УДК 669.18.046.58

О.М. Смірнов¹, д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, Web of Science ResearcherID: N-1890-2017

О.П. Верзілов¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: verzilovalex@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0463-5006>

А.В. Кравченко², інженер, e-mail: kravchenko.dpi@gmail.com

Ю.О. Смірнов¹, канд. екон. наук, доц., ст. наук. співр., e-mail: smirnoff.yuriy@gmail.com

А.Ю. Семенко¹, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

Д.І. Гойда¹, мол. наук. співр., e-mail: goydadaniil@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4318-3084>

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

²ТОВ «Кальдеріс Україна» (сmt. Володимирівка, Україна)

Фізичне моделювання поведінки розплаву і формування застійних зон в однострумковому проміжному ковші при розливанні в умовах металургійного мікро-заводу

Дослідження, які представлені у роботі, спрямовані на вибір оптимальної геометричної форми металоприймача, який повинен задовольняти умовам роботи в однострумковому проміжному ковші при безперервному чи напів-безперервному розливанні сортової чи блюмової заготовки на малих металургійних мікро-заводах.

В основу експериментів по встановленню гідродинамічної картини витікання металу в проміжному ковші, виконаних на фізичній холодній моделі, були покладені наступні варіанти: без металоприймача (№ 1), несиметричний металоприймач з низьким бортом, розгорнутий в бік стакан-дозатора (№ 2), несиметричний металоприймач з низьким бортом, розгорнутий в бік найближчої вузької стінки (№ 3), несиметричний металоприймач без борта, розгорнутий також у бік вузької стінки (№ 4). Найкращі результати продемонстрували металоприймачі, які були розгорнуті в бік найближчої вузької стінки. Але слід зазначити, що потребує додаткових досліджень вплив конвективних та циркуляційних потоків на футерування у цій зоні.

Також було здійснено спробу встановити час перетікання локального об'єму рідини з потенційно мертвої зони, яка перебувала в крайній правій 1/4 обсягу проміжного ковша, в зону лівої 1/4 обсягу ковша, в якій знаходиться стакан-дозатор. Для цього в зону правої 1/4 для всіх досліджуваних варіантів подавалися кольорові чорнила і визначався час, за який перші підфарбовані потоки досягнуть лівої вузької стінки проміжного ковша. В результаті час перетікання рідини в проміжному ковші без металоприймача склав 40 секунд, а при аналогічних експериментах при використанні металоприймача "turbostop" конструкції № 2 – 50 секунд; № 3 – 45 секунд; № 4 – 30 секунд. Зроблено висновок про те, що наявність застійної зони між металоприймачем і правою вузькою стінкою проміжного ковша збільшує час перетікання металу в зону стакан-дозатора в середньому на 35–60 %.

Ключові слова: розливання сталі, проміжний ківш, металоприймач, рух потоків, теплоізолююча суміш, не-металеві вклучення.

Важливу роль у стабільності функціонування проміжного ковша грає організація руху конвективних потоків сталі на початку розливання і по його ходу [1, 2]. Так, метал, який потрапляє в проміжний ківш із сталерозливного ковша, рухається у вигляді компактного струменя вертикально вниз зі швидкістю кілька метрів на секунду. При падінні такого струменя може відбуватись втягування в обсяги перемішування розплаву теплоізолюючої суміші (ТІС), що розташована на меніску, а також удар струменя в донну частину проміжного ковша, що призводить до зміни напрямку руху потоків: вгору під нахилом або горизонтально. Для запобігання інтенсивному бурлінню в місці падіння струменя в проміжному ковші, на практиці використовується захисна труба, що встановлю-

ється на колектор сталерозливного ковша і занурюється в рідку ванну проміжного ковша. При цьому, в силу високої швидкості руху в місці контакту зі струменем спостерігається підвищений знос робочого шару вогнетривів. Відповідно ця зона футерування проміжного ковша виконується з міцніших марок вогнетривів із застосуванням спеціальних виробів. Для гальмування струменя в області його контакту з днищем використовуються додаткові прийомні пристрої – металоприймачі, які виробляють зі спеціальних високоміцних вогнетривких матеріалів [2].

