

Терехов Д.А., Стоянов О.М., Галушкін М.В., Сусло Н.В., Гук Є.С.

Конструкції та аналіз роботи обладнання для подачі сталі у проміжний ківш 6-ти струмкового МБЛЗ

Terekhov D.A., Stoyanov O.M., Galushkin M.V., Suslo N.V., Huk E.S.

Design and analysis of the equipment for steel feeding into the intermediate ladle of a 6-strand continuous casting machine

Враховуючи постійно зростаючі вимоги до експлуатаційних характеристик прокату, набуває актуальності проблема підвищення якості заготовки, яка виготовлена за технологією безперервного розливання. Розглянута технологія подачі металу системи сталерозливний ківш (СРК) - відкритий струмінь - проміжний ківш (ПК) сортової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Показано процеси руху потоків металу в представленій системі. Зазначено особливості конструкції елементів сортової МБЛЗ, які забезпечують раціональне проходження металу, що розливається, в системі СРК - відкритий струмінь - ПК. Це забезпечує ефективне формування потоків сталі в приймальній камері ПК і створює умови для підвищення якості металу.

Ключові слова: проміжний ківш, якість, МБЛЗ, сталерозливний ківш, метал, моделювання

Taking into account the ever-increasing requirements for the performance characteristics of rolled products, the problem of improving the quality of billets produced by continuous casting technology is becoming increasingly important. The paper considers the technology of metal feeding of the steel pouring ladle (SPL) - open jet - intermediate ladle (IL) system of a continuous casting machine (CCM). The processes of metal flow in the presented system are shown. The design features of the elements of a long section CCM, which ensure the rational passage of the poured metal in the SRC - open jet - PC system, are indicated. This ensures the efficient formation of steel flows in the receiving chamber of the PC and creates conditions for improving the quality of the metal.

Keywords: intermediate ladle, quality, continuous casting machine, steel ladle, metal, modeling

Вступ. За постійно зростаючих вимог до експлуатаційних характеристик сталевих прокатів особливої актуальності набуває проблема підвищення якості заготовок при безперервному розливанні сталі. Найефективнішим способом розв'язання цього завдання є всебічне вдосконалення технології безперервного розливання сталі. Технічні рішення вдосконалення технології безперервного розливання сталі, як правило, полягають в першу чергу у управлінні гідродинамікою металу в проміжному ковші.

Система сталерозливний ківш (СРК) - відкритий струмінь - проміжний ківш (ПК) [1] є найважливішим технологічним елементом сортової МБЛЗ, що потребує вдосконалення технології та обладнання [2].

Під час розливання сталі ця система значною мірою визначає стабільність процесу розливання на початковому його етапі, дуже впливаючи на підвищення якості металу, що розливається, і стабільну роботу машини [2].

Метал із сталерозливного ковша у проміжний ківш надходить відкритим струменем у момент наповнення ПК [1-2]. На рис. 1 представлено компонування обладнання сортової МБЛЗ, що забезпечує проходження рідкої сталі з СРК у ПК і далі кристалізатор.

Постановка проблеми. Гідродинаміка потоків у проміжному ковші має вирішальне значення. Дані

про течію металу в проміжному ковші є основою для його вдосконалення.

Сучасний проміжний ківш МБЛЗ є металургійним агрегатом безперервної дії, головними завданнями якого є стабілізація температури рідкої сталі та видалення неметалевих включень з неї [1-4]. Способи й успішне вирішення зазначених завдань значною мірою залежать від гідродинамічних особливостей руху металу в проміжному ковші, пряме дослідження яких під час безперервного його розливання практично неможливе. Тому вибір раціональної конструкції проміжного ковша і режимів руху розплаву в ньому ґрунтується, як правило, на результатах фізичного або математичного моделювання [5-6].

