

УДК 669.18

Є.В. Синегін, С.В. Суховерхий

Аналітичні дослідження і характеристика методів рафінування сталі у промковшій МБЛЗ

Y.V. Synehin, S.V. Sukhovetskyi

Analytical studies and characteristics of steel refining methods in the CCM tundish

Актуальність: Постійно зростаючі вимоги до якості металопродукції та її собівартості спонукають до сталого розвитку технологій рафінування сталі, зокрема й від неметалевих включень, присутність яких в сталі суттєво знижує механічні властивості сталевих продуктів. Наразі рафінування сталі від неметалевих включень здійснюється починаючи з позапічної обробки сталі у сталерозливному ковші і закінчується на етапі розливання сталі. Найбільш ефективними методами рафінування сталі, що зумовило їх широке використання в промисловості, є продувка інертним газом, електромагнітне перемішування, модифікування та ін. Найбільш ефективним з погляду рафінування сталі є обробка на фінішних етапах виробництва, зокрема при розливанні сталі на МБЛЗ у проміжному ковші.

Мета роботи: з огляду на широке різноманіття технологій і методів рафінування сталі, зокрема й на етапі безперервного розливання сталі, виникає потреба в їх систематизації і класифікації, що дозволить краще оцінювати і порівнювати їх ефективність.

Наукова новизна: систематизовані і класифіковані методи рафінування сталі при безперервному розливанні сталі. На прикладі світового досвіду, ґрунтуючись на огляді останніх закордонних публікацій, розглянуто конкретне застосування і ефективність кожного типу методів.

Наукові та практичні результати: запропонована класифікація методів дозволить краще оцінювати їх ефективність та раціонально обирати доцільні методи та їх комбінації для кожного окремого виробництва, зокрема із урахуванням марки сталі. Також, виходячи з оцінки ефективності розглянутих методів, можна визначити додаткові резерви щодо їх вдосконалення.

Ключові слова: МБЛЗ, модифікування, електромагнітне перемішування, рафінування, неметалеві включення.

Relevance: Constantly growing requirements for the quality of metal products and their cost price encourage the sustainable development of steel refining technologies, in particular, from non-metallic inclusions, the presence of which in steel significantly reduces the mechanical properties of steel products. Currently, the steel refining from non-metallic inclusions starts from steel processing in the ladle and ends at the steel casting. The most effective methods of steel refining, which led to their wide use in industry, are argon blowing, electromagnetic stirring, modification, etc. The most effective from the point of view of steel refining is the processing at the final stages of production, in particular, when casting the billet at the CCM tundish.

The aim of the work: in view of the wide variety of technologies and methods of steel refining, in particular at the continuous casting, there is a need for their systematization and classification, which allow better evaluation and comparison of their effectiveness.

Scientific novelty: systematized and classified methods of steel refining during continuous casting of steel. On the example of world experience, based on a review of the latest foreign publications, the specific application and effectiveness of each type of method is considered.

Scientific and practical results: the proposed classification of methods makes it possible to better assess their efficiency and rationally choose appropriate methods and their combinations for each individual production, in particular, taking into account the steel grade. Also, based on the evaluation of the effectiveness of the considered methods, it is possible to determine additional reserves for their improvement.

Key words: CCM, modification, electromagnetic stirring, refining, non-metallic inclusions.

Наявність неметалевих включень (НВ) в сталі призводить до погіршення механічних характеристик сталі, а в деяких випадках може посилювати вплив корозії на метал. На сьогодні відомо багато методів видалення НВ зі сталі, недоліком яких є використання складного обладнання, дорогих додаткових матеріалів для обробки сталі тощо. Тому розробка недорогих і водночас ефективних методів видалення НВ зі сталі є актуальною задачею.