Дослідження, що представлені у роботі, спрямовані на вибір оптимальної геометричної форми металоприймача, який повинен задовольняти наступним умовам роботи в однострумковому проміжному ковші

при безперервному чи напівбезперервному розливанні в умовах металургійного мікро-заводу:

- захист донної частини проміжного ковша в місці падіння струменя зі сталерозливного ковша;
- організація витікання потоків в об'ємі проміжного ковша таким чином, щоб одночасно забезпечити кращу флотацію включень до ТІС та усунути можливість створення зон підвищеного зносу торкретмаси.

Краща флотація включень буде досягнута за наступних умов:

- малий обсяг так званих «мертвих» зон, в яких швидкість перемішування мінімальна;
- спрямований квазіламінарний рух потоків рідини уздовж дзеркала під час розливання;
- мінімальний рух ТІС щодо металу і не залучення їх у перемішування;
- максимальна локалізація зон підвищеної поверхневої турбулентності потоків у рідкій ванні проміжного ковша і т. п.

В якості основного методу досліджень здійснено фізичне моделювання на холодних водних моделях, яке добре себе зарекомендувало для вирішення подібних завдань у світовій практиці [3–6].

В основу холодної моделі було покладено геометричну та динамічну подоби повномасштабного проміжного ковша, який може використовуватись на сучасному металургійному мікро-заводі, і його моделі.

У будь-якій гідравлічній системі (наприклад, ківш або проміжний ківш) рівновагу між різними силами, що діють на струменевий елемент, можна описати рівнянням Нав'є-Стокса. Тривимірний потік у проміжному ковші, який функціонує в стабільному і стійкому режимі з ізотермічним ламінарним режимом течії, імпульсну рівновагу на елементарний об'єм рідкої сталі можна виразити таким безрозмірним рівнянням:

$$N_{Eu} = f(N_{Re}, N_{Fr}), \quad (1)$$

де N_{Re} та N_{Fr} – число Рейнольдса та число Фруда відповідно.

Рівняння (1), що є основним для забезпечення динамічної подоби між двома геометрично подібними системами, може точно задовольняти модельній і повномасштабній системі проміжного ковша за умови, що геометричний масштабний коефіцієнт λ ($L_{mod}/L_{f.s}$) дорівнює одиниці. Це означає, що розміри модельної і повномасштабної системи повинні бути тотожні. При дослідженнях на зменшених моделях (при $\lambda < 1,0$), наприклад, з водою в якості моделюючої рідини стає неможливим одночасне дотримання рівності для критеріїв подібності Рейнольдса і Фруда, оскільки кінематична в'язкість води і рідкої сталі практично однакові. Тим часом при протіканні турбулентних процесів у розплаві, наприклад, в проміжному ковші, перенесення імпульсу за допомогою сил молекулярного тертя вважається вторинним за ступенем важливості. Відповідно це означає, що число Фруда є домінуючим для потоків металу в проміжних ковшах машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) та машин напівбезперервного лиття заготовок (МНБЛЗ), і, отже, ці потоки регулюються переважно інерційними і гравітаційними силами, що діють на рідину.

Рівняння для рівноваги імпульсу, тотожне рівнянню (1), для умов турбулентного потоку можна представити таким чином:

$$N_{Eu} = f(N_{Re,t}, N_{Fr}), \quad (2)$$

де $N_{Re,t}$ – турбулентне число Рейнольдса.

Вираз (2) є співвідношенням інерційних і турбулентних сил тертя. Експериментальними дослідженнями, виконаними в роботі [7], показано, що в умовах турбулентного потоку величина $N_{Re,t}$ у різних проміжних ковшах, незалежно від їх конфігурації та розмірів, виявляється практично однаковою. Отже, основні умови динамічної подоби між модельним і повномасштабним проміжним ковшем, що функціонують в режимі турбулентного потоку, можна забезпечити тотожністю чисел Фруда для цих об'єктів. При цьому для дотримання умов виконання критерію Фруда необхідно забезпечувати відповідність припливу води в модельній системі Q_{mod} до швидкості припливу рідкого металу в повномасштабному проміжному ковші $Q_{f.s} \lambda^{5/2}$ [7]:

$$Q_{mod} = Q_{f.s} \cdot \lambda^{5/2}. \quad (3)$$

У представленій роботі фізичну модель проміжного ковша, включаючи основні функціональні вузли, було виготовлено зі світлопрозорого матеріалу органічного скла. Масштаб моделі склав 1:4. В якості рідини, що імітує сталь, використовувалась вода, яка має близьку до неї величину кінематичної в'язкості. Імітація ТІС на поверхні проміжного ковша забезпечувалась використанням силіконового масла, що має високий поверхневий натяг і суттєво змінює в'язкість при зміні температури.

