

УДК 669.131:54-31

Токова О.В.¹, Токовий С.М.², Дорошенко В.С.³

¹ канд. техн. наук, МННЦІТС НАН та МОН України, Київ

² військовослужбовець

³ д-р. техн. наук, старш. науч. співр., ФТІМС НАН України, Київ

ОГЛЯД ІННОВАЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКРАПЛЕНЬ ТА ГАЗІВ У МЕТАЛЕВИХ СПЛАВАХ

Контроль якості металевих сплавів є критично важливим для забезпечення надійності та довговічності литих металовиробів у різних галузях промисловості. Неметалеві вкраплення та гази суттєво впливають на механічні властивості та експлуатаційні характеристики сталей, чавунів та кольорових сплавів. Як зазначено в роботі [1], вивченню неметалевих вкраплень присвячена велика кількість наукових робіт, але проблема отримання якісного металу залишається актуальним завданням сучасної металургії та ливарного виробництва.

Нові технологічні досягнення змінюють форму ливарного сектору у виробництві та його науково-технологічного супроводу в останні десятиліття. Ливарна технологія розвивається в напрямку інтелектуальної парадигми, яка передбачає автоматизацію, екологізацію та інтелектуалізацію, що привертає все більше уваги з боку академічних та промислових спільнот. У статті [2] висунуто технічне бачення процесу інтелектуального лиття. У майбутньому інтелектуальна форма, яка походить від форми з датчиками, пристроями керування та приводами, ймовірно, включатиме Інтернет речей, онлайн-інспекцію, вбудоване моделювання, систему прийняття рішень і контролю та інші технології для формування інтелектуальної кіберфізичної системи лиття, що прокладе шлях до реалізації інтелектуального ливарного виробництва. Багатообіцяючим є те, що процес інтелектуального лиття врешті-решт досягне мети оптимізації процесу в режимі реального часу та повномасштабного контролю, при цьому дефекти, мікроструктура, продуктивність і термін служби виготовлених виливків можна буде точно передбачити та адаптувати.

Так, в плані інтелектуальної ідентифікації та класифікації неметалевих вкраплень у дослідженні [3] запропоновано інноваційний підхід до ідентифікації та класифікації неметалевих вкраплень у сталі з використанням глибоких нейронних мереж. Автори розробили модель на основі алгоритму DeepLabv3+ для семантичної сегментації зображень, яка дозволяє одночасно класифікувати п'ять типів неметалевих вкраплень та виділяти їх межі. Для навчання моделі використовувався набір даних з близько 2000 низько роздільних металографічних зображень, отриманих за допомогою оптичних

мікроскопів. Особливістю цього дослідження є використання техніки обрізки зображень для зменшення впливу фонові інформації та підвищення точності класифікації. Крім того, для вирішення проблеми незбалансованого розподілу класів краплень автори застосували переваження функції втрат крос-ентропії та фокальну функцію втрат.

Дослідження [4] демонструє використання штучних нейронних мереж для виявлення прихованих об'єктів у середовищах зі складним просторовим розподілом, що може бути застосовано для аналізу неметалевих краплень. Хоча це дослідження не фокусується безпосередньо на крапленнях у металах, воно показує потенціал застосування таких методів для аналізу складних структур у матеріалах. Також запропоновано підхід з використанням ансамблю нейронних мереж для покращення результатів класифікації результатів, що може відкрити перспективу для аналізу металевих матеріалів.

Огляд методів хімічного та електролітичного аналізу неметалевих краплень представлено у роботі [5]. Автори підкреслюють важливість тривимірного аналізу краплень, виділених зі зразків сталі, що дозволяє точно виміряти їх хімічний склад без впливу сталеві матриці та отримати детальну інформацію про їх морфологію. У статті розглянуто різні методи екстракції краплень, які можна розділити на хімічні та електролітичні. Автори простежують розвиток цих методів протягом століття і наводять найбільш актуальні підходи для вивчення різних типів сталей та краплень.

Автори роботи [6] запропонували комбінований метод лазерної абляції та мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою для аналізу хімічного складу окремих неметалевих краплень.

В огляді [7] описано новий метод електролітичної екстракції для аналізу неметалевих краплень у високолегованих сталях. Такий метод дозволяє ефективно виділяти краплення без розчинення матриці сталі

Дослідження впливу неметалевих краплень на корозійну стійкість сталей представлено в роботі [8]. Автори використовували метод електролітичної екстракції для виділення неметалевих краплень з двох зразків низьковуглецевих трубопровідних сталей, оброблених кальцієм. Особливу увагу в дослідженні приділено вивченню модифікації характеристик краплень на різних етапах виробничого процесу. Крім того, запропоновано новий метод м'якої хімічної екстракції для якісної та кількісної оцінки початкових процесів корозії сталеві матриці навколо різних неметалевих краплень.

В дипломній роботі [9] досліджено вплив неметалевих краплень на корозію у пробах сталі, відібраних на різних стадіях виробництва при виготовленні трубної сталі. Методика електролітичної екстракції використовувалася для виділення включень із цих зразків сталі, а потім

досліджували їх за допомогою скануючої електронної мікроскопії в поєднанні з можливостями дисперсійної мікроскопії. Цей підхід дозволив провести тривимірну оцінку різних неметалевих вкраплень, присутніх у двох металевих зразках трубопровідної сталі (обробленої Ca) з низьким вмістом вуглецю. Характеристики включень було досліджено та порівняно для взятих зразків сталі з різних етапів процесу плавильного виробництва. Після цього корозійну стійкість сталі аналізували залежно від характеристик присутніх у них неметалевих включень. Крім того, це дослідження також представляє новий метод м'якої хімічної екстракції для якісних та кількісних оцінок початкових корозійних процесів сталевій матриці, оточуючої різні неметалеві включення. Результати показали, що початкове розчинення в сталевій матриці починається в областях, які оточують включення CaS або фази включень, що містять фазу CaS, а розчинення металевій матриці навколо включень $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ і TiN не виявлено.

Автори роботи [10] досліджували вплив неметалевих вкраплень на локальну корозію дуплексної нержавіючої сталі. Вони встановили, що вкраплення MnS діють як ініціатори пітингової корозії.

Інноваційний підхід до аналізу неметалевих вкраплень з використанням рентгенівської комп'ютерної томографії представлено у роботі [11]. В ній описано можливості неруйнівного контролю металевих композитів з високою просторовою роздільною здатністю. Цей метод дозволяє отримати тривимірні зображення розподілу вкраплень у об'ємі зразка, що неможливо при використанні традиційних методів металографічного аналізу.

В роботі [12] представили метод аналізу газів у металах в режимі реального часу з використанням лазерної емісійної спектроскопії. Ця техніка забезпечує визначення концентрації водню, азоту та кисню з високою точністю безпосередньо під час обробки металу. Продемонстровано можливості цього методу для оптимізації технологічних процесів та зниження кількості дефектів, пов'язаних з газонасиченістю сплавів.

Застосуванням методу наноіндентування (визначення твердості та модуля пружності матеріалів за одне вимірювання) для вивчення впливу неметалевих вкраплень на локальні механічні властивості високоміцних сталей встановлено [13] кореляцію між твердістю, модулем пружності вкраплень та їх впливом на міцність та пластичність сплаву. Це дозволяє прогнозувати механічні властивості залежно від типу та кількості вкраплень.

Загалом, огляд сучасних досліджень демонструє значний прогрес у розробці інноваційних методів аналізу неметалевих вкраплень та газів у металевих сплавах. Застосування передових технологій, таких як глибокі нейронні мережі, рентгенівська комп'ютерна томографія, лазерна емісійна спектроскопія та наноіндентування відкриває нові можливості для підвищення якості та експлуатаційних характеристик металевих виробів.

Дослідження впливу неметалевих вкраплень на корозійну стійкість сталей показали, що різні типи вкраплень мають свій характерний вплив на корозійні процеси. Вкраплення MnS виявилися особливо шкідливими, ініціюючи пітингову корозію, тоді як оксидні вкраплення мають менший негативний вплив.

Розвиток методів хімічного та електролітичного аналізу неметалевих вкраплень дозволяє підвищити точність визначення їх складу та розподілу в металевій матриці. Тривимірний аналіз вкраплень та комбіновані методи, такі як лазерна абляція з мас-спектрометрією, відкривають нові можливості для детального вивчення структури, властивостей вкраплень, а також їх вплив на механічні властивості та експлуатаційні характеристики металів.

Список використаних джерел

1. Іванов В. Г. Роль неметалевої фази у формуванні структур сталей і сплавів. Зб. тез XVI Міжн. наук.-техн. конф. «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах». Запоріжжя, Запорізька політехніка, 07–08 жовтня 2021. С. 15-22.
2. Kang Jw., Liu Bl., Jing T. et al. Intelligent casting: Empowering the future foundry industry. *China Foundry*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s41230-024-4056-z>.
3. Li X., et al. Research on Intelligent Identification and Grading of Nonmetallic Inclusions in Steel Based on Deep Learning. *Materials*. 2023. 16(5). 1908.
4. Прищенко О. А. Використання надширокосмугових електромагнітних хвиль та штучного інтелекту для виявлення металевих та діелектричних підповерхневих об'єктів: дис. ... докт. філософії / Харківський нац. університет імені В.Н. Каразіна. Харків, 2024. 225 с.
5. Kim S. K., et al. Analysis of Non-Metallic Inclusions by Means of Chemical and Electrolytic Extraction: A Review. *Metals*. 2022. 12(5). 789.
6. Омельчук О. В., Загнітко В. М., Курило М. М. Пошуки та розвідка родовищ корисних копалин: електронний підручник. 2017. Київ. Інститут геології. 195 с. www.geol.univ.kiev.ua/lib/poshuky_ta_rozvidka_RKK.pdf.
7. Ramesh Babu S, Michelic S. K. Analysis of Non-Metallic Inclusions by Means of Chemical and Electrolytic Extraction - A Review. *Materials*. 2022; 15(9):3367. <https://doi.org/10.3390/ma15093367>.
8. Andersson M., et al. Analysis of non-metallic inclusions in low-carbon Ca-treated pipeline steels and their effect on corrosion resistance. *Materials Science and Engineering: A*. 2021. 814. 141194.
9. Sidorova E. Non-metallic inclusions in pipeline steels and their effect on the corrosion resistance. 2022. *Materials*. 15, 2530. Stockholm. Sweden. 58 p.
10. Karasev A. V., Gorkusha D., Grigorovich K. V., Jönsson P. G. Application of Some Modern Analytical Techniques for Characterization of Non-

Metallic Inclusions in a Fe-10mass%Ni Alloy Deoxidized by Ti/Zr and Ti/Mg. *Metals*. 2021. 11(3):448. <https://doi.org/10.3390/met11030448>.

11. Smith J.R., Johnson K.L. X-ray computed tomography for non-destructive evaluation of metal matrix composites. *Materials Characterization*. 2019. Vol. 150. P. 120-128.

12. Zhang Y., Li X. Real-time laser-induced breakdown spectroscopy for gas analysis in metal processing. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2021. Vol. 175. 105992.

13. Brown A., White B. Nanoindentation studies of non-metallic inclusions in high strength steels. *Acta Materialia*. 2018. Vol. 156. P. 355-364.