На підставі проведеного огляду методів видалення неметалевих включень зі сталі в процесі позапічної обробки й безперервного розливання сталі запропонована їхня класифікація на дві групи: механічні й фізико-хімічні (рисунк 1). До першої групи запропоновано віднести методи, що пе-

редбачають зміну картини циркуляційних потоків у ковші таким чином, щоб прискорити спливання НВ у шлакову фазу або їх вловлювання спеціальними керамічними фільтрами. До цієї групи належать продувка інертним газом [1-6], електромагнітне перемішування (ЕМП) [1,3,4,7-11,12,13], фільтрація [1,14-17] й установка в промковшій перегородок і порогів [1,18,19]. Методи другої групи, на відміну від першої, передбачають вплив на хімічний і фазовий склад, а також агрегатний стан включень. Підвищення ефективності видалення НВ у цьому випадку досягається за рахунок зниження їхньої температури плавлення й переведення їх у рідкий агрегатний стан, що полегшує їхню агрегацію та за рахунок укрупнення прискорює спливання. До цієї

Є.В. Синегін,	
С.В. Суховерхий	

групи методів належать модифікування [1,20-22], обробка шлаковими сумішами [23,24] і методи раціонального розкислення й легування [25,26]. Додатковий ефект модифікування полягає в наданні неметалевим включенням глобулярної форми, що

знижує напруги в об'ємі твердого металу. Розглянемо детальніше особливості та ефективність застосування цих методів при розливанні на МБЛЗ (у промковші і в кристалізаторі) відповідно до запропонованої класифікації.

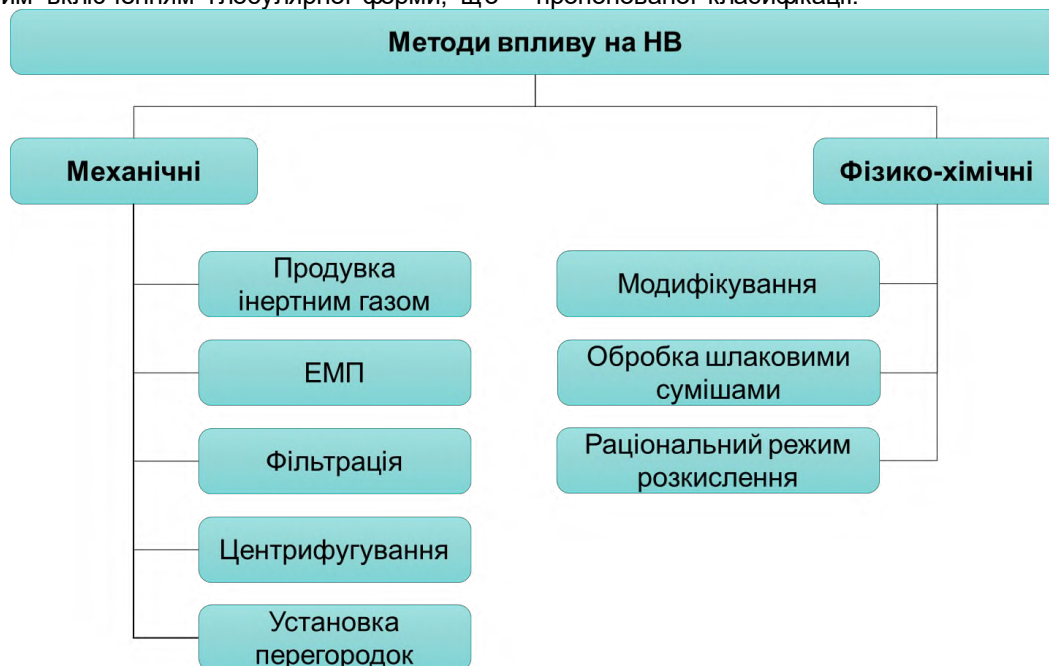


Рисунок 1 – Класифікація методів видалення НВ зі сталі

Механічні методи

Продувка інертним газом. Продувка сталі інертним газом є найбільш розповсюдженим методом позапічної обробки. Основна мета цієї операції – створення вимушеної циркуляції металу, що сприяє його гомогенізації як за температурою, так і за хімічним складом. Окрім цього вирішуються й деякі інші задачі позапічної обробки сталі, зокрема видалення НВ за рахунок флотації та спрямування потоків металу до шлаку, що сприяє швидшій і ефективнішій асиміляції НВ шлаком. Певною мірою відбувається й дегазація металу [27].