Оптимальна ємність промковша визначається перерізом (шириною) заготовок, що відливаються, числом струмків, відстанню між струмками, швидкістю розливання, вимогами до можливості спливання неметалевих включень і асиміляції їх шлакоутворювальним покриттям. На величину ємності промковша впливає також і режим розливання: у разі серійного розливання ємність промковша збільшується з метою забезпечення запасу металу, необхідного для заміни сталерозливного ковша.

Як показує практика, для високошвидкісних сортових 6-ти струмкових МБЛЗ ємність промковша

© Терехов Д.А. – УДУНТ
Стоянов О.М. – УДУНТ
Галушкін М.В. – УДУНТ
Сусло Н.В. – УДУНТ
Гук Є.С. – УДУНТ

Terekhov D. – USUST
Stoyanov O. – USUST
Galushkin M. – USUST
Suslo N. – USUST
Huk E. – USUST



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>

становить, як правило, 25-30 тонн за висоти наливання металу не менше 0,7-0,8 м. Вищий рівень металу в ковші надмірно турбулізує струмінь металу, а менший робить його неорганізованим, зменшує час перебування металу в ковші і ускладнює роботу під час розливання металу серіями. Важливим критерієм вибору раціонального значення маси металу в промковші є також час перебування рідкої сталі в ньому, тобто так званий «резидентний» час. Значення цього показника зазвичай вибирається на рівні 8-10 хвилин.

Наявність шлаку в проміжному ковші створює небезпеку потрапляння його в кристалізатор. Тому для запобігання утворенню лійок під час витікання металу в проміжному ковші, особливо під час зміни сталерозливних ковшів, необхідно мати запас металу заввишки не менше 250...300 мм.

Сталь надходить у приймальну камеру проміжного ковша з СРК відкритим струменем у початковий період розливання, при відкритті СРК [1]. При цьому можна виділити два режими руху сталі:

– момент відкриття впускного отвору (на початку розливання сталерозливного ковша), коли одночасно з металом переміщується пісок засипки з розливного отвору СРК. При цьому в розливному отворі СРК, у початковий момент розливання, перебувають частини скоринки спеченої засипки і настили металу, призводить до вихроутворення в струмені металу, і до дефекту типу «віяло» в структурі відкритого струменя металу, що створює аварійну ситуацію на початку розливання;

– сталий режим потоку відкритого струменя. У цьому випадку інтенсивно розмивається бічна поверхня ПК, захищена торкретмасою і основний бетон стінки ковша. Це може призвести: до порушення цілісності бічної поверхні ПК у приймальній камері; аварійної ситуації. Важливо визначити, з урахуванням полів швидкостей: раціональні форми приймальної камери, висоту борту ПК, конструкцію захисту дна ковша.

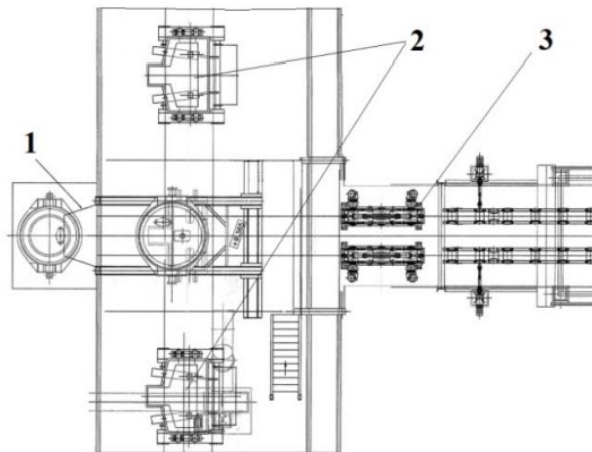


Рис. 1. Компонування сортової МБЛЗ:

1 - стелд сталерозливного ковша; 2 - ПК машини; 3 - зона вторинного охолодження

Мета даної роботи - проведення моделювання наповнення проміжного ковша МБЛЗ перед початком розливання сталі на МБЛЗ №1 ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Мета моделювання будь-якого промислового процесу це змодельовати фізику, що лежить в основі процесу, так, щоб можна було визначити важливі параметри процесу та управляти ними, одержуючи при цьому значний прибуток.

