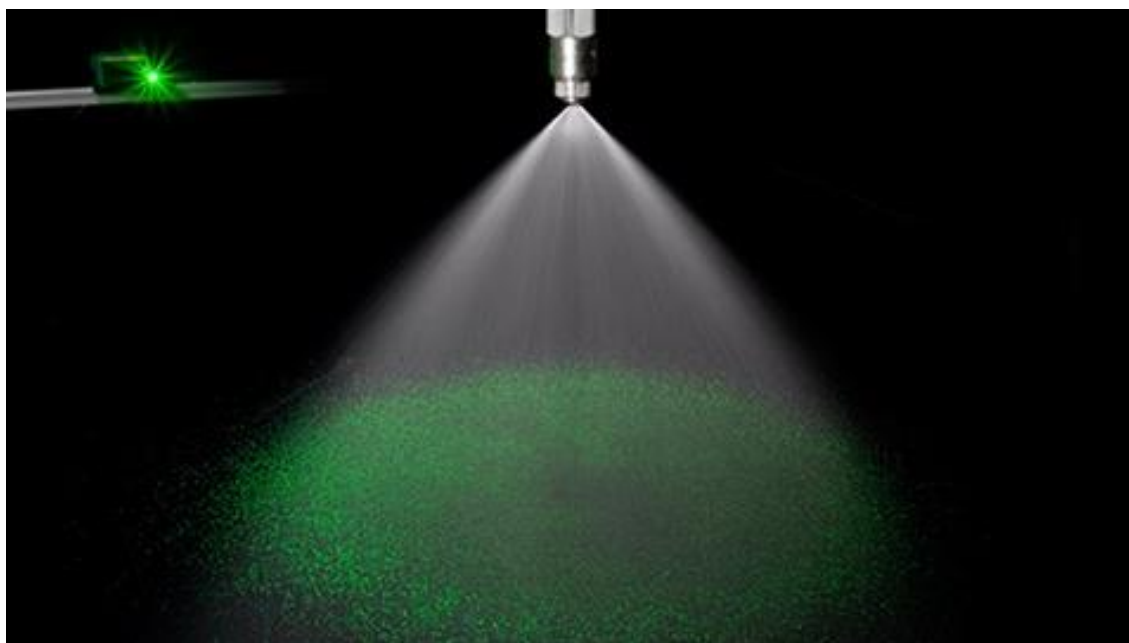


Рисунок 2 – Лазерна візуалізація LSI

Для проведення експерименту були проаналізовані представлені вище методи оперативного експрес-аналізу (контролю) площі розпилення рідини і властивостей форсунок. Врахувавши всі переваги і недоліки даних методів, був обраний оптимальний метод лазерної візуалізації LSI.

Через недоступність спеціалізованого лабораторного обладнання та неможливість його застосування в умовах протікання технологічного процесу запропоновано альтернативну методику проведення експерименту з використанням більш доступних та простіших оптичних пристроїв з не меншим функціоналом.

Основний елемент лазерного приладу – вузько направлений монохроматичний випромінювач з оптичним елементом у вигляді призми або двоопуклих лінз для формування плоского променя з великим кутом розгортки. Подібні прилади (нівеліри) є доволі розповсюдженими та використовуються, зокрема, у машинобудуванні, будівництві тощо.

Для проведення досліджень було спроектовано експериментальну установку [4], що реалізує принцип лазерної візуалізації LSI. Як джерело випромінювання був використаний монохромний лазерний нівелір з ширококутною розгорткою в горизонтальній площині. Аналіз роботи форсунок проводився на моделі, побудованій за принципом геометричної подоби.

Основна задача експерименту – дослідження інтенсивності (щільності) зрошення форсунками площини поверхні металу, що охолоджується. Даний параметр залежить від багатьох раніше встановлених факторів, а також від конструктивних особливостей форсунок, ступеня їх експлуатаційного зносу, кута повороту, схеми взаємного розташування відносно один одного, відстані до поверхні, що охолоджується.

Суть експерименту полягає в реалізації двох етапів. На першому етапі проводиться високоточна фото- відеозйомка факела форсунки при освітленні монохроматичним джерелом лазерного випромінювання для отримання зображення просторового розподілу часток середовища в плоскому перетині (рис 3, а). Ця зйомка проводиться в лабораторних умовах на експериментальній установці, що імітує роботу форсунок секції ЗВО.