При безперервному розливанні є 3 принципові можливості вдування газу в розплав: через пористі вставки в днищі ковша, через порожнисті стопори, якими зазвичай регулюють витрату сталі з промковша та через спеціальне кільце у верхній частині стінки захисної труби [2,5,6].

Більшість наукових робіт акцентує увагу саме на дослідженні флотації НВ газовими бульбашками. Так у роботах [2,5] розроблено математичну модель для оцінки ефективності видалення НВ при продувці. Для цього було визначено ймовірність прикріплення НВ до бульбашки, яка за результатами розрахунків залежить лише від розмірів бульбашки та НВ. За результатами моделювання було встановлено, що при об'ємній витраті газу 15 нл/хв. бульбашки розміром понад 5 мм можуть видалити не більше ніж 10 % включень. За тієї ж витрати газу зменшення розміру бульбашок до 1 мм дозволяє видалити майже всі НВ розмі-

ром понад 30 мкм. Однак, у цьому випадку є ризик, що бульбашки таких розмірів, потрапивши у кристалізатор, не встигнуть вплинути і призведуть до утворення газових пухирів під кіркою заготовки. Тому, як оптимальний варіант, автори рекомендують бульбашки розміром 2-4 мм.

У роботах [3,28] запропоноване розміщення продувочних блоків у днищі промковша у формі кільцевих вставок навколо розливних стаканів у днищі промковша. За рахунок цього навколо стакану створюється завеса з газових бульбашок, а обробці піддаються саме ті порції металу, що витікають з промковша у кристалізаторі. Методами математичного і фізичного моделювання авторами роботи [3] було також підтверджено незначне збільшення резидентного часу перебування металу у промковші МБЛЗ, що також позитивно відбивається на видаленні НВ.

Електромагнітне перемішування. На МБЛЗ застосування ЕМП можливо у промковші і на струмках (у кристалізаторі, ЗВО та зоні остаточного тверднення) причому найбільшого поширення отримало саме друге. Для інтенсифікації видалення НВ з рідкої лунки заготовки у кристалізаторі застосовують технологію MEMS (*mold electromagnetic stirring*) – різновид індуктивного перемішування спрямований на створення обертового руху рідкого металу у кристалізаторі, що може застосовуватися за розливання усіх типів заготовок, звичайно низьколегованих, пружинних, холоднокатаних та середньовуглецевистих марок сталі.

За рахунок обертання сталі неметалеві включення та гази із меншою у порівнянні з металом густиною спрямовуються до центральної частини безперервнолітої заготовки, звідки конвекційними потоками переносяться до дзеркала металу і асимілюються шлаком [7,8,10]. Згідно з даними комп'ютерного моделювання [12] електромагнітна мішалка MEMS, яка працює із силою струму 200 А та частотою 4 Гц, генерує в рідкому ядрі заготовки горизонтальний вихор із максимальною швидкістю обертання 0,27 м/с та глибиною близько 1,3 м. У роботі [11] шляхом промислового експерименту визначено оптимальне розташування ЕМП, необхідне для видалення НВ та зменшення сегрегації, що складає 510 мм від верхньої крайки гільзи кристалізатора.

За рахунок використання MEMS зменшується кількість НВ, особливо малих розмірів, та збільшується глибина їх розташування під кіркою заготовки [29]. До того ж MEMS пригнічує занурення струменя у рідку лунку заготовки, що позитивно впливає на видалення НВ та умови формування кірки [8,12]. Проте за даними роботи [12] надмірно інтенсивне перемішування може призвести до утворення зони негативної ліквіації вуглецю під кіркою заготовки. Крім того, застосування MEMS на слябових кристалізаторах призводить до неоднорідності товщини кірки по перерізу заготовки (утворення порівняно тонких областей на периферії широкої сторони) та збільшення кількості НВ на глибині 0-20 мм під поверхнею широкої грані (у той же час на глибині 20-40 мм ситуація кардинально змінюється) [9].