На першому етапі були встановлені конструкції, що набули найбільшого поширення на вітчизняних металургійних підприємствах при розливанні закритим струменем. Встановлено, що подібні завдання вирішує металоприймач типу "turbostop" різних конфігурацій. Таким чином, металоприймачі, які були відібрані для проведення досліджень, представлено на рис. 1.

В основу подальших експериментів зі встановлення гідродинамічної картини витікання розплаву в проміжному ковші були покладені наступні варіанти:

- без металоприймача (№ 1);

Рис. 1. Конструкції несиметричних металоприймачів типу "turbostop", які були використані в якості базових при проведенні досліджень: а – без борту; б – з низьким бортом

Рис. 2. Ідентифікація ефективності роботи приймальної частини проміжного ковша без використання металопримача (а) та при використанні металопримача конструкції № 2 (б); № 3 (в); № 4 (г)

Рис. 3. Основні можливі варіанти руху конвективних потоків у рідкій ванні проміжного ковша без використання металопримача (а) або залежно від обраного металопримача “turbostop” конструкції № 2 (б); № 3 (в); № 4 (г): 1 – захисна труба; 2 – «мертва» зона; 3 – проміжний ківш; 4 – металопримач “turbostop”; 5 – циркуляційний потік; 6 – напрямок руху основного потоку моделюючої рідини

– несиметричний металопримач з низьким бортом, представлений на рис. 1 (б), розгорнутий в бік стакана-дозатора (№ 2);

– несиметричний металопримач з низьким бортом, встановлений дзеркально варіанту № 2 і розгорнутий в бік стінки (№ 3);

– несиметричний металопримач без борта, представлений на рис. 1 (а), і розгорнутий також в сторону стінки (№ 4).

Результати щодо ідентифікації ефективності роботи приймальної частини проміжного ковша і застійних зон представлено на рис. 2 і рис. 3 відповідно.

Характер витікання металу в однострумковому проміжному ковші без металопримача (рис. 3, а)

традиційний. Так, спостерігається інтенсивний контакт потоку, який витікає з захисної труби, з днищем проміжного ковша, що в реальних умовах буде позначатись у вигляді підвищеного зносу вогнетривів у цій зоні. Надалі, потік прямує як в сторону струменя, так і в бік найближчої вузької стінки. Виникнення великої застійної зони відбувається у верхній частині проміжного ковша лівіше металопримача.

Витікання моделюючої рідини при використанні металопримача № 2 (рис. 3, б) характеризується стабільним спрямованим рухом потоків вгору з металопримача і надалі у напрямку до стакана-дозатора. При цьому в центральній частині проміжного ковша формується великий за інтенсивністю циркуляційний

Рис. 4. Ідентифікація процесу утворення застійних зон у проміжному ковші без використання металоприймача (а) та при роботі металоприймачів «turbostop» конструкції № 2 (б); № 3 (в); № 4 (г)

потік. Встановлено, що використання металоприймача № 2 призводить до формування відразу двох великих «мертвих» зон. Перша розташовується між металоприймачем і вузькою стінкою проміжного ковша, друга – між стаканом-дозатором і лівою вузькою стінкою, доходячи аж до кордону розділу фаз силіконове масло – модельююча рідина.

Гідродинамічна картина витікання рідини в проміжному ковші при використанні металоприймача № 3 (рис. 3, в) є подібною до № 2. Основна відмінність полягає в тому, що рідинний потік прямує з металоприймача в бік найближчої вузької стінки. Ця обставина дозволяє зменшити обсяг застійної зони як між металоприймачем і стінкою, так і між стаканом-дозатором і другою вузькою стінкою.

