

Є.В. Синегін, С.В. Суховецький, Л.С. Молчанов, С.В. Журавльова

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ НА РІЗНИХ ЕТАПАХ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ

Розглянуті методи видалення неметалевих включень зі сталі на різних етапах її виробництва: у сталерозливному ковші, промковші й кристалізаторі МБЛЗ. Запропоновано класифікувати методи рафінування сталі від неметалевих включень на дві групи: механічні (продувка сталі інертним газом, установка електромагнітних мішалок та ін.) і фізико-хімічні (модифікування, обробка шлаками, раціональні режими розкислення). Особлива увага приділена методам, спрямованим на створення в металі вихру, усередині якого відбувається перенос включень до його осі. Метою роботи є визначення ефективності використання відцентрових сил для видалення неметалевих включень на різних етапах виробництва сталі. Виконані розрахунки тривалості переносу НВ різних розмірів до осі вихору, що обертається із різною швидкістю. Проаналізовані витрати енергії на формування вихору та виконано оцінку можливості використання кінетичної енергії струменя, що витікає з сталерозливного ковша у ротаційну камеру промковша.

Ключові слова: неметалеві включення, відцентрові сили, формування вихра, промківш, МБЛЗ.

Постановка проблеми

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, недолікам 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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На підставі проведеного огляду методів видалення неметалевих включень зі сталі в процесі позапічної обробки й безперервного розливання сталі запропоновані їхня класифікація на дві групи: механічні й фізико-хімічні. До першої групи запропоновано віднести методи, що передбачають 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 [1-4], електромагнітне перемішування [1,4-9], фільтрація [1] й установка в промковші перегородок і порогів [1,10]. 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 групи методів належать модифікування [1,11], обробка шлаковими сумішами [12] і методи раціонального розкислення й легування [13]. Додатковий ефект модифікування полягає в наданні неметалевим включенням глобулярної форми, що знижує напруги в об’ємі твердого металу.

На думку авторів, значної уваги у цьому напрямку 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. Обертний рух металу методом індукційного перемішування реалізовується в сталерозливних ковшах (ASEA-SKF) [4], промковшах (CF-Tundish) [1] і кристалізаторах (MEMS) [5-9]. За рахунок тангенціального спрямовування потоку можливо створювати вихровий рух металу у проміжному ковші [14] та кристалізаторах [15,16]. Хоча такі методи дозволяють відмовитися від встановлення електромагнітних мішалок, проте вимагають певної зміни конструкції проміжного ковша [14] або використання змінних керамічних виробів спеціальної конструкції [15,16].

Мета дослідження

Метою роботи є оцінка ефективності видалення неметалевих включень у сталерозливному ковші, промковші та кристалізаторі МБЛЗ за рахунок відцентрових сил. Показниками ефективності доцільно обрати тривалість обробки сталі, необхідну для видалення НВ певного розміру (тривалість подолання ним відстані, що дорівнює радіусу ємності) та енергію, яку необхідно використати для створення вихору із необхідною швидкістю обертання.

Методика розрахунку

Передусім розглянемо сили, які діють на неметалеve включення, що вспливає у рідкому металі. Це сила земного тяжіння F_g , сила Архімеда F_A та сила в’язкого тертя F_η , яка діє у напрямку протилежному руху НВ, цим сповільнюючи його рух.

$$F_g = m_{\text{NMI}} \cdot g, \text{ Н}, \quad (1)$$

$$F_A = \rho_1 \cdot g \cdot V_{NMI}, \text{ Н}, \quad (2)$$

$$F_\eta = -6 \cdot \pi \cdot r_{NMI} \cdot \eta_1 \cdot w_{NMI}, \text{ Н}, \quad (3)$$

де m_{NMI} – вага НВ, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ρ_1 – густина рідкої сталі, кг/м³; V_{NMI} – об’єм НВ, м³; r_{NMI} – радіус НВ, м; η_1 – динамічна в’язкість рідкої сталі, Па·с; w_{NMI} – швидкість руху НВ до осі вихору, м/с.

