

УДК 621.74.01

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-09

Мазур І.А.¹, Волох В.І.¹, Морозов І.В.²¹Український державний університет науки та технологій м. Дніпро²Приватне акціонерне товариство «Камет-Сталь» м. Кам'янське

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШЛАКОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ЗАГОТОВКАХ ПРИ МАШИННО- БЕЗПЕРЕРВНІЙ РОЗЛИВЦІ СТАЛІ

На підприємствах при машинно-безперервній розливці сталі (МБЛЗ) з різних марок сталі виготовляють заготовки з дефектом, попередньо класифікованим як захоплення шлаку. Внаслідок цього було проведено дослідження для визначення основних причин.

Представлені металографічні дослідження дефектів заготовки, які показують, що причиною дефекту є не лише захоплення шлаку, але також холодні краплі та пористість. Для проведення металографічних досліджень застосовувалася різна ступінь травлення, також було виконано аналіз растровим електронним мікроскопом. Виходячи з наявної в літературі інформації та на підставі термодинамічної моделі системи Fe-Si-Mn-O проведено механізм та схему піноутворення та захоплення шлакових включень у кристалізаторі. За результатами металографічного дослідження запропоновано механізм утворення та захоплення холодних крапель та запропоновані рекомендації, щодо зменшення шлакових включень у заготовках.

Ключові слова: розливка сталі, пористість, шлакові включення, заготовка, безперервне лиття.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. До числа основних завдань сучасної металургії відноситься розробка і впровадження нових технологій, спрямованих на досягнення високої чистоти заготовки від неметалевих включень у прокаті, що отримується з безперервнолитих слябів при мінімальних енерго- і ресурсо витратах (рис.1).

Ключовим агрегатом машин безперервного розливання заготовок (МБЛЗ), в якому ще можливе проведення операцій по зниженню забрудненості металу неметалічними включеннями, служить проміжний ківш [1]. Одним із відомих способів рафінування сталі від неметалевих включень є використання секціонованих проміжних ковшів з каналами в розділових перегородках, які також інколи використовуються в поєднанні з продувкою металу інертним газом через каналні фурми [2]. Незважаючи на численні дослідження, присвячені аналізу процесів видалення неметалевих включень, до теперішнього часу остаточно не існує однозначно встановлених оптимальних умов рафінування сталі від неметалевих включень в проміжному ковші МБЛЗ. Внаслідок цього вибір конструктивних параметрів проміжних ковшів і умов продувки інертним газом носить переважно емпіричний характер. Кількісні оцінки зміни розподілу неметалевих включень в ході рафінування сталі вельми нечисленні [3].

У зв'язку з цим дослідження гідродинаміки течій розплаву в ванні проміжного ковша, вибір раціональних конструктивних параметрів перегородок та їх наявність, конструктивних параметрів каналних протяжних фурм, відпрацювання режимів продувки аргонном і кількісна оцінка впливу зазначених процесів на результати рафінування сталі від неметалевих включень має важливе значення.

Постановка проблеми. Протягом тривалого часу на підприємстві виготовляють заготовки перетином 130×130 мм, 150×150 мм., та 160×160 мм. На підприємстві у різних виробничих умовах та на різних марках сталі були розлиті заготовки з дефектом, попередньо класифіковані як шлакові включення (рис.2 та рис.3). Це свідчить, що данні дефекти мають системний характер виникнення.

При безперервній розливці сталі відбуваються періодичне попадання шлакових включень які кристалізуються у металі у різних місцях зливка, але найчастіше біля кутів заготовки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, де розв'язувались завдання цієї проблеми, виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена стаття.

Одним з характерних дефектів у безперервної литої заготовки є центральна пористість яка проявляється у вигляді усадкових порожнин які зливаються у суцільну пору. Утворюються переривчасті продовгуваті порожнини [1-2]. Розвитку усадкових порожнин сприяють наступні

фактори: швидкість розливки, інтенсивність охолодження, температура металу, підвищений рівень коливань та інші фактори. Але в [1-2] не описується виникнення неметалевих включень у кутах заготовки.