Характер витікання модельюючої рідини при використанні металоприймача «turbostop» конструкції № 4 (рис. 3, г) носить найбільш збалансований характер серед усіх досліджуваних конструкцій. Так, потік рідини за рахунок конструктивних особливостей металоприймача направляється до вузької стінки проміжного ковша і залучає до активного перемішування весь обсяг рідини цієї зони. Надалі, він рухається безпосередньо під границею розділу шлак – метал до зони стакана-дозатора, формуючи оптимальну картину руху рідини в центральній частині проміжного ковша. У лівій частині проміжного ковша спостерігається формування «мертвої» зони.

Слід зазначити, що при виборі конструкцій № 3 та № 4 варто проводити додаткові дослідження відносно впливу циркуляційних потоків на футерування

найближчої вузької стінки та встановити оптимальну висоту борту металоприймача.

На наступному етапі проведення експерименту було зроблено спробу встановити час перетікання локального об'єму рідини з потенційно мертвої зони, яка перебувала в крайній правій $\frac{1}{4}$ обсягу проміжного ковша, в зону лівої $\frac{1}{4}$ обсягу ковша, в якій знаходиться стакан-дозатор. Для цього в зону правої $\frac{1}{4}$ для всіх досліджуваних варіантів подавались кольорові чорнила і визначався час, за який перші підфарбовані потоки досягнуть лівої вузької стінки проміжного ковша. Кінограму проведення експерименту представлено на рис. 4. Кількість замірів для кожного досліджуваного варіанту дорівнювала 5. Час перетікання визначався як середнє арифметичне.

Зокрема, час перетікання рідини в проміжному ковші без металоприймача склав 40 секунд, а при аналогічних експериментах при використанні металоприймача «turbostop» конструкції № 2 – 50 секунд; № 3 – 45 секунд; № 4 – 30 секунд. Таким чином, можна зробити висновок про те, що наявність застійної зони між металоприймачем і правою вузькою стінкою проміжного ковша збільшує час перетікання металу в зону стакана-дозатора в середньому на 35–60 %.

Висновки

В даній роботі було проведено дослідження гідродинамічної картини руху розплаву в проміжному ковші для безперервного та напівбезперервного розливання сталі в умовах металургійного мікро-заводу,

що передбачає обсяги виробництва 3–5 тис. т сталі на рік.

За результатами фізичного моделювання поведінки розплаву і формування застійних зон в однострумовому проміжному ковші встановлено, що найбільш повне залучення в перемішування рідини проміжного ковша і спрямований рух конвективних потоків уздовж дзеркала рідкої ванни досягається при використанні металоприймачів № 3 та № 4. Застосування металоприймача № 2 спричиняє утворення «мертвих» зон, сукупний обсяг яких може становити до 35 % загального обсягу моделюючої рідини.

Важливо підкреслити, що жодна з конструкцій № 3 та № 4 не є оптимальною. Їх використання не виключає можливості утворення застійної зони між стаканом-дозатором і лівою вузькою стінкою проміжного ковша. У той же час попередження її виникнення знаходиться або в площині виявлення оптимальної висоти порогу металоприймача, або може бути досягнуто при використанні додаткових конструктивних елементів (порогів, перегородок, балок і фурм для продування металу аргоном), що дозволяють виконати корекцію характеру руху потоків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дубоделов В.И., Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В., Верзилов А.П. Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литья стали. Монография. Киев: Наукова думка, 2018. 262 с.
2. Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Верзилов А.П., Ефимова В.Г. Современные промежуточные ковши для высокопроизводительных МНЛЗ. *Черная металлургия*. 2012. № 9. С. 19–27.
3. Yintian L. Physical modelling of steel flow in continuous casting tundish. *Ironmaking and Steelmaking*. 1992. № 2. P. 221–228.
4. Mazumdar D., Guthrie R.I. The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. № 3. P. 525–548.
5. Martinez R., Solis T.H. Modeling of Asymmetrical Tundishes. *Steelmaking Conference Proceedings*, 1992. P. 893–898.
6. Chiang L.K. Water Modeling of IPSCO's Slab Caster. *Steelmaking Conference Proceedings*. 1992. Vol. 75. P. 437–450.
7. Damle C.S., Sahai Y. A Criterion for Water Modeling of Non-isothermal Melt Flows in Continuous Casting Tundishes. *ISIJ International*. 1996. Vol. 36. № 6. P. 681–689.