У випадку вихорового руху потоку на включення, які рухаються разом з ним, додатково діє відцентрова сила F_c .

$$F_c = m_{NMI} \cdot a = 4m_{NMI} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot \omega, \text{ Н}, \quad (4)$$

де a – відцентрове прискорення, м/с²; R – радіус вихру, м; ω – кутова швидкість обертання вихору, об./с.

Оскільки часточки знаходяться у середовищі із більшою густиною, відцентрова сила сприятиме їх руху до осі вихору. Відповідно до першого закону Ньютона сума сил, що діє на неметалеве включення, дорівнює нулю. Тоді справедливе рівняння

$$6 \cdot \pi \cdot r_{NMI} \cdot \eta_1 \cdot w_{NMI} + \sqrt{(\rho_1 \cdot g \cdot V_{NMI} - m_{NMI} \cdot g)^2 + (4m_{NMI} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot \omega^2)^2} = 0, \quad (5)$$

з якого можна визначити миттєву швидкість руху часточки в напрямку осі вихору, яка обертається по колу з радіусом R

$$\bar{w} = \frac{\sqrt{(\rho_1 \cdot g \cdot V_{NMI} - m_{NMI} \cdot g)^2 + (4m_{NMI} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot \omega^2)^2}}{6 \cdot \pi \cdot r_{NMI} \cdot \eta_1}, \text{ м/с}. \quad (6)$$

Рух НВ до осі вихору відбувається під кутом α до вертикалі, який можна визначити за формулою

$$\alpha = \arctg \frac{4m_{NMI} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot \omega^2}{\rho_1 \cdot g \cdot V_{NMI} - m_{NMI} \cdot g}, \text{ град}. \quad (7)$$

Горизонтальна складова швидкості руху НВ в напрямку осі вихору може бути визначена за формулою

$$\begin{aligned} \bar{w}_x = \bar{w} \cdot \sin \alpha &= \frac{\sqrt{(\rho_1 \cdot g \cdot V_{NMI} - m_{NMI} \cdot g)^2 + (4m_{NMI} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot \omega^2)^2}}{6 \cdot \pi \cdot r_{NMI} \cdot \eta_1} \times \\ &\times \frac{4m_{NMI} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot \omega^2}{\sqrt{(\rho_1 \cdot g \cdot V_{NMI} - m_{NMI} \cdot g)^2 + (4m_{NMI} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot \omega^2)^2}} = \frac{2m_{NMI} \cdot \pi \cdot R \cdot \omega^2}{3 \cdot r_{NMI} \cdot \eta_1}, \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (8)$$

Якщо прийняти, що НВ мають сферичну форму, то горизонтальну складову швидкості НВ на будь-якій відстані від осі вихору можна визначити за формулою

$$w_x = \frac{2\rho_1 \cdot R \cdot (\pi \cdot d_{\text{НМІ}} \cdot \omega)^2}{9 \cdot \eta_1}, \text{ м/с}, \quad (9)$$

де $d_{\text{НМІ}}$ – діаметр НВ, м.

Приймаємо, що у вихорі відсутній градієнт кутової швидкості по його радіусу, тобто $\frac{d\omega}{dR} = 0$. Тоді тривалість переміщення НВ до осі вихору можна визначити за формулою

$$\tau = \frac{9 \cdot \eta_1}{2\rho_1 \cdot (\pi \cdot d_{\text{НМІ}} \cdot \omega)^2} \cdot \int_R^0 \frac{dR}{R} = \frac{9 \cdot \eta_1}{2\rho_1 \cdot (\pi \cdot d_{\text{НМІ}} \cdot \omega)^2} \cdot |\ln R| + C, \text{ с}. \quad (10)$$

Виходячи з граничної умови $\tau_{R=0} = 0$, стала інтегрування $C = 0$.