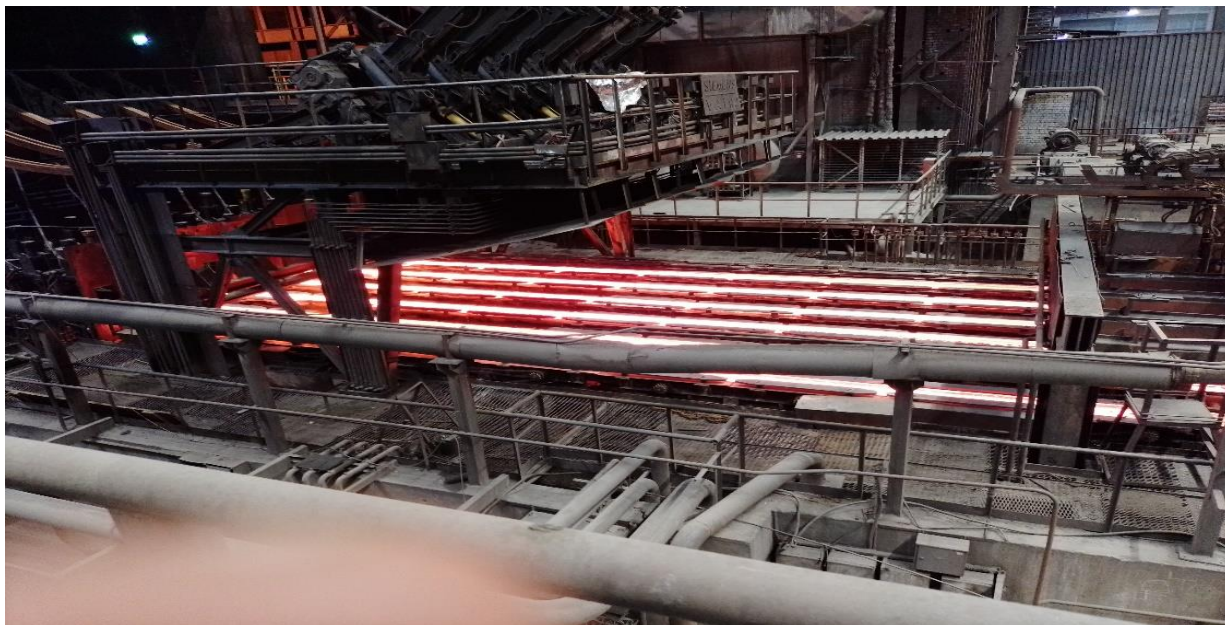


Рисунок 1 – Загальний вид розливки сталеві заготовки на МБЛЗ



Рисунок 2 – Макроструктура заготовки 130x130 мм з дефектом, сталь СтЗсп

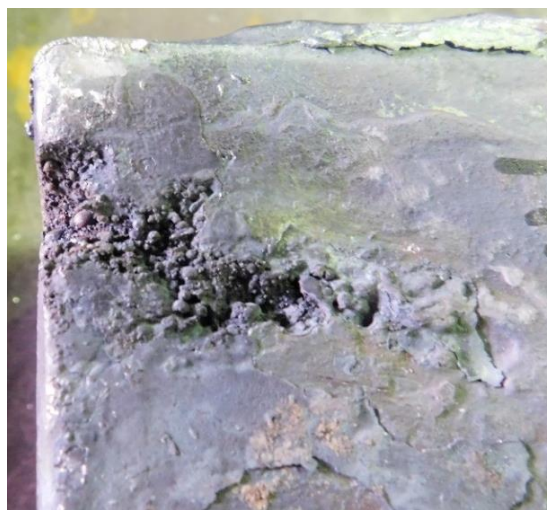


Рисунок 3 – Поверхня заготовки з дефектом сталь СтЗсп

Авторами роботи [3] показано, що описується система підтримки системи вибору режиму вторинного охолодження заготовки та температурно-швидкісного режиму розливки та як формується рідка лунка металу, але в цій роботі не роз'яснено як формуються шлакові включення. У роботі [4] також не сформульовані основи зародження газових пухирців та відсутні металографічні дослідження формування шлакових крапель.