Порівняно із попередніми методами, використання ЕМП для коригування потоків у промковші є доволі обмеженим. За результатами аналітичного огляду знайдено лише один метод використання, що має назву CF-Tundish (*Centrifugal Tundish*), винайдений японськими вченими [1,13]. Промківш при цьому розділено на дві камери: ротаційну, у яку зі сталерозливного ковша витікає метал та у якій відбувається утворення горизонтального вихору за рахунок електромагнітного поля, та розливу, в якій метал розподіляється по струмках МБЛЗ. Використання електромагнітного перемішування за технологією CF Tundish дозволяє генерувати горизонтальний вихор зі швидкістю до 45 об./хв., що дозволяє ефективно видаляти майже 50 % НВ [1]. Очевидними недоліками цієї технології є необхідність у певному вдосконаленні проміжного ковша МБЛЗ, що ускладнює її впровадження на діючих МБЛЗ, встановлення додаткового складного і вартісного обладнання, а також додаткові експлуатаційні витрати (електричний струм, вода та ін.).

Фільтрація. Під фільтрацією мається на увазі осадження НВ на стінках каналів керамічних фільтрів за рахунок поверхневих сил. Окрім цього, позитивний ефект від їх використання обумовлений також збільшенням резидентного часу перебування металу в промковші, зменшенням об'єму застійних зон та спрямуванням потоків металу у на-

прямку шлаку для асиміляції ним НВ. Зокрема відома робота Польських вчених [14], які у промислових та напівпромислових умовах підтвердили ефективність використання мулітових і корундових фільтрів, які дозволяють знизити відносну площу НВ на 43-50 % і 53 % відповідно, знизити загальну кількість НВ приблизно на 50% для обох фільтрів та знизити загальний вміст кисню в металі на 22%. У роботі китайських вчених [17] шляхом математичного моделювання підтверджено збільшення ефективності видалення НВ розміром 1 мкм з 59,3 % (із використанням порогів і перегоронок) до 72,0 % (із використанням керамічних фільтрів). Решта знайдених робіт [1,15,16] присвячена визначенню оптимального розташування фільтрів та їх конструкції, зокрема форми, розмірів та розташування каналів. Незначним недоліком фільтрів є їх низька стійкість, висока вартість та швидше падіння температури металу при їх використанні [17].

Центрифугування. До цієї групи методів можна віднести розглянуте вище ЕМП, що створює горизонтальні вихори, у середину яких за рахунок відцентрової сили затагуються НВ, а також методи, утворення вихорів за рахунок коригування гідродинамічної картини потоків як в промковші, так і в кристалізаторі. Зокрема утворення горизонтального вихору у промковші розглянуто у роботі [30], в якій до традиційної конструкції промковша запропоновано додати циліндричну камеру, до якої метал з промковша підводиться тангенціально. Утворений у цій камері вихоровий рух рідини передається захисною трубою у кристалізатор.

Також відомі численні варіанти конструкції безнапірних заглибних стаканів, що ініціюють обертальний рух рідини в кристалізаторі за рахунок тангенціального розташування вихідних отворів [31-33] та розташування у порожнині стакану архімедового гвинта [34]. Авторами роботи [31] за результатами гідродинамічного моделювання підтверджена можливість видалення 50-53% неметалевих включень з розплаву.

Установка перегоронок. Основна мета цього устаткування – спрямування потоків металу у напрямку дзеркала металу, підвищуючи таким чином ефективність асиміляції неметалевих включень та зменшуючи об'єм застійних зон. Зазвичай використовують дві перегородки таким чином, що потік спочатку протікає попід однією, а потім, нашотовхуючись на іншу, що лежить на дні, спрямовується вгору до дзеркала металу. Ефективність використання перегородок суттєво залежить від їх розташування та конструкції промковша. Досить часто перегородки використовуються разом з продувочними пристроями та керамічними фільтрами [1,18,19].

Фізико-хімічні методи

Модифікування. Метою модифікування НВ є надання ним сферичної форми та переведення їх у рідкий агрегатний стан. Перше зменшує негативний вплив на механічні властивості сталі тих НВ, які не вдалося видалити зі сталі. Друге поліпшує умови коалесценції рідких НВ, їх спливання і аси-

міляцію шлаковою фазою. Найбільш розповсюдженими модифікаторами є лужноземельні (Ca, Mg, Ba) та рідкоземельні метали (Ce, La, Pr, Nd, Y).

Позитивний вплив кальцію на сфероїдизацію алюмінатів відмічено в роботі [21]. Позитивний досвід використання силікобарію у комплексі з матеріалами, що містять кальцій, наведено у роботі [22].

У роботі [20] використання РЗМ не лише змінює форму НВ, а й зменшує їх розміри. При цьому автори наголошують на тому, що надмірне збільшення витрати РЗМ погіршує якість сталі. Зокрема найбільше зменшення відносної площі НВ на 75 % спостерігається при вмісті РЗМ 150 ppm. При вмісті РЗМ менше 50 ppm модифікуються лише оксиди і окисульфід, проте не модифікуються сульфід. При вмісті РЗМ понад 150 ppm відбувається утворення великих НВ. Зокрема при вмісті РЗМ 2900 ppm суттєво збільшуються розміри та кількість НВ.

Обробка шлаковими сумішами. У роботі [23] авторами виконане детальне дослідження умов видалення включень, зокрема умов їх асиміляції шлаковою фазою. За отриманими результатами, асиміляція рідких НВ відбувається набагато легше, аніж твердих. Крім того, погіршувати асиміляцію будь-яких НВ може підвищення в'язкості шлаку та його гетерогенізація.

Досліджуючи вплив Rb_2O (до 10 %) у складі ковшового шлаку на установці ківш-піч, автори робо-

ти [24] автори зафіксували суттєве зменшення середнього діаметру залишкових НВ до 3,0 мкм та різке зменшення їх кількості.

Раціональний режим розкислення. Цей напрямок включає як розробку технології комплексного розкислення, так і режимів введення феросплавів. Так на ВАТ «Виксунський металургійний завод» були проведені експерименти з вдосконалення технології комплексного розкислення у ковші колісної мартенівської сталі. Найкращий результат показала технологія, що передбачає введення 2 кг/т феросиліцію, 256 г/т алюмінію та 1,2 кг/т силікокальцію. Для зв'язування розчиненого в сталі кисню під час випуску давали алюміній. За рахунок цього міст кисню в металі зменшувався до 0,004 % і повністю зникали крихкі силікати [26].

Висновок

На думку авторів, значної уваги заслуговують методи центрифугування, реалізація яких у процесах позапічної обробки й безперервного розливання можлива за допомогою електромагнітного перемішування й за рахунок тангенціального підведення металу в ротаційну камеру. За рахунок тангенціального спрямовування потоку можливо створювати вихровий рух металу у проміжному ковші та кристалізаторах. Такі метод дозволяють відмовитися від встановлення електромагнітних мішалок та зменшити експлуатаційні витрати на розливання сталі.