Для моделювання процесу заповнення проміжного ковша важливими параметрами, які необхідно враховувати в першу чергу є:

- гідродинамічні фактори, що впливають на процес початку та перебігу процесу розливання на машині безперервного розливання заготовок (МБЛЗ);
- плин рідкого металу і живлення струмків;
- тепломасообмінні процеси, які відбуваються в проміжному ковші.

Якщо процес заповнення проміжного ковша пра-

вильно промодельований, можуть бути передбачені гідродинамічні фактори що впливають на процес початку та перебігу процесу розливання МБЛЗ. Може бути промодельований вплив на плин рідкого металу і живлення струмків або інших змінних процесу. Кількість дослідницьких заливань рідкого металу може бути значно зменшена й використана в основному для підтвердження концепції.

Модель системи для аналізу процесу розливання зі сталерозливного ковша у проміжний ківш відкритим струменем.

Під час складання моделі використано такі рівняння: як рівняння, що описує рух рідини в області моделювання, приймаємо рівняння Нав'є-Стокса для нестационарних потоків рідини (рідкого металу), нерозривності потоку.

Геометрія моделі визначається компонуванням обладнання розливного отвору СРК і розташуванням обладнання ПК щодо струменя рідкої сталі. Масштаб моделі становив 1:1.

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} \\ \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Де $\vec{u}$ - вектор швидкості рідини; $\vec{F}$ - вектор об'ємних сил; p - тиск рідини; ∇p - градієнт тиску; ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості; $\nabla^2 \vec{u}$ - лапласіан $\vec{u}$; ρ - густина сталі.

Вектор об'ємних сил з урахуванням діючого гравітаційного поля землі визначається в обраній системі координат як

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \cdot g \end{bmatrix} \quad (2)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Припущення про постійну густину металу ρ може бути зроблено для розливних пристроїв системи ПК-К у випадках, коли різниця температур рідини не надто велика.

При розрахунку турбулентних течій металу в системі використовували $(k - \epsilon)$ -модель турбулентної в'язкості [1, 6]. При цьому вважали, що на підставі гіпотези Буссінеска коефіцієнт в'язкості, що входить до рівнянь Нав'є-Стокса, включає молекулярну в'язкість μ і турбулентну в'язкість μ_t . У математичній моделі процесу розливання металу було зроблено такі припущення:

– вважаємо, що модельований процес протікає в об'ємі, обмеженому контуром області моделювання;

– рідина є в'язкою та нестисливою;

– моделюємо процес розливання із СРК відкритим струменем;

– швидкість витікання рідини зі сталерозливного ковша в проміжний ківш є постійною і заданою.

Математичне моделювання здійснювали з урахуванням початкових і граничних умов [1]. Початкові умови доповнюють рівняння (1): температура металу в проміжному ковші $1536 \div 1551$ °С, швидкість витягування заготовки $1,2 \dots 1,4$ м/хв, динамічна в'язкість сталі $0,006$ Па·с.

Розрахункова сітка та граничні умови

Кожну модель ділили на кінцеві елементи. Кількість елементів варіювали залежно від компонування обладнання приймальної камери ковша [4].

На вході розрахункової області системи (розливний отвір сталерозливного ковша) задають початкову швидкість потоку металу, для перерізу заготовок $\varnothing 170$ мм, швидкість дорівнюватиме:

$$\vec{u}_0 = 0,667 \text{ м/с}$$

де $\vec{u}_0$ – вектор початкової швидкості металу на вході в ПК, м/с.

На рідку сталь, що знаходиться поблизу твердих поверхонь (стінок), діє пристінкове прилипання

$$\vec{u} = 0 \quad (3)$$

Цю граничну умову встановлюють на всі внутрішні стінки поверхні ПК, розливного отвору СРК.