Мета роботи. Метою роботи є визначення характеру та причин виникнення дефекту, основної причини його формування та надання рекомендацій щодо їх мінімізації у заготовці.

Постановка завдання. Оскільки відлита товарна заготовка МБЛЗ має дефекти в вигляді пор, усадкових продовгуватих порожнин, шлакових включень, то ця заготовка відноситься вже як не товарна та їде на переробку створюючи при цьому економічні збитки. Особливо слід зосередити увагу на формуванні процесу шлакових включень при різних режимах розливки та вторинного охолодження й механічного процесу відбору шлаку з кристалізатору, формуванні крапель при дозованій подачі ріпакового мастила у кристалізатор для зменшення та запобігання виникнення шлакових включень.

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.

Проведений аналіз по кількості відбракованих заготовок по шлаковим включенням за 2023р (рис. 4). показав, що при розливанні товарної заготовки шлакові включення є постійно присутні та їх кількість зменшується.

Відсортування з шлаковими включеннями свідчать про стабільну присутність шлаку у заготовках, яка складає у межах до 150 тон за місяць.

Це призводить до додаткових витрат, пов'язаних з переробкою на прокатному стані та з можливим отриманням браку прокатної продукції у вигляді розшарування катанки, вкраплення включень на бокових поверхнях швелеру або кутка та інших видів дефектів.

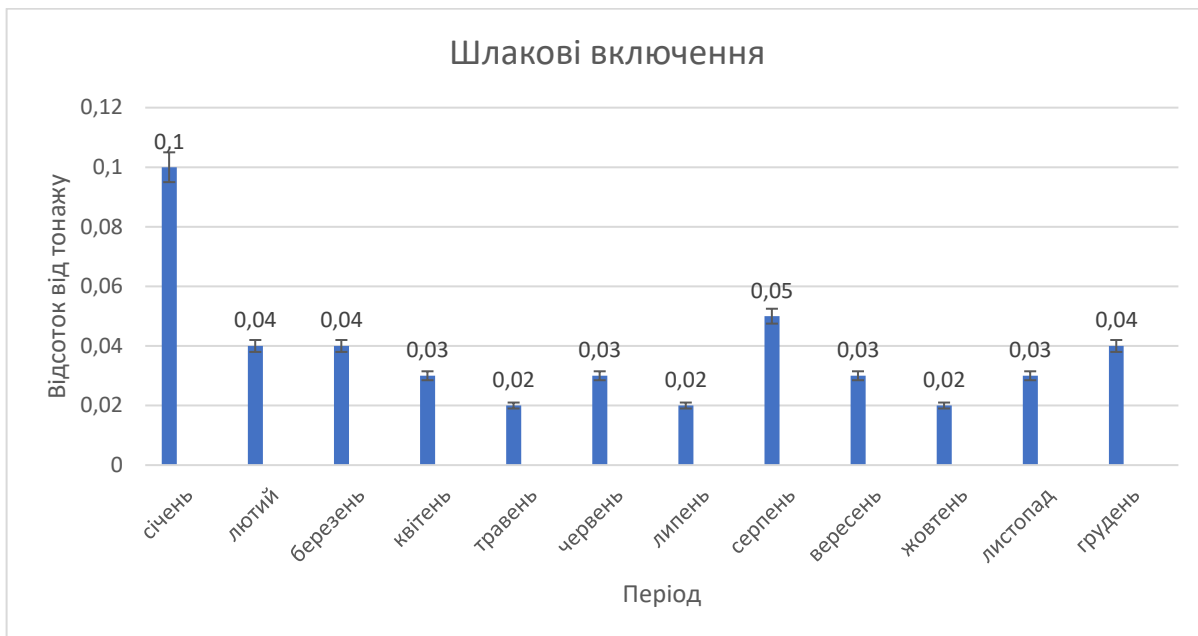


Рисунок 4 – Гістограма шлакових включень у відсотках від кількості тон розливої заготовки в 2023 р.