Машинобудування і зварювальне виробництво

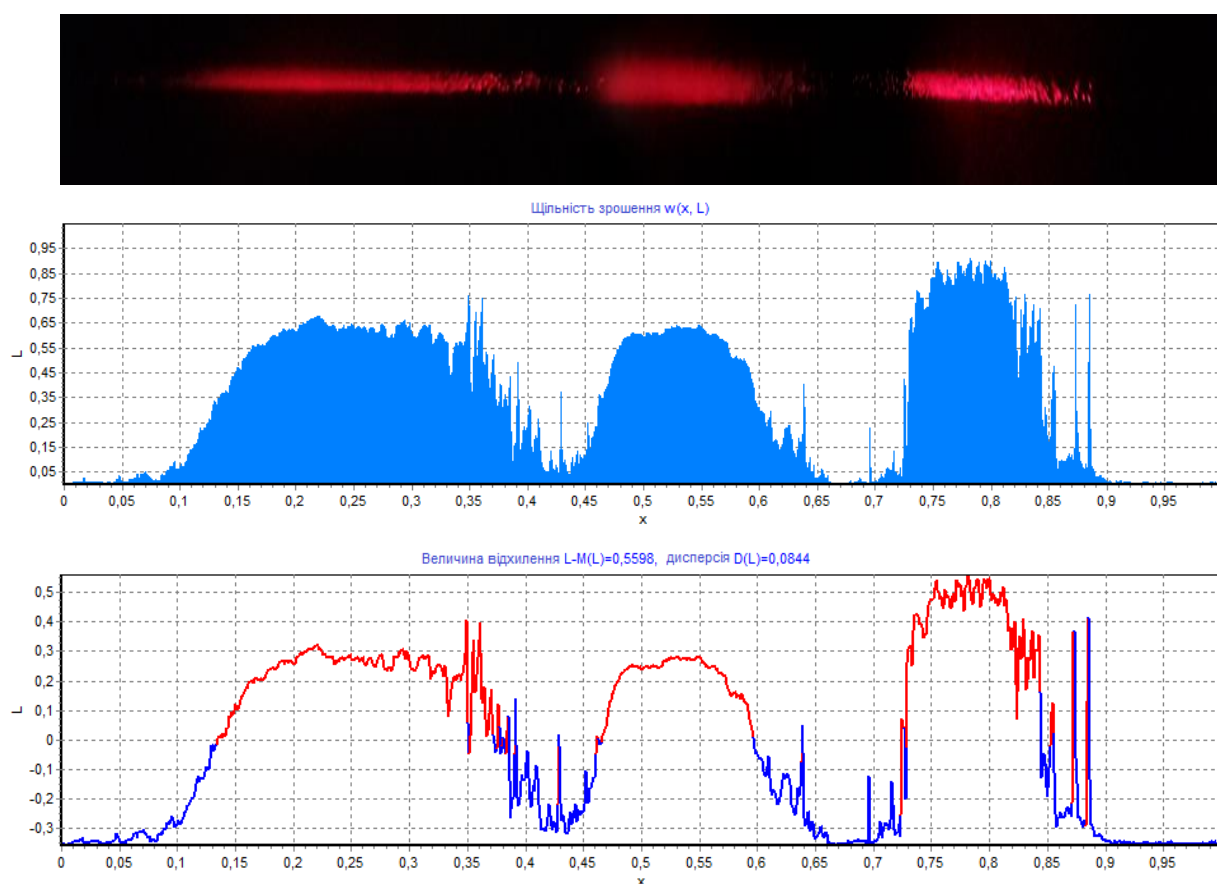


Рисунок 3 – Результати візуального та статистичного аналізу щільності зрошення

Другий етап експерименту полягає в програмному аналізі отриманих зображень для побудови графіків щільності розподілу часток у факелі з наступною статистичною обробкою (рис. 3, б). З цією метою розроблено спеціалізоване програмне забезпечення. В основі алгоритму послідовне зчитування кольору пікселів зображення у вибраному перетині з подальшим перетворенням кольору на сигнал яскравості та його масштабуванням. На основі отриманого масиву даних, що містить значення яскравості пікселів, виконується побудова графіка залежності $L=f(x)$, де L – яскравість пікселів в діапазоні $[0 - 1]$; x – відносна ширина факелу розпилу, пкс. Ця залежність прямо пропорційна величині локальної щільності зрошення $w=f(x, y)$.

Можливості програмного забезпечення дозволяють виконувати багаторазовий аналіз растрових зображень у заданому форматі зі збереженням отриманих результатів. На рис. 3, б представлені результати експериментального дослідження одночасної роботи трьох форсунок з різними експлуатаційними характеристиками (налаштуваннями). Після програмної обробки зображення на підставі аналізу яскравості пікселів отримано графіки $L=f(x)$, величини відхилення $\Delta=L-M(L)$ і дисперсії $D(L)$, що дозволяють зробити відносну оцінку величини щільності зрошення $w(x, y)$, а також розрахувати її точне значення з урахуванням коефіцієнта пропорційності $w=f(\kappa, L)$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Після статистичної обробки на графіку відхилення та дисперсії зображено зони з підвищеною та недостатньою щільністю зрошення. Варіюючи даними параметрами, можна досягти оптимальних характеристик тепловідведення шляхом зниження величини дисперсії, зменшення градієнта та вирівнювання температурного поля при охолодженні поверхні металу.

ВИСНОВКИ

Враховуючи складності аналітичного опису роботи форсунок зони вторинного охолодження, що пов'язані з багатофакторністю фізичних процесів теплопередачі, розроблена методика отримання та програмного аналізу експериментальних даних суттєво спрощує процес оптимізації роботи технологічного обладнання секцій ЗВО. Можливість візуалізації роботи форсунок дає змогу оцінити ефективність охолодження поверхні заготовки як наочно, так і за допомогою статистичних оцінок.