Уздовж площини симетрії, що проходить через вісь центру ПК, задається умова

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0,$$

де $\vec{n}$ - орт, перпендикулярний до вільної поверхні або площини симетрії.

На вільній поверхні - дзеркало металу в ПК задається умова прилипання

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0. \quad (4)$$

На виході розрахункової області доцільно задавати тиск рідини, як правило, нульовий:

$$p = p_0 = 0 \text{ Па.}$$

Результати моделювання потоків металу в системі

Під час подання результатів чисельного моделювання [1] як параметри течії будуть прийняті поля швидкостей у струмені металу, що переміщається з СРК у приймальну камеру ПК.

На рис. 2 наведено поля швидкостей струменів металу в поперечному перерізі відкритого струменя металу, що надходить у приймальну камеру проміжного ковша із СРК.

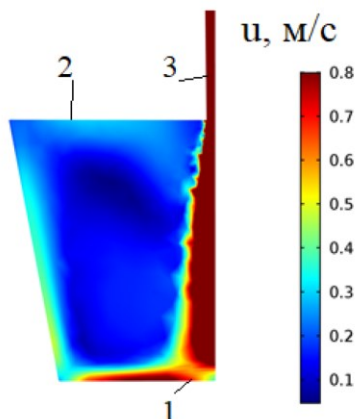


Рис. 2. Поля швидкостей потоків сталі в поперечному перерізі комплексу струменів металу - проміжний ківш: 1 - дно проміжного ковша; 2 - поверхня рідкого металу в ПК; 3 - відкритий струмінь металу з СРК

Аналіз результатів моделювання привів до таких висновків:

1) у приймальній камері ПК, під час розливання відкритим струменем із СРК, спостерігаються потоки металу зі швидкістю, більшою від допустимої (0,13 м/с) [1], що призводить до інтенсивного захвату НВ на поверхні розділу шлак - сталь приймальної камери ПК МБЛЗ і подальшого затягування НВ у метал, а також оголення дзеркала металу в приймальній камері ПК;

2) найбільші швидкості потоків металу за номінального розливу виявлено в місцях виходу бічних

стінок ковша в районі дна і стику дно - борт проміжного ковша.

Для порівняння відповідності математичного моделювання до реального технологічного процесу наповнення проміжного ковша МБЛЗ (рис.3) була створена 3D модель 6-ти струмкового проміжного ковша в масштабі (1:1) та за допомогою програмного комплексу NOVAFLOW & SOLID CV 4.6R4 проведено моделювання.

Порівняння моделей по наповненню проміжного ковша за умов відкриття на 18т та 6т (рис.4), а також фактичні швидкості розливання із швидкостями на підставі моделювання представлені на рис.5-8.

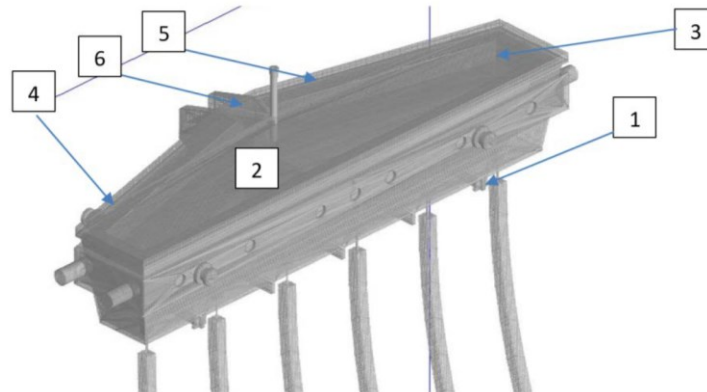


Рис.3. Розроблена 3D модель 6-ти струмкового проміжного ковша МБЛЗ: 1 - система гніздовий блок – стакан колектор (верхній та нижній); 2 – метало -приймач; 3 - вогнетривкий шар; 4 – торкрет маса; 5 – кришка проміжного ковша (зображена умовно); 6 - захисна труба маніпулятора.