Аналіз виникнення шлакових включень за 3 роки свідчить, що присутність заготовок з шлаком постійна, незважаючи на те, що їх кількість зменшується (рис. 5). Необхідно налагоджувати пробіли у технологічному процесі та шукати вузькі місця при розливанні сталі.

Присутність шлакових включень у товарній заготовці підвищує рівень вибраковки, що знижує ціноутворення заготовки та комерційну привабливість заготовки.

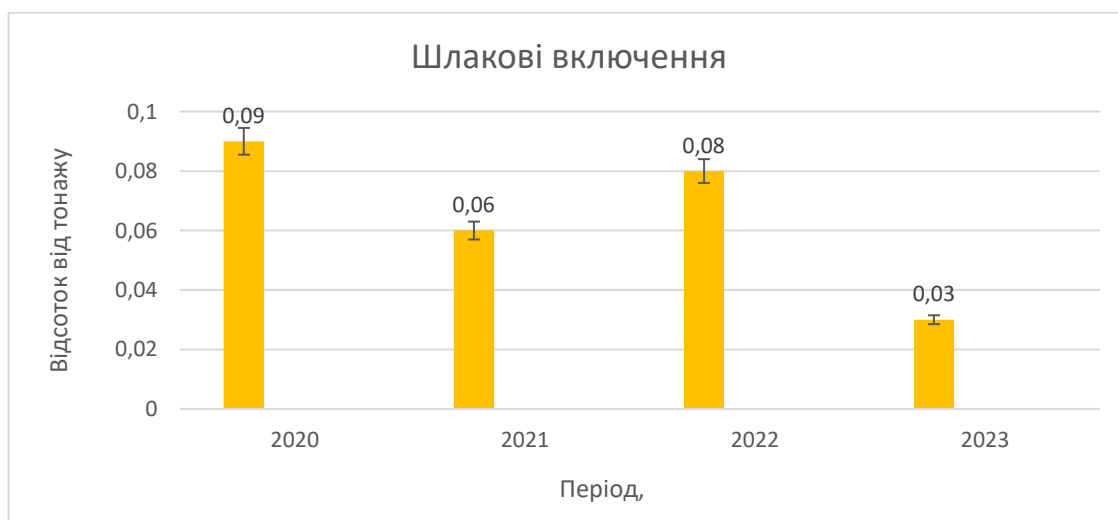


Рисунок 5 – Гістограма шлакових включень у відсотках від кількості тон розливої заготовки протягом з 2020 р. по 2023 р.

Розташування шлакових включень заздалегідь відбувається у кутах безперервнолітої заготовки (БЛЗ) (рис.6). У цій статті представлені металографічні дослідження даних дефектів, розглядаються механізми утворення та захоплення шлаку, а також присутність крапель мастила, яке подається на кристалізатор, та пов'язаної з ними пористості [5].