Результати дослідження

Ефективність видалення НВ досліджували у сталерозливному ковші, промковші і кристалізаторі МБЛЗ. Для розрахунку було обрано ківш ємністю 50 т з рівнем сталі у ньому 2202 мм і середнім діаметром 2002 мм. Згідно з [4, 17] використання електромагнітного перемішування на установці ASEA-SKF дозволяє генерувати вертикальний вихор зі швидкістю до 1 м/с.

Для моделювання використовували промківш МБЛЗ із ротаційною камерою діаметром 700 мм та з таким самим рівнем металу в ній. Згідно з [1] використання електромагнітного перемішування за технологією CF Tundish дозволяє генерувати горизонтальний вихор зі швидкістю до 45 об./хв.

Останнім об'єктом моделювання був кристалізаторі МБЛЗ для розливання сортової заготовки діаметром 160 мм. Згідно з даними комп'ютерного моделювання [18] 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. При розрахунку враховували постійний ріст кірки, тому середній діаметр вихору приймали близько 130 м.

Із використанням формули (10) було розраховано час переміщення НВ густиною 2500 кг/м^3 різного розміру до осі сталерозливного ковша, ротаційної камери промковша МБЛЗ та осі кристалізатора. Величину динамічної в'язкості прийняли $6,40 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. При розрахунку розглядали одиничне НВ, тобто нехтували процесами зштовхування та агрегацією з іншими НВ. Результати моделювання наведені на рисунках 1-3.

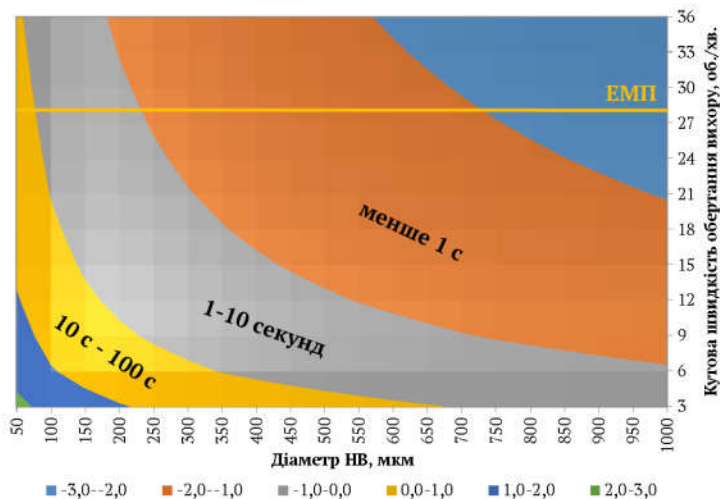


Рисунок 1 – Десятинний логарифм тривалості переміщення НВ різного розміру до осі вихору у сталерозливному ковші

Як видно з рисунків 1-3 найефективнішим з погляду тривалості переміщення НВ до осі камери є використання відцентрових сил у сталерозливному ковші. Проте, як це буде показано нижче, подібна технологія вимагає значних витрат енергії. Не дивлячись на значно менші розміри ротаційної камери промковша, тривалість видалення НВ у ній приблизно на 2 порядки вища через майже у 6 разів нижчу швидкість обертання вихору. Використання відцентрових сил у кристалізаторі лімітується ризиком зменшення швидкості росту кірки та надмірної турбулізації металу, що тягне за собою небезпеку затягування нових НВ зі шлакової фази у кристалізаторі. Тим самим, не дивлячись на вельми малий радіус кристалізатора, тривалість міграції НВ до осі вихору є порівняно високою.