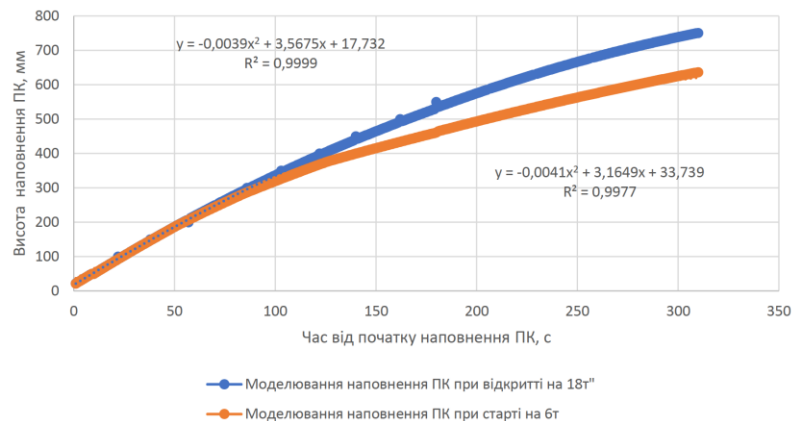


Рис.4 Порівняння фактичних даних по наповненню ПК з даними моделювання



Рис.5. Порівняння фактичної швидкості розливання струмка №6 з даними моделювання



Рис.6 Порівняння фактичної швидкості розливання струмка №1 з даними моделювання

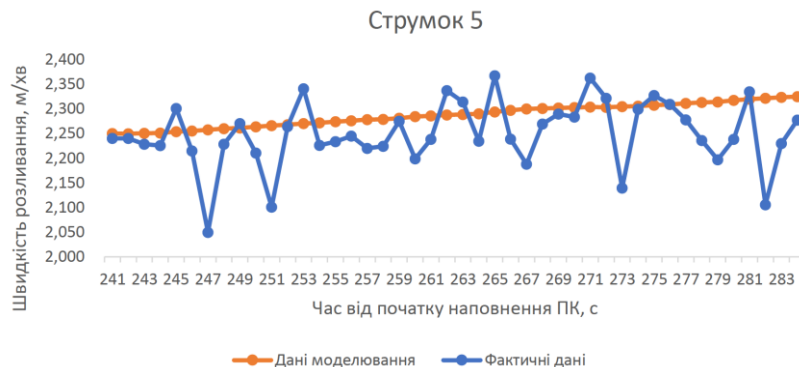


Рис.7 Порівняння фактичної швидкості розливання струмка №5 з даними моделювання



Рис.8 Порівняння фактичної швидкості розливання струмка №2 з даними моделювання

Дані приведені на рис.4-8 мають високий ступень збігу фактичних даних з даними моделювання. Окремі піки в фактичних даних є результатом відсутності функцій згладжування яка притаманна для обраної програми моделювання та впливу системи керування рівнем металу в залежності від рівня наповнення кристалізатору металом під час розливання. Також на дані відхилення можуть впливати нестабільні потоки металу в проміжному ковші під час витоку металу із сталерозливного ковша в проміжний ківш через захисну трубу.

Дані наведені на рисунках отриманні за умов стандартної роботи МБЛЗ, коли захисна труба встановлюється перед відкриттям шибера заводу сталерозливного ковша та не знімається для пропалювання киснем.