Перелік посилань

1. Sahai, Y. (2016). Tundish Technology for Casting Clean Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions B*. DOI: 10.1007/s11663-016-0648-3
2. Zhang, L., Aoki, J., & Thomas, B. (June 2006). Inclusion Removal by Bubble Flotation in a Continuous Casting Mold. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37B, pp. 361-379.
3. Qin, X., Cheng, C., Li, Y., Zhang, C., Zhang, J., & Jin, Y. (February 2019). A Simulation Study on the Flow Behavior of Liquid Steel in Tundish with Annular Argon Blowing in the Upper Nozzle. *Metals*, 9(225). DOI:10.3390/met9020225
4. Sang-ik Chung, Young-Ho Shin & Jong-Kyu Yoon (1992). Flow Characteristics by Induction and Gas Stirring in ASEA-SKF Ladle. *ISIJ International*, 32(12), pp. 1287-1296.
5. Aoki J., Zhang L., Thomas B.G. (2005). Modeling of Inclusion Removal in Ladle Refining. 3rd Internat. Congress on Science & Technology of Steelmaking, Charlotte, NC, May 9-11, pp. 319-332.
6. Thomas B.G., Dennisov A., Bai H. (1997). Behavior of Argon Bubbles during Continuous Casting of Steel. *Proceedings of ISS 80th Steelmaking Conference, Chicago, April 13-16*, pp. 375-384.
7. Lei, H., Jiang, J., Yang, B., Zhao, Y., Zhang, H., Wang, W., & Dong, G. (February 2018). Mathematical Model for Collision-Coalescence Among Inclusions in the Bloom Continuous Caster with M-EMS. *Metallurgical and Materials Transactions B*. DOI: 10.1007/s11663-018-1186-y
8. Yanbin Yin, Jiongming Zhang, Qipeng Dong & Qinghai Zhou (2018). Mathematical modelling of inclusion motion and entrapment in billet mould with effect of electromagnetic stirring. *Ironmaking & Steelmaking*. DOI: 10.1080/03019233.2018.1540519
9. Yanbin Yin, Jiongming Zhang, Shaowu Lei & Qipeng Dong (October 2017). Numerical Study on the Capture of Large Inclusion in Slab Continuous Casting with the Effect of In-mold Electromagnetic Stirring. *ISIJ International*, 347. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-347
10. H. Q. Yu & M. Y. Zhu (2012). Influence of electromagnetic stirring on transport phenomena in round billet continuous casting mould and macrostructure of high carbon steel billet. *Ironmaking and Steelmaking*, 8(39), pp. 574-584. DOI: 10.1179/0301923312Z.00000000058
11. Guifang Zhang, Yuehua Ding & Zhe Shi (2013). Effect of Position of Electromagnetic Stirring on Inclusion Behaviors in Billet. *Advanced Materials Research*, 805-806, pp. 1716-1719. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.1716
12. Wenjie Zhang, Sen Luo, Yao Chen, Weiling Wang & Miaoyong Zhu (January 2019). Numerical Simulation of Fluid Flow, Heat Transfer, Species Transfer, and Solidification in Billet Continuous Casting Mold with M-EMS. *Metals*, 9(66). DOI: 10.3390/met9010066