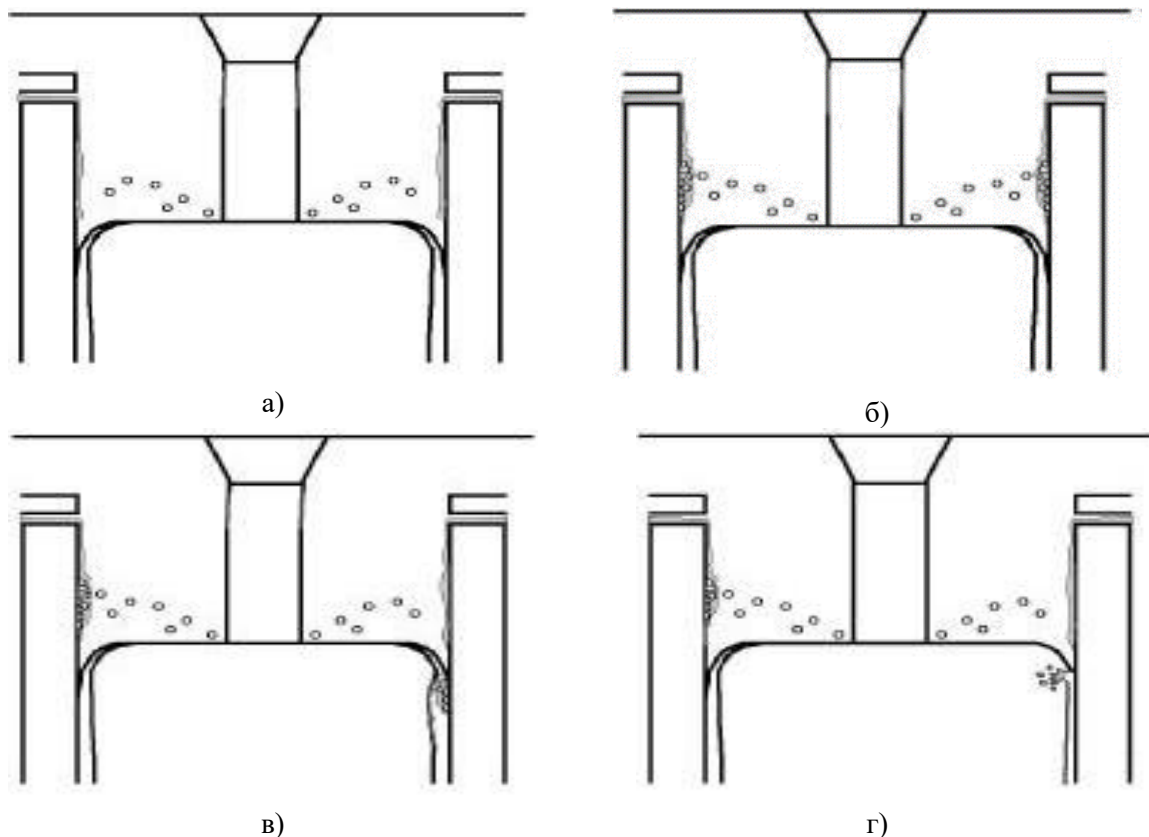


Рисунок 6 – Механізм формування шлакових включень
 а) бризки металу; б) скупчення крапель шлаку в кутах кристалізатору; в) захоплення шлакової корки з стінок кристалізатору; г) виникнення пузирів повітря з перемішуванням мастила

Обговорення результатів досліджень. На дослідження природи поверхневих дефектів надійшли зразки БЛЗ відібрані з двох плавок зі сталі марки СтЗсп. Дані дефекти, виявлені під час огляду БЛЗ, класифікувалися спеціалістами технічного контролю як дефект – шлакові включення. При зовнішньому огляді зразків (див. рис. 7) даний дефект має V-подібну, U-подібну форму, розташовану в кутах БЛЗ і візуально є невиконанням геометрії форми по кутах БЛЗ. Також у порожнині дефекту спостерігаються невеликі металеві вкраплення круглої форми. Наявність неметалевого матеріалу при зовнішньому огляді немає.

При дослідженні макроструктури та при зовнішньому огляді шліфу підготовленого для мікродосліджень (рис.8 та рис. 9) у зоні зазначеного дефекту спостерігаються металеві краплі та пористість. Ця пористість поширюється вглиб на зразку плавки до 3,0 мм, а в іншій плавці до – 7,0 мм.

При мікроструктурному дослідженні на оптичному мікроскопі «Неофот-21» у досліджуваній зоні спостерігаються неметалеві включення. Дані неметалеві включення виявлено в декількох видах: на поверхні БЛЗ, між сталлю та металевими краплями та у вигляді глобулярних макровключень.

Відповідно до досліджень, наведених у роботі [6,7] неметалеві включення, виявлені на поверхні БЛЗ і між сталлю та металевими краплями (рис. 7 і рис. 8) є силікат марганцю або оксид марганцю і заліза товщиною від 0,2 до 0,3 мм. Виявлені глобулярні макровключення (рис. 8) являють собою гомогенні силікати марганцю, силікати марганцю з родонітовими голками та силікати марганцю з кристобалітовими дендритами.