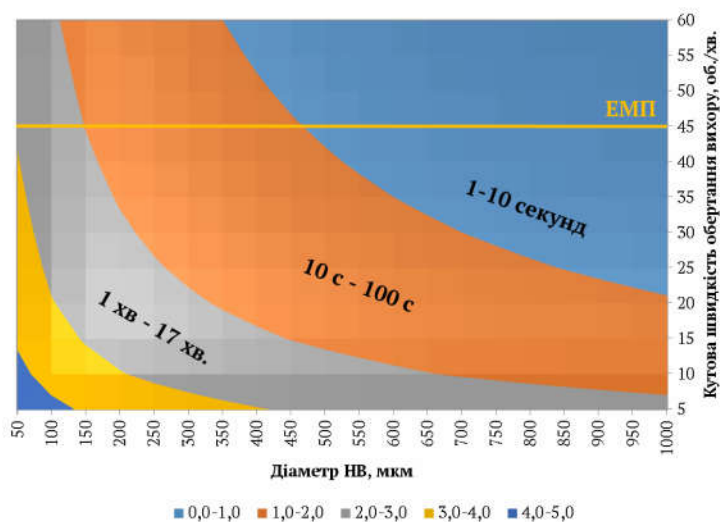


Рисунок 2 – Десятинний логарифм тривалості переміщення НВ різного розміру до осі вихору у ротаційній камері промковше

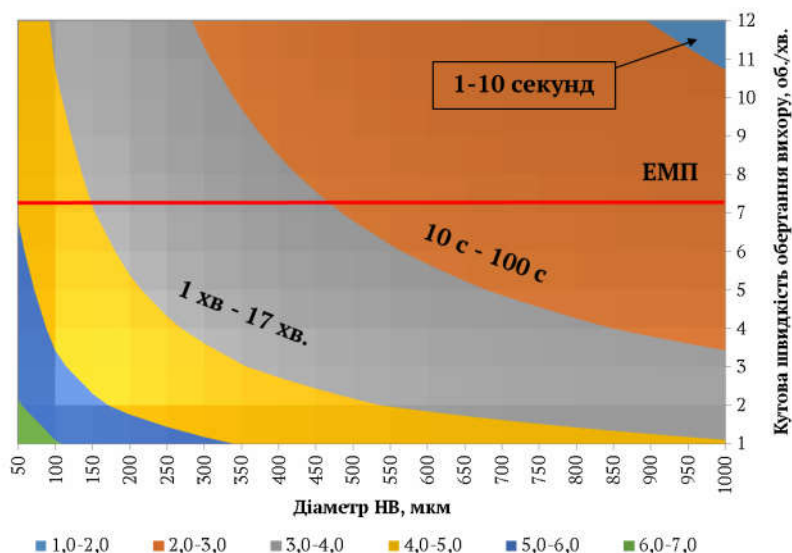


Рисунок 3 – Десятичний логарифм тривалості переміщення НВ різного розміру до осі вихору у кристалізаторі МБЛЗ

Окрім тривалості обробки, необхідної для ефективного видалення НВ зі сталі, слід також враховувати енергетичні витрати на формування вихору, що обертається із заданою швидкістю. Приймаючи, що при обертанні вихору у ньому відсутній градієнт швидкості по радіусу, тобто $\frac{d\omega}{dR} = 0$, та нехтуючи шорсткістю стін ємності можна визначити кінетичну енергію E_k обертального руху об'єму рідини

$$E_k = \frac{J\omega^2}{2}, \text{ Дж.} \quad (11)$$

де J – момент інерції вихору, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

У всіх випадках вихор має форму подібну до зрізаного конусу з різним кутом нахилу стінок до основи, момент інерції якого може бути розрахований за формулою

$$J = \frac{3(R^5 - r^5)}{10(R^3 - r^3)} m, \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (12)$$

При оцінці кінетичної енергії обертання вихору рідкого металу приймали наступні його розміри у сталерозливному ковші, ротаційній камері промковша та кристалізатора (табл. 1). Порівняння кінетичної енергії обертального руху вихрів наведено на рис. 4.