13. Ogura S., Onishi M., Kitaoka H., Sakurai M., Sakuraya T., Tanino Y., Terashima T., Tomiyama Y., Nabeshima Y., Miki Y., Moriwaki S., Yasukawa N. (1995). System for removing non-metallic foreign matter in molten metal. *United States Patent No. 5,429,655*.
14. Bulkowski L., Galisz U., Kania H., Kudliński Z., Pieprzyc J., Barański J. (2012). Industrial Tests of Steel Filtering Process. *Archives of Metallurgy and Material, Vol. 57, Is. 1*, pp. 363-369. DOI: 10.2478/v10172-012-0035-2
15. Jin Y., Dong X., Yang F., Cheng C., Li Y., Wang W. (2018). Removal Mechanism of Microscale Non-Metallic Inclusions in a Tundish with Multi-Hole-Double-Baffles. *Metals, 8*, 611. DOI:10.3390/met8080611
16. Fang Q., Zhang H., Luo R., Liu C., Wang Y., Ni H. (2019). Optimization of flow, heat transfer and inclusion removal behaviors in an odd multistrand bloom casting tundish. *Journal of Materials Research and Technology*, DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.064
17. Wang Q., Liu Y., Huang A., Yan W., Gu H., Li G. (2019). CFD Investigation of Effect of Multi-hole Ceramic Filter on Inclusion Removal in a Two-Strand Tundish. *Metallurgical and Materials Transactions B*, DOI: 10.1007/s11663-019-01736-4
18. Amel F. Boudjabi, Ahmed Bellaouar, Mohammed Lachi & Nadim El Wakil (2010). Non-Isothermal Fluid Flow in a Continuous Casting Tundish. *Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Istanbul. Turkey*.
19. Смірнов О.М. Безперервне розливання сталі [Підручник] / О.М. Смірнов, С.В. Куберський, Є.В. Штепан. – Алчевськ: ДонДТУ, 2011. – 518 с.
20. Šuler, B., Burja, J., & Medved, J. (2019). Modification of non-metallic inclusions with rare-earth metals in 50CrMoV13-1 steel. *Materiali in Tehnologije*, pp. 441-447. DOI: 10.17222/mit.2018.271
21. Ren Q., Yang W., Cheng L., Zhang L., Conejo A.N. (2019). Formation and Deformation Mechanism of Al₂O₃-CaS Inclusions in Ca-Treated Non-Oriented Electrical Steels. *Metallurgical and Materials Transactions B*, DOI: 10.1007/s11663-019-01739-1
22. О механизме образования и модифицирования неметаллических включений при ковшевой обработке стали сплавами силикобария / Б.Ф.Белов, А.И. Троцан, Я.П. Карликова, И.В. Рябчиков, И.В. Паренчук // Новые материалы и технологии в металлургии та машинобудуванні. – 2018. – №1. – С. 41-48.
23. Bruno Henrique Reis, Wagner Viana Bielefeldt & Antônio Cezar Faria Vilela (April 2014). Absorption of non-metallic inclusions by steelmaking slags - A review. *Journal of Materials Research and Technology, 3(2)*, pp. 179-185. DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.03.011
24. Chen C., Jiang Z., Li Y., Sun M., Qin G., Yao C., Wang Q., Li H. (2018). Effect of Rb₂O on Inclusion Removal in C96V Saw Wire Steels Using Low-Basicity LF Refining Slag. *ISIJ International*, DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-385
25. Cécile Nicolai, Jean-François Carton, Alexis Vauchereta, Philippe Jacquet (January 2018). Deoxidation Impact on Non-Metallic Inclusions and Characterization Methods. *Journal of Casting & Materials Engineering, 1(4)*, pp. 97-102. DOI: 10.7494/jcme.2017.1.4.97
26. Оптимизация неметаллических включений в железнодорожных колёсах повышенной эксплуатационной стойкости / Г.П. Баринаова, О.С. Калинина, А.А. Кононов, Г.А. Филиппов, А.А. Шишов // Сталь. – 2003. – № 5. – С. 67-69.
27. Пат. на корисну модель. Україна. МКИ В21D 11/00. Спосіб рафінування флокочутливої рідкої сталі від водню / Бойченко С.Б., Проїдак Ю.С., Синегін Є.В. – № 90886; Заявл. 27.01.2014; Опубл. 10.06.2014. Бюл. № 11. – 4 с.
28. Smirnov, A.N.; Efimova, V.G.; Kravchenko, A.V. (2014). Design of a permeable annular refractory injection block for the tundish refining of steel. *Refractory Industrial Ceramic, Vol. 55*, pp. 173–178.
29. Trindade L.B., Nadalon J.E.A., Vilela A.C.F., Vilhena M.T.M.B., Soares R.B. (2007). Numerical Modeling of Inclusion Removal in Electromagnetic Stirred Steel Billets. *Steel Research International, Vol. 78*, pp. 708-713.
30. Ni P., Jonsson L.T.I., Ersson M., Jönsson P.G. (2016). A New Tundish Design to Produce a Swirling Flow in the SEN during Continuous Casting of Steel. *SCANMET V "5th International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking"*.
31. Hackl G., Nitzl G., Tang Y., Eglsäer C., Chalmers D. (2015). Innovative Flow Control Refractory Products for the Continuous Casting Process. *AISTech 2015 Proceedings*, pp. 2436-2442.
32. Гуштин В.Н. Создание закручивающего эффекта расплава в кристаллизаторах с помощью безнапорных разливочных стаканов / В.Н. Гуштин, В.М. Паршин, А.В. Куклев // Сталь. – 2006. – № 12. – С. 21-23.
33. Хлопонин В.Н. Механическое перемешивание и торможение потока металла в кристаллизаторе МНЛЗ / В.Н. Хлопонин, Е. Шумахер, И.В. Зинковский // Сталь. – 2010. – №1. – С. 33-37.
34. Tsukaguchi Y., Hayashi H., Kurimoto H. et al. (2009). Development of Swirling Flow Submerged Entry Nozzles for Slab Casting. *Tetsu-to-Hagane, 1(95)*, pp. 33-42.