Так як на рівномірність охолодження поверхні заготовки прямий вплив має схема розміщення форсунок у секціях ЗВО, за допомогою запропонованих алгоритмів на підставі величини дисперсії температури, фізичних властивостей сталі та витрат води по контурах охолодження можна отримати рекомендації щодо вибору схеми розміщення роликів і форсунок у кожній секції зони вторинного охолодження. Таким чином, зменшуючи дисперсію температури в результаті оптимізації, за допомогою запропонованої моделі розрахунків можна досягти максимального дотримання вимог до технологічного процесу охолодження безперервних заготовок в умовах МБЛЗ.

Список використаних джерел

1. Федосов А. В. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слябовой заготовки МНЛЗ в зоне вторичного охлаждения / А. В. Федосов, Е. А. Казачков // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – С. 44–49.
2. Тутарова В. Д. Выбор рациональной схемы расстановки форсунок в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / В. Д. Тутарова, Д. С. Сафонов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2013. – №1. – С. 76–81.
3. Инструменты и оборудование [Электронный ресурс] / Spraying Systems Co. – 2022. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.spray.com/>
4. Щербаков С.В. Оптимізація роботи технологічного обладнання секцій вторинного охолодження МБЛЗ / С.В. Щербаков, О.О. Черевко // Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології: тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції. (Маріуполь/Дніпро, 20 березня 2023 р.) / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь/Дніпро, 2023. – С. 23-25.

S. Shcherbakov, O. Cherevko

OPTIMIZATION OF OPERATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF SECONDARY COOLING SECTIONS OF CCM

Solving problems with the quality of slabs produced in continuous casting machines is associated with debugging and optimizing the operation of the automatic cooling system in the sections of the cooling zone and adjusting the operation of process equipment. Calculation of optimal water flow rates for sections of secondary cooling zones is an important task, which is solved by introducing integrated approaches - from experimental studies to mathematical modeling using modern software and hardware analysis tools.

The paper examines the features of the distribution of irrigation density of the workpiece surface in the secondary cooling zone of the continuous caster. Criteria for the optimal operation of equipment in the secondary cooling zone are formulated, affecting the quality of the finished product and the efficiency of the technological process. An analytical study of the potential possibilities of using mathematical modeling of the cooling process of workpieces in air cooler sections was carried out. The insufficient efficiency of using models based on classical heat conduction equations is shown due to certain difficulties and limitations caused by the presence of various types of heat exchange between the surface of the workpiece, nozzles, and the external environment, as well as due to the impossibility of correctly taking into account in the modeling the design features of the equipment, its technical condition, current process conditions.

Alternative methods for rapid experimental evaluation of the operation of nozzles in secondary cooling sections are presented, a feature of which is the possibility of directly obtaining data from the object of study for further processing. An analysis of the effectiveness of the methods and features of their practical application was carried out. An experimental setup and software have been developed to assess the condition of the nozzles and calculate statistical characteristics of the quality of cooling of the workpiece surface in order to obtain recommendations for achieving uniform heat removal and reducing the likelihood of cracking.

Keywords: *continuous casting, sections of the secondary cooling zone of a continuous caster, nozzles, experimental techniques, software, visualization, statistical analysis.*

Стаття надійшла 15.03.2024 р.

УДК 621.873.11

doi.org/10.31498/2522-9990272024303146

Лаврик В.П., Шишкін В.В., Суглобов В.В.

МОНТАЖ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВАКУУМНО-ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ

Запропоновано вантажозахоплювальний пристрій вакуумного типу який може бути застосовано у кранобудуванні, а саме, при виготовленні коробчастих конструкцій головних балок мостових кранів.

Вакуумно-захватний пристрій для монтажу головних балок мостових кранів включає маніпулятор з робочим органом у вигляді жорсткої траверси, вакуумні присоски, встановлені в отворах траверси з можливістю переміщення вздовж траверси, і джерело вакуумування, сполучене з порожнинами присосок. Траверса додатково забезпечена упорами, які встановлені в проміжках між присосками, в подовжніх отворах траверси, з можливістю переміщення вздовж отворів. Крім того, висота упорів відносно поверхні траверси дорівнює висоті присосок в їх робочому стані, тобто в стані їх максимального вакуумування.

Застосування пропонованого пристрою дозволить забезпечити в процесі виготовлення головної балки крана одночасне здійснення операцій встановлення листів у монтажне положення, виправлення листів і їх притискання до базових елементів конструкції, що суттєво скорочує час приєднання листів і робить виготовлення металоконструкції менш тривалим, більш зручним, простим і надійним.

Ключові слова: *головні балки кранів, монтаж балок, вакуумний пристрій.*

Постановка проблеми. При виготовленні коробчастих конструкцій головних балок мостових кранів доцільним може бути використання вантажозахоплювальних пристроїв вакуумного типу. Застосування таких пристроїв дозволяє забезпечити в процесі виготовлення