Розміри вихру у сталерозливному ковші,
ротаційній камері промковша та кристалізатора

| Параметр | Ємність | | |
|--|---------------------|----------|---------------|
| | Сталерозливний ківш | Промківш | Кристалізатор |
| Середній діаметр, м | 2,002 | 0,7 | 0,13 |
| Кут нахилу стінок, град. | 3,4 | 15 | 1,24 |
| Менший діаметр, м | 1,870 | 0,512 | 0,10 |
| Більший діаметр, м | 2,134 | 0,888 | 0,16 |
| Висота, м | 2,202 | 0,7 | 1,3 |
| Об'єм, м ³ | 6,944 | 0,276 | 0,018 |
| Маса рідини у вихорі, т | 50 | 1,986 | 0,130 |
| Момент інерції вихору, кг·м ² | 25237 | 136 | 0,303 |

З рисунку 4 видно, що найбільші витрати енергії необхідні для обертання рідкої сталі у сталерозливному ковші. Їх величина більш ніж у 100 разів вища, ніж у ротаційній камері промковша та майже у 10⁵ разів вища, ніж у кристалізаторі. Реальні витрати енергії у випадку використання ЕМП додатково залежатимуть від розташування мішалки та параметрів її роботи.

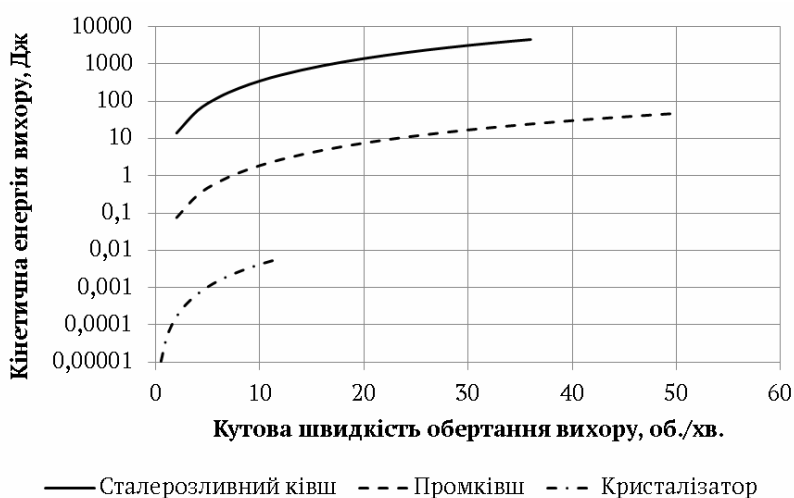


Рисунок 4 – Порівняння кінетичної енергії вихору в сталерозливному ковші, промковші та кристалізаторі за різної кутової швидкості його обертання

Як вже було сказано вище, альтернативою ЕМП є тангенціальне спрямування потоку, використання якого вже добре зарекомендувало себе у промковшах [14] і кристалізаторах [15,16]. При цьому для утворення вихору використовується кінетична енергія прямолінійного потоку, який тангенціально спрямовується до ротаційної камери чи кристалізатора. Очевидно, що швидкість вихору, а отже і тривалість видалення НВ, прямо залежить від кінетичної енергії потоку, яка, у свою чергу, залежить від феростатичного тиску рідини у ємності, з якої цей потік витікає. Крім того, на

швидкість обертання вихору впливає розташування каналу, з якого витікає потік, та його форма, яка має впливати на дисипацію кінетичної енергії заглибленого потоку. Величина дисипації енергії струменя для конкретних умов може бути визначена шляхом комп'ютерного моделювання.

Оскільки найбільша величина феростатичного тиску спостерігається у сталерозливному ковші, то струмінь металу, що витікає з нього у промківш, має найбільшу кінетичну енергію у порівнянні зі струменем, що витікає з промковша у кристалізатор. Певним недоліком цього методу є постійне зменшення кінетичної енергії струменя з сталерозливного ковша в наслідок падіння рівня металу в ньому.