Надійшла 22.02.2021

REFERENCES

1. Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Efimova, V.G., Kravchenko, A.V., Verzilov, A.P. (2018). Hydrodynamic and physicochemical processes in tundishes for continuous casting of steel. Monograph. Kyiv: Naukova dumka, 262 p. [in Russian].
2. Smirnov, A.N., Kravchenko, A.V., Verzilov, A.P., Efimova, V.G. (2012). Modern tundish for high performance continuous casting machines. *Ferrous metallurgy*, no. 9, pp. 19–27 [in Russian].
3. Yintian, L. (1992). Physical modeling of steel flow in continuous casting tundish. *Ironmaking and Steelmaking*, no. 2, pp. 221–228.
4. Mazumdar, D., Guthrie, R.I. (1999). The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International*, vol. 39, no. 3, pp. 525–548.
5. Martinez, R., Solis, T.H. (1992). Modeling of Asymmetrical Tundishes. *Steelmaking Conference Proceedings*, pp. 893–898.
6. Chiang, L.K. (1992). Water Modeling of IPSCO's Slab Caster. *Steelmaking Conference Proceedings*, vol. 75, pp. 437–450.
7. Damle, C.S., Sahai, Y. (1996). A Criterion for Water Modeling of Non-isothermal Melt Flows in Continuous Casting Tundishes. *ISIJ International*, vol. 36, no. 6, pp. 681–689.

Received 22.02.2021

Summary

O.M. Smirnov¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, Web of Science ResearcherID: N-1890-2017

O.P. Verzilov¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, e-mail: verzilovalex@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0463-5006>

A.V. Kravchenko², Engineer, e-mail: kravchenko.dpi@gmail.com

Yu.O. Smirnov¹, PhD in Economics, Associate Professor, Senior Research Scientist, e-mail: smirnoff.yuriy@gmail.com

A.Yu. Semenko¹, PhD (Engin.), Researcher, e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

D.I. Hoida¹, Junior Researcher, e-mail: goydadani@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4318-3084>

¹*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

²*Calderys Ukraine LLC (urban-type settlement Volodymyrivka, Ukraine)*

Physical modeling of traffic behavior and formation of stagnant zones in a single-line tundish during casting in the conditions of a metallurgical micro-mill

The research presented in this paper is aimed at choosing the optimal geometric shape of the tundish box, which must meet the conditions of work in a single-flow tundish with continuous or semi-continuous casting of high-grade or bloom billets in small metallurgical micro-mills.

The experiments based on the establishment of a hydrodynamic pattern of metal leakage in the tundish, performed on a physical cold model, were based on the following options: without tundish box (№ 1), asymmetric tundish box with low side, deployed towards the dispenser glass (№ 2), asymmetric tundish box with a low side, deployed in the direction of the nearest narrow wall (№ 3), asymmetric tundish box without side, also deployed in the direction of a narrow wall (№ 4). The best results were shown by broom tundish box deployed towards the nearest narrow wall. But it should be noted that the impact of convective and circulating flows on the lining in this area needs further research.

An attempt was also made to establish the time of flow of the local volume of liquid from the potentially dead zone, which was in the extreme right 1/4 volume of the tundish in the area of the left 1/4 volume of the tundish, which is the beaker. To do this, colored ink was fed to the area of the right 1/4 for all investigated variants and the time was determined until the first colored streams reach the left narrow wall of the tundish. As a result, the flow time of the liquid in the tundish without a tundish box was 40 seconds, and in similar experiments using a tundish box "turbostop" design № 2 – 50 seconds; № 3 – 45 seconds; № 4 – 30 seconds. It is concluded that the presence of a stagnant zone between the tundish box and the right narrow wall of the tundish increases the time of flow of metal into the zone of the tundish nozzle by an average of 35–60 %.

Keywords

Steel casting, tundish, tundish box, flow motion, heat insulating mixture, non-metallic inclusions.