Висновки

Аналіз особливостей роботи системи СРК - відкритий струмінь - ПК сортової МБЛЗ показав:

– специфіку наповнення відкритим струменем проміжного ковша сортової машини і полів швидкостей у приймальній камері ковша. Виявлено наявність високих швидкісних потоків біля стінок приймальної камери ковша, що призводить до розмивання захисту дна проміжного ковша і торкрет-маси;

– щоб ефективно виключати вплив потоків рідкого металу на бічну поверхню ковша на початку процесу розливання, застосовуються додаткові вогнегасні засоби, такі як необхідно застосовувати додаткові вогнетривкі вироби для дна приймальної камери сортової МБЛЗ з бічним захистом борту ковша. Це сприятиме: зниженню розмиву борту ПК; виключенню аварійних ситуацій під час розливання сталі на МБЛЗ; стабільності процесу безперервного розливання; підвищенню якості рідкої сталі, що розливається, завдяки зменшенню кількості НВ, які випадають з ПК у кристалізатор;

– моделювання гідродинамічних процесів розливання сталі через проміжний ківш з використан-

ням програми NOVAFLOW & SOLID CV 4.6R4 можливо з високим ступенем кореляції теоретичним та фактичних даних.

Перелік посилань

1. Смирнов А. Н., Пилюшенко В. Л., Минаев А. А. и др. Процессы непрерывной разливки. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. Смирнов А. Н., Глазков А. Я., Пилюшенко В. Л. и др. Теория и практика непрерывного литья заготовок. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – 371 с.
3. Numerical Modelling of Dissipation Phenomena inside a New Ladle Shroud for Fluidynamic Control and its Effect on Inclusion Removal in a Slab Tundish / G. Solorio-Diaz, R. D. Morales, J. de J. Barreto-Sandoval [et al.] // *Steel Research International*. 2014. Vol. 85. № 5. – P. 863–874. <https://doi.org/10.1002/srin.201300224>
4. Mathematical Modeling of Inclusions Deposition at the Upper Tundish Nozzle and the Submerged Entry Nozzle / Enif Gutiérrez, Saul GarciaHernandez, José de Jesús Barreto [et al.] // *Steel research international*. 2016. Vol. 87. № 11. –P. 1406–1416. <https://doi.org/10.1002/srin.201500422>
5. Вдовин, К. Н. Технологии управления потоками стали и разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, Виктор В. Точилкин // *Новые огнеупоры*. – 2016. – № 2. – С. 3–5.
6. Vdovin, K.N., Marochkin, O.A. & Tochilkin, V.V. Creating a Stream Simulator to Improve the Wear Resistance of Refractories During the Casting of Steel on Continuous Section Casters. *Refract Ind Ceram* 54, 435–437 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11148-014-9628-9>

References

1. Smirnov, A. N., Piliushenko, V. L., Minaev, A. A. et al. (2002). *Protsessy nepreryvnoi razlivki*. DonNTU.
2. Smirnov, A. N., Glazkov, A. IA., Piliushenko, V. L. et al. (2000). *Teoriia i praktika nepreryvnogo litia zagotovok*. DonGTU.
3. Solorio-Diaz, G., Morales, R. D., Barreto-Sandoval, J. de J., et al. (2014). Numerical modelling of dissipation phenomena inside a new ladle shroud for fluidynamic control and its effect on inclusion removal in a slab tundish. *Steel Research International*, 85(5), 863–874. <https://doi.org/10.1002/srin.201300224>
4. Gutiérrez, E., Hernandez, S. G., Barreto, J. de J., et al. (2016). Mathematical modeling of inclusions deposition at the upper tundish nozzle and the submerged entry nozzle. *Steel research international*, 87(11), 1406–1416. <https://doi.org/10.1002/srin.201500422>
5. Vdovin, K. N., Tochilkin Vasilii V., & Tochilkin Viktor V. (2016). Tekhnologii upravleniia potokami stali i razrabotka огнеупорных konstruktsii dlia promezhutochnogo kovsha chetyrekhruchevoi MNLZ. *Novye огнеупоры*, (2), 3–5.
6. Vdovin, K.N., Marochkin, O.A. & Tochilkin, V.V. (2014). Creating a stream simulator to improve the wear resistance of refractories during the casting of steel on continuous section casters. *Refract Ind Ceram.*, 54, 435–437. <https://doi.org/10.1007/s11148-014-9628-9>

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 05.12.2023
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.02.2024