Прийнявши, що сталь витікає зі сталерозливного ковша без гальмування струменя через стакан діаметром 60 мм із коефіцієнтом швидкості $\phi = 0,82$, а товщина шлаку густиною $\rho_{sl} = 3000 \text{ кг/м}^3$ на дзеркалі металу складає $h_{sl} = 150$ мм, розрахуємо кінетичну енергію струменя за формулою (13).

$$E_k = \frac{M\bar{w}^2}{2} = M\phi^2 g \left(h_{st} + \frac{\rho_{st}}{\rho_{sl}} \cdot h_{sl} \right), \text{ Дж.} \quad (13)$$

де M – порція металу, яка заповнює ротаційну камеру промковша, кг; \bar{w} – середня швидкість витікання сталі, м/с; ρ_{st} – густина рідкої сталі, кг/м^3 .

Порівнюючи кінетичну енергію струменя розраховану за формулою (13) з кінетичною енергією обертального руху вихору помітно, що навіть при дисипації понад 95 % кінетичної енергії струменя, її вистачить для формування у ротаційній камері промковша вихору, який обертається зі швидкістю понад 45 об./хв.

Таким чином, подальшими напрямками дослідження є розробка раціонального способу підведення металу у ротаційну камеру проміжного ковша, що забезпечить задану швидкість обертання вихору уникаючи при цьому надмірної його турбулізації. Зокрема авторами запропоновано дослідити спосіб підведення металу зображений на рисунку 5, відповідно до якого метал потрапляє у ротаційну камеру промковша глухонною захисною трубою із щілинним отвором у боковій стінці, причому захисна труба розташована біля стінки камери, а струмінь витікає по дотичній до стінці камери.

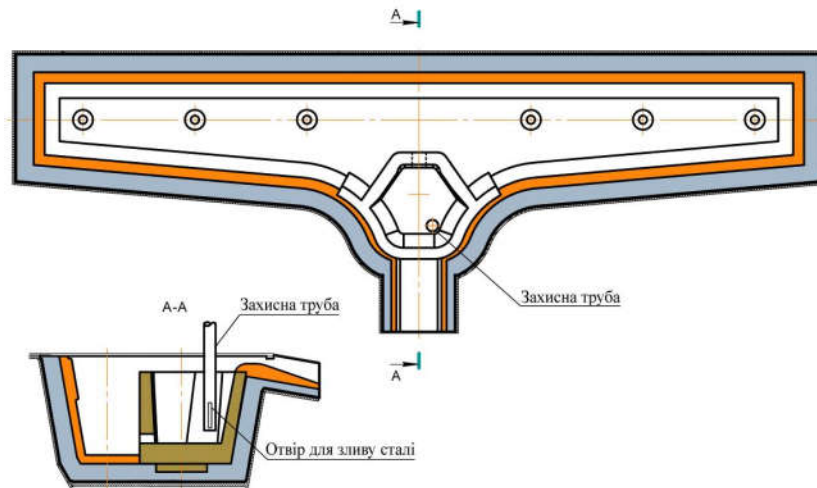


Рисунок 5 – Принципова схема організації тангенціального підведення металу в ротаційну камеру промковша

Висновки

За результатами розрахунку підтверджено ефективність застосування відцентрових сил для видалення неметалевих включень зі сталі у сталерозливному ковша, промковше і кристалізаторі. Як показують розрахунки, найшвидше видалення НВ може бути досягнуте у сталерозливному ковші, що однак вимагає значної витрати енергії на обробку. Натомість у кристалізаторі МБЛЗ формування вихру вимагає найменшої витрати енергії, проте через небезпеку порушення умов формування кірки та спливання НВ повільне обертання вихору не забезпечує швидкого їх переміщення до осі заготовки. З огляду на це оптимальним варіантом є створення вихору у ротаційній камері промковше за рахунок тангенціального підведення металу.