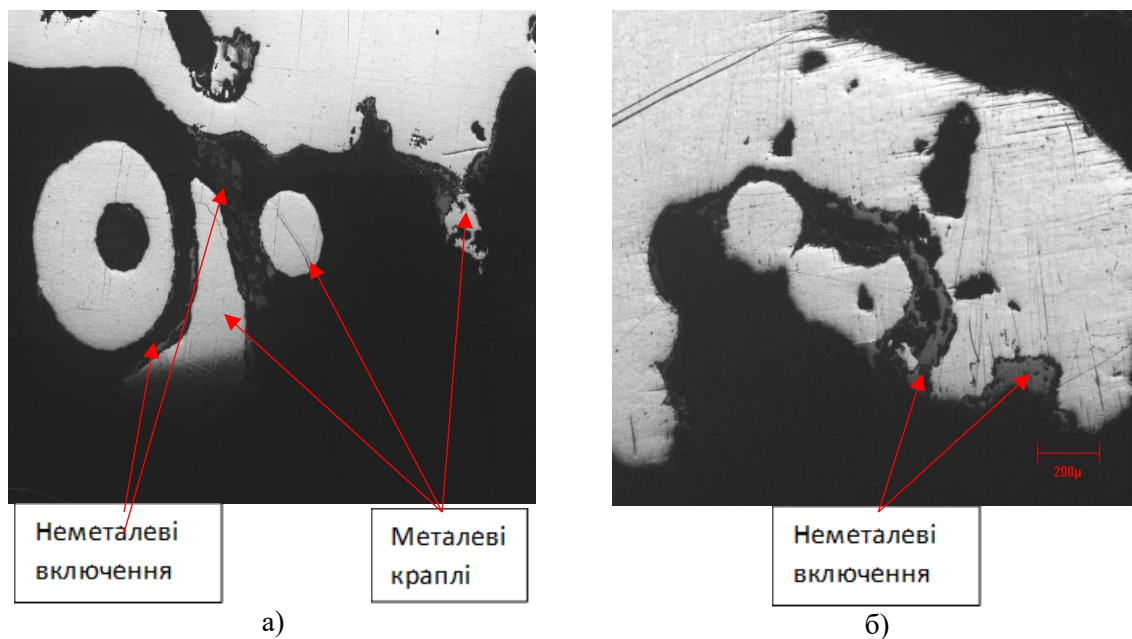
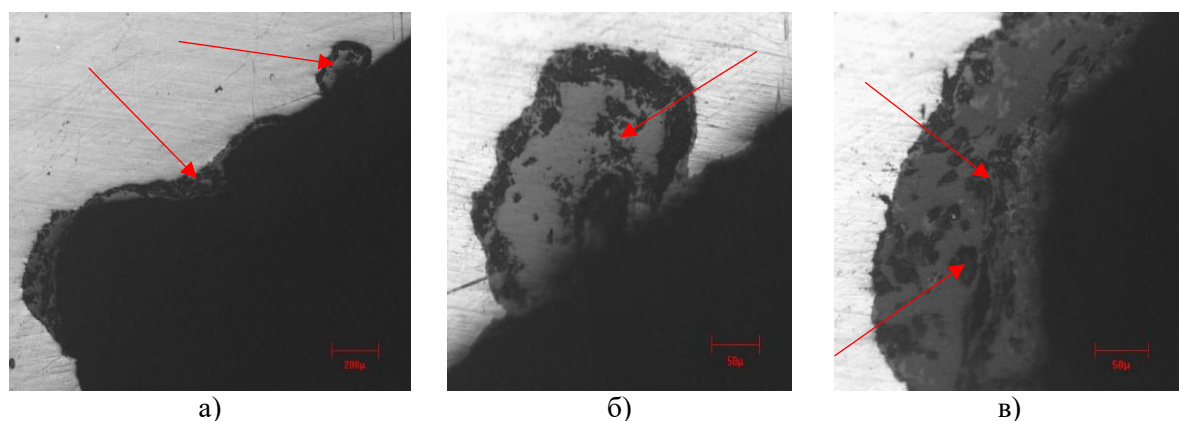


Рисунок 7 – Мікроструктура у зоні неметалевих включень та металевих крапель



шлакові включення по межі заготовлі

збільшена частина шлакового включення

шлакове включення з металевими крапками

Рисунок 8 – Мікроструктура у зоні неметалевих включень зразка БЛЗ, марка сталі 3пс

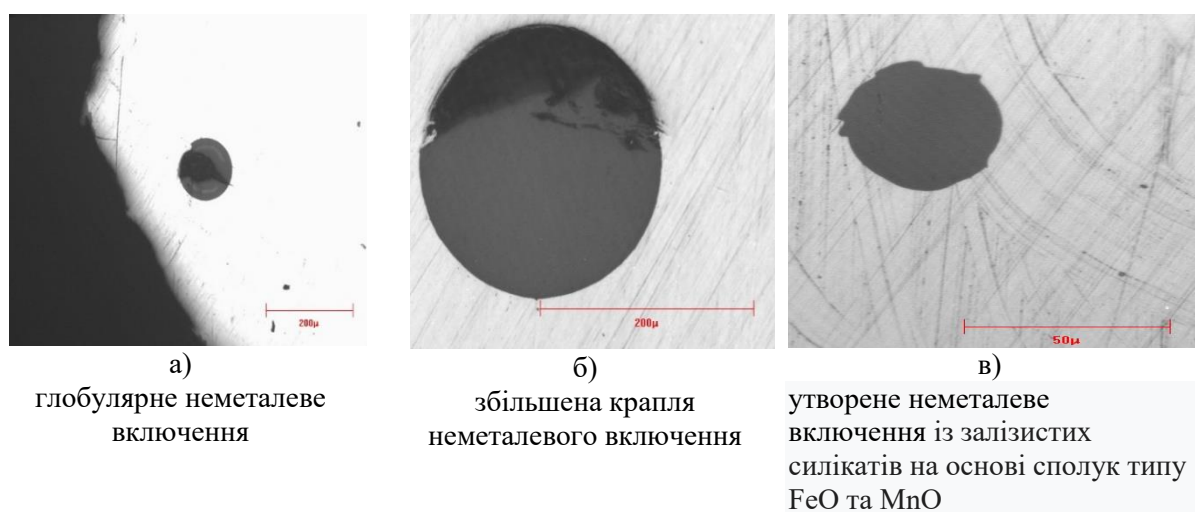


Рисунок 9 – Мікроструктура у зоні глобулярних неметалевих включень

Металографічний аналіз показує, що йдеться не про класичне шлакове включення, а про складний дефект, який включає глибоку пористість, металеві краплі та неметалічний матеріал.

© Мазур І.А., Волох В.І., Морозов І.В.

Механізм утворення металевих крапель наведено на рис.6. Цей механізм може пояснити характеристики дефектів, виявлених у досліджуваних зразках.

Поверхневі дефекти, що спостерігаються в БЛЗ конгломератом різних матеріалів, що представляє собою сукупність шлакових включень, металевих крапель та пористості [7].

Висновки. Поверхневі дефекти, що спостерігаються у БЛЗ є конгломератом різних матеріалів, що представляє собою сукупність шлакових включень, металевих крапель та пористості. Поверхневі дефекти це шлакові включення глибиною до 3 мм, та газові бульбашки глибиною до 4 мм.

На підставі результатів дослідження на металургійному підприємстві було внесено кілька змін до металургійного технологічного процесу роботи МБЛЗ, а саме:

1. Збільшено час попереднього нагріву проміжних ковшів, в результаті знизилася нестійкість потоку сталі та утворення бризг в кристалізаторі.

2. Забезпечено належне центрування внутрішніх склянок по відношенню до кристалізатора.

3. Щоб уникнути закупорки, забезпечено контроль відсоткового співвідношення %Ca/%Al та % Ca/%S, що мінімізує попадання прохолодних крапель.

4. Щоб уникнути присутності вологи в кристалізаторі, виконується попереднє нагрівання мастила.

5. Підвищена термічна стійкість сталі в проміжному ковші, а також для запобігання виникнення шлакових включень видані слідуючи рекомендації:

а) періодично проводити очистку металевою щіткою (або іншим пристроєм верхньої частини мідної стінки гільзи кристалізатору від скупчених металевих частин під час розливки);

б) виключення аномального підвищеного рівня коливань рівня металу у кристалізаторі. Ці коливання можуть бути викликані як проблемами у роботі системи підтримання рівня металу у кристалізаторі так і надмірним боковим зміщенням кристалізатору;

в) потрібно перевіряти механізм коливання кристалізатору, але не рідше одного разу на рік за допомогою акселерометрів. Бокове зміщення повинно бути в межах $\pm 0,2$ мм;

г) струмінь сталі з проміжного ковшу повинен попадати по центру кристалізатору. В іншому випадку, якщо струмінь падає поруч з мідною стінкою, то цей дефект може виникати частіше.

6. В 2024р. було встановлено, що на періодичність виникнення дослідженого дефекту впливає також марка та постачальник мастила, яке подається в кристалізатор, тому в цьому напрямку будуть проведені наступні дослідження.

Заходи, прийняті щодо технологічного режиму на МБЛЗ, на підставі даних результатів, дозволили знизити отримання шлакових включень на поверхні заготовки.

Інформаційні джерела

1. Підвищення ефективності безперервного розливання сортової заготовки // А. А. Мінаєв, А. Н. Смирнов, В. Л. Пилушенко та ін. // Метал та лиття України. 2001. № 5-6. С. 22-25.

2. Властивості шлакоутворювальних сумішей для безперервного розливання сталі з підвищеною швидкістю / О. М. Смирнов, С. Л. Макуров, М. В. Єпішев та ін. // Метал та лиття України. 2006. № 1. С. 55-57.

3. Механізм формування шорсткої поверхні шлакового гарнісажу та її вплив на величину термічного опору, зазору між оболонкою злитка та стінкою кристалізатора / Н. П. Лякішев, Н. А. Арутюнян, А. І. Зайцев та ін. // Метали. 2005. № 3. С. 3-15.

4. Shuai, Y.; Sun, L.F.; Cao, R.H.; Xiao, N.G. Numerical analysis of influence of billet submerged entry nozzle on mold flow field and temperature field. Foundry Technol. 2018, 39, 167–171.

5. Розрахунок параметрів фізичного моделювання процесів розподілу інокуляторів у кристалізаторі МБЛЗ / Е.В.Сінегін, Б.М. Бойченко, В.Г. Герасименко [та ін.]. - Металургійна та гірничорудна промисловість. 2012. №7. С.127-130.

6. Guan, W.B.; Wang, Z.; Zhu, J.; Song, M.M. Analysis and optimization the reason of surface slag-scratch defect of casting billet on No.70 steel. Shanxi Metall. 2019, 181, 21–22.

7. Yong-feng Chen; Li Zhao; Xiao-tan Zuo; Qun-nan Tao; Hong-biao Zhang; Hai Li; Qiang-qiang Wang; and Sheng-ping He. Investigation and Minimization of Slag Spot Surface Defects in Continuous Casting of High Carbon Steel Billets through Statistical Evaluation. Metall. Mater. Trans. B 2020, 10, 10–11.

I. Mazur, V. Voloh, I. Morozov.

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

*Private joint-stock company "Kamet-Stal" Kamianske

RESEARCH OF THE PROCESS OF THE FORMATION OF SLAG INCLUDED IN BILLETS DURING THE CASTING OF A CONTINUOUS STEEL CASTING MACHINE

For a long time, blanks with a defect, previously classified as slag entrapment, have been manufactured at the enterprise for grade MBLZ from different grades of steel. As a result, research was conducted to determine the root cause.

Metallographic studies of workpiece defects are presented, showing that the cause of the defect is not only slag entrapment, but also cold drops and porosity. Different degrees of etching were used to conduct metallographic studies, and scanning electron microscope analysis was also performed. Based on the information available in the literature and on the basis of the thermodynamic model of the Fe-Si-Mn-O system, the mechanism and scheme of foaming and capture of slag inclusions in the crystallizer was carried out. Based on the results of the metallographic study, a mechanism for the formation and capture of cold drops and recommendations for reducing slag inclusions in the workpieces are proposed.

Key words: *steel casting, porosity, slag inclusions, billet, continuous casting.*