REFERENCES

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, P. 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), P. 1287-1296.
5. 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
6. 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
7. 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

8. 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), P. 574-584. DOI: 10.1179/0301923312Z.00000000058
9. Guifang Zhang, Yuehua Ding & Zhe Shi (2013). Effect of Position of Electromagnetic Stirring on Inclusion Behaviors in Billet. *Advanced Materials Research*, 805-806, P. 1716-1719. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.1716
10. 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.
11. Šuler, B., Burja, J., & Medved, J. (2019). Modification of non-metallic inclusions with rare-earth metals in 50CrMoV13-1 steel. *Materiali in Tehnologije*, P. 441-447. DOI: 10.17222/mit.2018.271
12. 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), P. 179-185. DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.03.011
13. Cécile Nicolia, 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), P. 97-102. DOI: 10.7494/jcme.2017.1.4.97
14. Peiyuan NI et al. (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”*
15. Y. Tsukaguchi, H. Hayashi, H. Kurimoto et al. (2009). Development of Swirling Flow Submerged Entry Nozzles for Slab Casting. *Tetsu-to-Hagane*, No.1(95), P. 33-42
16. Gernot Hackl et al. (2015). Innovative Flow Control Refractory Products for the Continuous Casting Process. *AISTech 2015 Proceedings*
17. Lidong Teng (2017). Effect of EMS on Inclusion Removal in Ladle Furnace for Specialty Steel Production. *AISTech 2017 Proceedings*, P. 1395-1402
18. 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

Received 08.01.2020.

Accepted 17.01.2020.

UDC 669.84

Y. Synehin, S. Sukhovetskyi, L. Molchanov, S. Zhuravlova

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF NON-METALLIC INCLUSIONS REMOVAL THROUGH THE USE OF CENTRIFUGAL FORCE AT DIFFERENT STAGES OF STEEL PRODUCTION

Methods for the removal of non-metallic inclusions from steel at various stages of its production are considered: in a teeming ladle, a tundish and a CCM mold. It is proposed to classify methods of non-metallic inclusions removal into two groups: mechanical (inert gas blowing, application of electromagnetic stirrers, etc.) and physical and chemical (modification of non-metallic inclusions, slag treatment, rational deoxidation modes). Particular attention is paid to methods aimed at creating a vortex in the metal, inside which non-metallic inclusions are transported to its axis. The aim of the work is to determine the efficiency of use centrifugal forces to remove non-metallic inclusions at different stages of steel production. To assess the centrifugal force effectiveness, it has been analyzed the transfer time of non-metallic inclusions of various sizes to the vortex axis in the teeming ladle of 50 tons capacity, a rotary chamber of tundish (chamber capacity is 2.0 tons) and the

CCM mold of 160 mm in diameter. For typical angular velocities being observed during electromagnetic stirring, the values of the metal inertia moment and the kinetic energy of its rotational motion have been calculated. According to the calculations, the smallest transfer time of inclusions is achieved in the teeming ladle. However, vortex creation in it requires a significant energy. The use of centrifugal force in the mold, although it does not require such a high energy, is also not efficient enough due to the low angular velocity of the vortex, limited by a risk of violating the crust formation in the mold. The possibility of using the kinetic energy of the jet flowing from the teeming ladle to the rotary chamber of the tundish has been assessed.

Key words: non-metallic inclusions, centrifugal force, vortex formation, tundish, CCM.

Синегін Євген Володимирович – к.т.н., доцент кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

Суховецкий Сергій Васильович – аспірант кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

Молчанов Лавр Сергійович – к.т.н., доцент кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

Журавльова Світлана Валеріївна – к.т.н., доцент кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

Синегин Евгений Владимирович – к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины;

Суховецкий Сергей Васильевич – аспирант кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины;

Молчанов Лавр Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины;

Журавлёва Светлана Валериевна – к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины.

Synehin Yevhen – PhD, Associate Professor, Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine;

Sukhovetskyi Sergii – PhD student of the Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine;

Molchanov Lavr – PhD, Associate Professor, Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine;

Zhuravlova Svitlana – PhD, Associate Professor, Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine.