
ГІДРОДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

УДК 621.74.047

О. П. Верзілов, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: verzilovalex@gmail.com

А. Ю. Семенко, канд. техн. наук, мол. наук. співр.

Ю. Ю. Куліш, мол. наук. співр., e-mail: deatherob@gmail.com

Л. І. Гойда, технік I кат., e-mail: goydadani@gmail.com

Г. Р. Верзілова, пров. інженер

Д. С. Васильєв*, аспірант

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

*Одеський національний політехнічний університет (Одеса, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВНУТРІШНЬОГО ДІАМЕТРА ТА ГЛИБИНИ РОЗТАШУВАННЯ ЗАНУРЕНОГО СТАКАНА У КРИСТАЛІЗАТОРІ РАДІАЛЬНОЇ СОРТОВОЇ МБЛЗ

Вивчено проблематику оптимізації параметрів лиття при розливанні сортової заготовки високої якості безперервнолитим способом. Проведено дослідження впливу внутрішнього діаметра та глибини розташування зануреного стакану у кристалізаторі радіальної сортової (МБЛЗ). В основу досліджень взято конструкцію проточного зануреного стакану в умовах роботи кристалізатора сортової МБЛЗ ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», глибина розташування зануреного стакану в діапазоні від 60 до 180 з кроком 20 мм, діаметри порожнини зануреного стакану – 28, 32, 36 мм. В результаті досліджень встановлено, що використання зануреного стакану з внутрішнім діаметром 28 мм можливо в тому випадку, якщо глибина його занурення знаходиться в діапазоні від 80 до 100 мм. Варіювання глибини заглиблення в цій межі істотно не змінює характер розподілу потоків. Струмінь носить чітко сформований спрямований характер і знаходиться в достатній відстані від стінок кристалізатора. Використання зануреного стакану з внутрішнім діаметром 36 мм ускладнено в зв'язку з тим, що струмінь на всіх глибинах занурення стакану носить несформований характер і притискається до більшого радіусу. Внаслідок чого можливе підмивання затверділої коринки металу і існує ймовірність утворення проривів. Однак, виявлено глибину занурення стакану 100 мм, яка задовольняє вимогам, необхідним для отримання сортової заготовки високої якості. Конвективний потік виходить з зануреного стакану, проникає в рідку фазу на допустиму величину, а швидкості під дзеркалом металу не створюють умов для розвитку процесів хвиле- та вихроутворення і захоплення ШУС. Застосування зануреного стакану з внутрішнім діаметром 32 мм є найбільш виправданим. При його використанні можлива зміна глибини в найбільш широкому діапазоні від 80 до 120 мм, яка істотно не змінить співвідношення розподілу турбулентних потоків. Струмінь носить цілісний характер і знаходиться на безпечній відстані від стінок кристалізатора, кінетична енергія струменя встигає розсіятися до горизонту кристалізації, не створюючи передумов для підмивання коринки металу по осі кристалізатора, а швидкості в зоні меніска входять в допустиму норму.

Ключові слова: сортова машина безперервного розливання сталі, занурений стакан, кристалізатор, математичне моделювання, глибина занурення.

Одним з основних конструктивних елементів, який визначає якість сортової продукції, є кристалізатор, в якому відбуваються процеси перемішування металу, утворення твердої фази і її охолодження. Конструкція зануреного стакану і його положення в кристалізаторі істотно впливають на характер розподілу конвективних потоків у рідкій фазі.

З огляду на той факт, що типовими перетинами сортової заготовки на заводах України є квадрати зі сторонами 100 і 150 мм, а діаметр зануреного стакану становить 28–36 мм, можна говорити про те, що навіть при незначному відхиленні струменя від осі симетрії відбувається істотне порушення симетрії руху потоків безпосередньо в кристалізаторі. При цьому інтенсивність перемішування розплаву в периферійних зонах зростає в 5–10 разів, що є однією з основних причин нерівномірного зростання твердої коринки і її розмивання по окремих гранях. Для виключення можливості підмивання коринки в периферійних зонах занурений стакан занурюють глибше в кристалізатор, однак при надмірному зануренні розливного стакану створюються передумови до розмивання твердої коринки в осьовій частини кристалізатора. У свою чергу, піднімаючи занурений стакан, стає можливим протікання процесів хвиле - та вихроутворення на дзеркалі металу [1, 2]. Відповідно проблематика оптимізації параметрів лиття при розливанні на МБЛЗ сортової заготовки високої якості видається актуальною і має важливе значення для промисловості.

Також в зв'язку з тим, що експлуатаційний ресурс занурених стаканів досить низький і виведення їх з експлуатації дуже часто обумовлюється ерозійним зносом в зоні шлакового пояса, автори поставили мету виявити діапазон розташування зануреного стакану, в якому характер руху потоків істотно не буде відрізнятися від оптимального.

В основу досліджень взято конструкцію проточного зануреного стакану в умовах роботи кристалізатора сортової МБЛЗ ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (рис. 1).

У зв'язку з тим, що фізичне моделювання пов'язане з рядом труднощів: великі часові витрати, капітальні вкладення на будівництво моделі, неможливість швидкої зміни декількох робочих параметрів, дані дослідження виконували використовуючи методи математичного моделювання [3, 4].

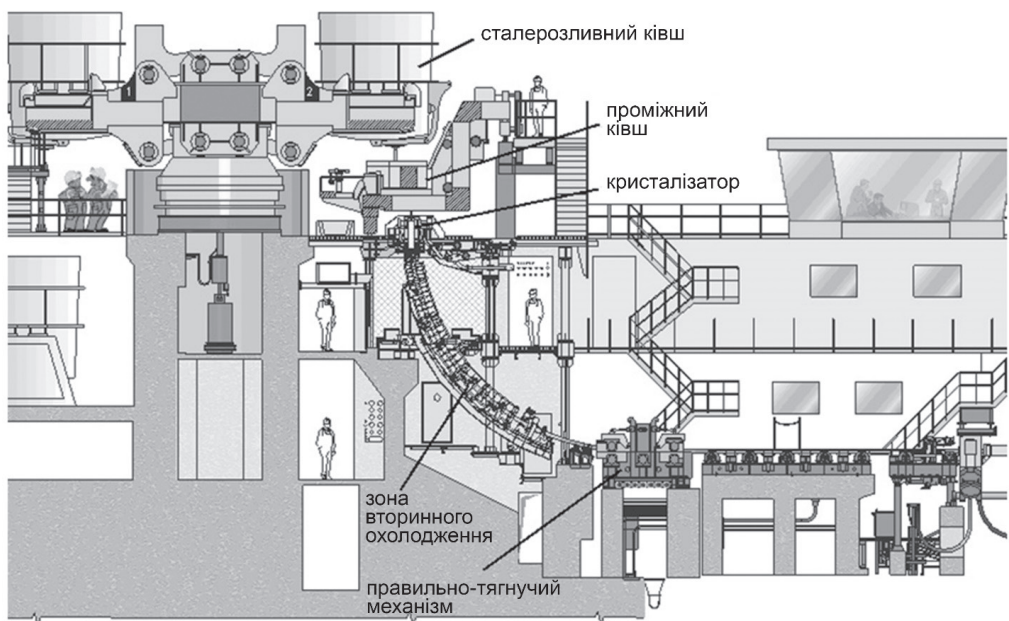


Рис. 1. Загальна схема типової радіальної МБЛЗ

Розробку математичної моделі сортового кристалізатора і зануреного стакану виконано з використанням прикладного пакету Ansys, що реалізує метод кінцевих елементів в рамках модуля Flotran. Даний метод включає в себе наступні етапи: створення геометричної моделі розрахункової області, завдання типу кінцевих елементів, генерація звичайно-елементної сітки, вибір типу розв'язуваної задачі, завдання властивостей рідкої сталі, а також завдання навантажень і граничних умов. Для опису рідинного середовища використовували три методики: визначення щільності, що змінюється, в квазіоднофазній або однофазній системі; двофазний підхід Ейлера і двофазний підхід Лагранжа-Ейлера. В основу моделі покладено такі дані промислової машини як: перетин кристалізатора 150x150 мм; довжина кристалізатора 1000 мм; радіус кристалізатора 7,0 м (по великому радіусу); швидкість витягування заготовки 3,0 м/хв.; перетин стакану-дозатора діаметрами 28, 32, 36 мм; глибина розташування зануреного стакану 60–180 мм (крок 20 мм).

При створенні математичної моделі прийнято наступні допущення: вплив зворотньо-поступального руху не враховувався; впливом розташованої на дзеркалі шлакоутворюючої суміші (ШУС) нехтували.

В якості розрахункової області при створенні геометричної моделі прийнято внутрішній обсяг зануреного стакану і кристалізатора, який був зайнятий рідкою сталлю. Після цього в модулі Flotran обрано тип кінцевих елементів 3D FLOTTRAN 142, який застосовувався в тривимірній постановці завдання. Генерацію кінцево-елементної сітки проводили в такий спосіб: для кожної лінії, що утворює розрахункову область, в ручному режимі задавали кількість поділів, відповідних числу елементів; в окремих випадках використовували довільне розбиття на кінцеві елементи. В результаті цього сформовано кінцево-елементну модель розрахункової області, що містить понад 500 тис. вузлів (рис. 2, а). Розрахунки виконували в постановці термічної, нестационарної задачі для нестисливої рідини з турбулентним плином. Кількість ітерацій, використовуваних при вирішенні системи рівнянь, прийнято рівною 50.

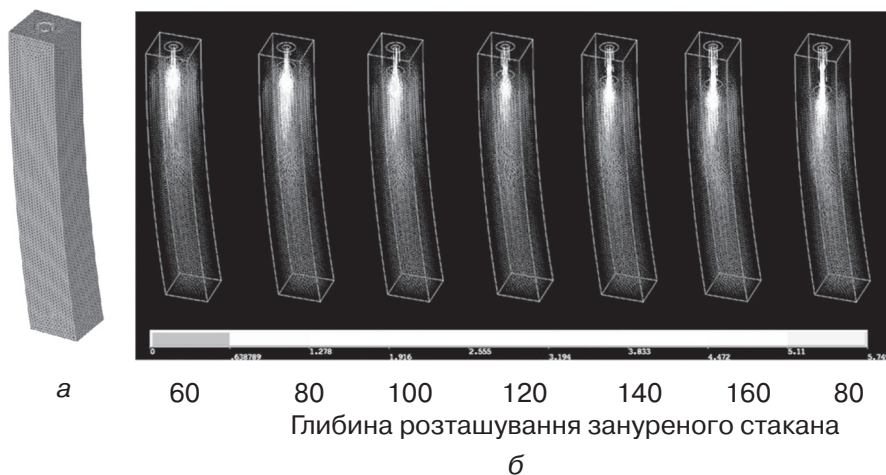


Рис. 2. Вид кінцево-елементної тривимірної розрахункової області кристалізатора і зануреного стакану (а) та векторна діаграма швидкостей при використанні зануреного стакану з внутрішнім діаметром 28 мм

Витікання рідкої сталі в кристалізаторі розглядали як просторовий сталий потік. В якості навантажень і граничних умов для даного завдання гідродинаміки виступили: швидкості руху потоків (м/с); температура металу (К); теплові потоки ($\text{Вт}/\text{м}^2$); коефіцієнти конвективної тепловіддачі (передачі) ($\text{Вт}/\text{м}^2$); тиск (Па) і ін. Для кожного з розрахованих параметрів задавали методи вирішення системи рівнянь і похибку для пошуку їх збіжності. Після чого автоматично виконано рішення систем рівнянь для кожного часового кроку.

Гідродинаміка процесів лиття

Для всієї області обчислень застосували наступні граничні умови: швидкість потоку на вході в канал зануреного стакану задається відповідно масовій витраті металу на виході з кристалізатора; на виході з отворів зануреного стакану масова витрата відповідає витраті його на вході; тиск в зануреному стакані приймає постійним.

Результатами розрахунку були значення векторів швидкості (рис. 2, б) і сумарної швидкості потоків, температури, теплового потоку в кожній вузловій точці розрахункової області для кожного часового кроку, представлені у вигляді векторних або контурних діаграм. Так, модель дозволяє вивчити картину розподілу потоків по перетину сортового кристалізатора, виявити оптимальний діапазон зміни глибини розташування зануреного стакану, розглянути поведінку конвективних потоків залежно від внутрішнього діаметра зануреного стакану. Загальна картина результатів математичного моделювання для глибин розташування зануреного стакану: 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 мм і діаметрів внутрішнього контуру зануреного стакану: 28, 32, 36 мм, представлена на рис. 3.

Детально проаналізувавши графічні дані, слід зазначити, що, із збільшенням внутрішнього діаметра прямооточного зануреного стакану, глибина проникнення струменя зменшується, а форма струменя, в свою чергу, зі збільшенням внутрішнього

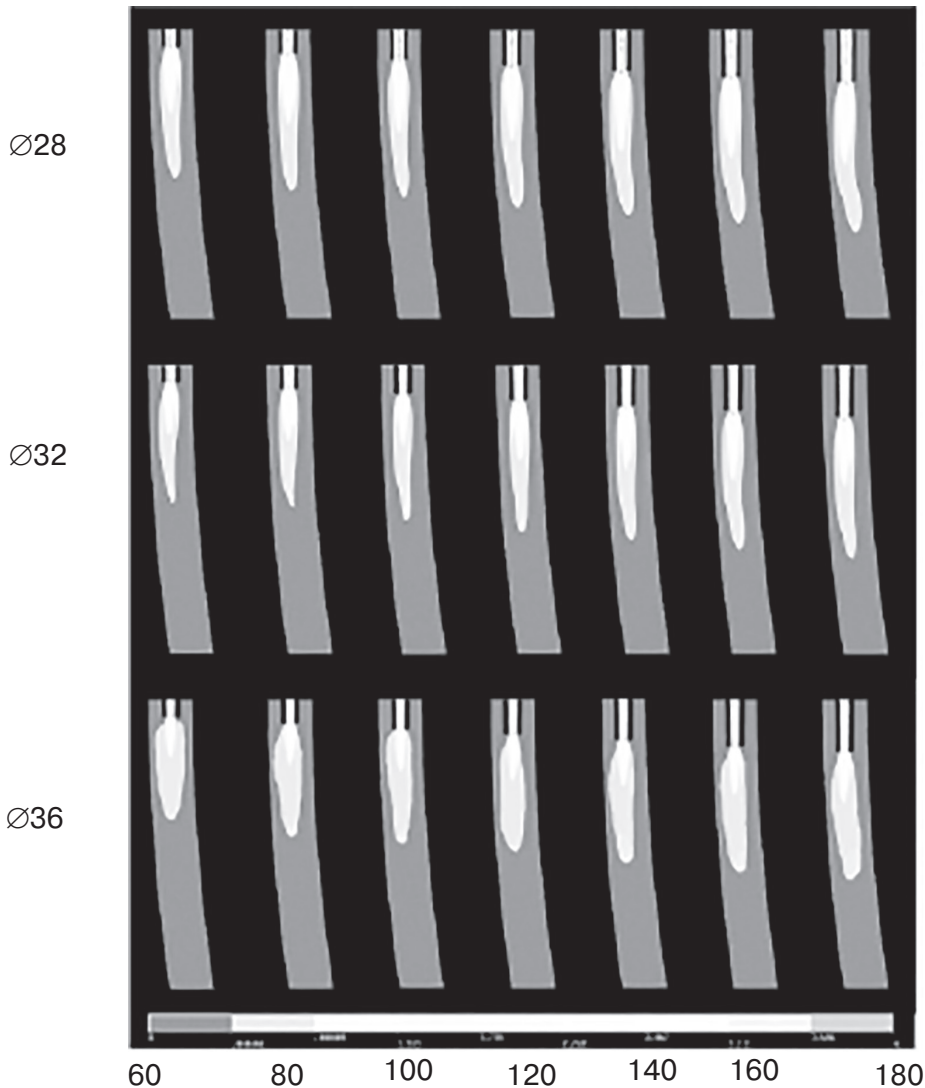


Рис. 3. Поля швидкостей по перетину кристалізатора при різному внутрішньому діаметрі і глибині розташування зануреного стакану (градієнт 9)

діаметра зануреного стакану, носить все менш сформований характер. Це пов'язано із зменшенням швидкості потоку, який надходить в занурений стакан внаслідок збільшення його внутрішнього діаметра при незмінній масовій витраті. Із збільшенням глибини розташування зануреного стакану глибина проникнення струменя відповідно збільшується.

Струмінь металу, що витікає із зануреного стакану з внутрішнім діаметром 28 мм, носить чітко спрямований сформований характер. Однак при глибинах занурення від 120 до 180 мм можуть виникнути передумови для розмивання твердої коринки як в центральній частині кристалізатора, внаслідок надмірного заглиблення струменя металу, так і в периферійній лівій частині заготовки, внаслідок блукаючого характеру струменя (струмінь притискається до більшого радіусу). Неметалеві включення, що потрапили до кристалізатора з проміжного ковша, з великою часткою ймовірності, повністю перейдуть в готову сталь. Глибини розташування зануреного стакану 80 і 100 мм показали себе з найкращого боку для стакану з внутрішнім діаметром 28 мм. У цих випадках конвективний потік носить сформований характер, знаходиться на допустимій відстані від стінок кристалізатора і не притискається до більшого радіусу, що не створює передумов для підмивання твердої коринки по периферії заготовки, а турбулентна кінетична енергія струменя встигає розсіятися, не доходячи до коринки металу в середній частині сортової заготовки. При глибині занурення стакану 60 мм можливим стає розвиток процесів хвиле- та вихроутворення на кордоні шлак–метал, так як сам струмінь починає залучати до рідкої фази частинки ШОС. Як наслідок, можливе погіршення якості готової продукції.

Динаміка витікання металу з зануреного стакану діаметром 36 мм має дещо інший характер. Високошвидкісний конвективний потік, що виходить із зануреного стакану «розпушується» і займає до 80 % площі в горизонтальному перетині, розташованому на відстані 50 мм від нижньої межі зануреного стакану, в той час як для стакану з внутрішнім діаметром 28 мм ця величина складає до 55 %. Прийнятною глибиною розташування зануреного стакану в цьому випадку є глибина 100 мм. Турбулентний потік, що виходить із зануреного стакану, не носить чітко сформованого характеру, проте знаходиться на допустимій відстані від стінок кристалізатора і має оптимальну глибину проникнення, при якій кінетична енергія струменя встигає розсіятися до зіткнення з твердою фазою. У випадках занурення 60 і 80 мм в області меніска спостерігаються високі швидкості руху металу, які створюють умови для розвитку процесів хвилеутворення і залучення ШУС. При зануренні стакану на рівні 120–180 мм кінетична енергія не встигає розсіятися і існує ймовірність підмивання твердої фази по осі кристалізатора, неметалеві включення, які потрапили з проміжного ковша, в цьому випадку, повністю перейдуть в готову продукцію.

Занурений стакан діаметром 32 мм є проміжним за характером витікання металу між стаканами з внутрішніми діаметрами 28 і 36 мм і найбільш придатними для розливання сортової заготовки високої якості. При його використанні спостерігається найбільш стабільна картина турбулентності практично на всіх глибинах занурення. Зміна величини розташування зануреного стакану в діапазоні від 80–120 мм істотно не змінює картину розподілу потоків і є оптимальною в умовах роботи кристалізатора ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат». Струмінь знаходиться на безпечній відстані від стінок кристалізатора і носить цілісний спрямований характер, кінетична енергія струменя встигає розсіятися до горизонту кристалізації, а швидкості в зоні меніска входять в допустиму норму. При глибинах занурення 140–180 мм потоки сталі, що мають велику кінетичну енергію, з великою часткою ймовірності розмиють коринку затверділого металу. Тим самим, створюючи умови для виникнення проривів. Також досить велика ймовірність переходу неметалевих включень в готову сортову заготовку. Глибина розташування зануреного стакану 60 мм також не є оптимальною, тому що внаслідок високої швидкості на кордоні шлак-метал створюються передумови до виникнення стоячих хвиль в зоні меніска, що може негативно позначитися на якості готової продукції.

Таким чином, в ході дослідження роботи кристалізатора сортової МБЛЗ ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», залежно від двох змінних параметрів: глибини занурення і внутрішнього діаметра зануреного стакану, зроблено наступні висновки:

1. Використання зануреного стакану з внутрішнім діаметром 28 мм можливо в тому випадку, якщо глибина його занурення знаходиться в діапазоні від 80 до 100 мм. Варіювання глибини заглиблення в цій межі істотно не змінює характер розподілу потоків. Струмінь носить чітко сформований спрямований характер і знаходиться на достатній відстані від стінок кристалізатора. Кінетична енергія встигає розсіятися не доходячи до фронту кристалізації, що не створює передумов до підмиву коринки затверділої сталі.

2. Використання зануреного стакану з внутрішнім діаметром 36 мм ускладнено в зв'язку з тим, що струмінь на всіх глибинах занурення стакану носить несформований (розпушений) характер і притискається до більшого радіусу. Внаслідок чого можливе підмивання затверділої коринки металу і існує ймовірність утворення проривів. Однак авторами виявлено глибину занурення стакану – 100 мм, яка задовольняє вимогам, необхідним для отримання сортової заготовки високої якості. Конвективний потік виходить з зануреного стакану проникає в рідку фазу на допустиму величину, а швидкості під дзеркалом металу не створюють умов для розвитку процесів хвиле- та вихроутворення і захоплення ШУС.

3. Застосування зануреного стакану з внутрішнім діаметром 32 мм є найбільш виправданим в умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат». При його використанні можлива зміна глибини в найбільш широкому діапазоні від 80 до 120 мм, яка істотно не змінить співвідношення розподілу турбулентних потоків. Струмінь носить цілісний характер і знаходиться на безпечній відстані від стінок кристалізатора, кінетична енергія струменя встигає розсіятися до горизонту кристалізації, не створюючи передумов для підмивання коринки металу по осі кристалізатора, а швидкості в зоні меніска відповідають допустимій нормі.

Список літератури

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: «Наукова думка», 2018.
2. Smirnov, A. N., Kuberskii, S. V., Smirnov, E. N., Verzilov, A. P., Maksaev, E. N. Influence of meniscus fluctuations in the mold on crust formation in slab casting. *Steel in Translation*, 2017, no 47, 478–482.
3. Смирнов А. Н., Кравченко А. В., Верзилов А. П. Совершенствование методов моделирования и оптимизация параметров систем дозирования стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. *Наукові праці ДонНТУ: Металургія*. Вип. 13 (194). 98–107.
4. Шипельников А. А., Роговский А. Н., Бобылева Н. А., Скаков С. В. Современные проблемы и перспективы развития компьютерного моделирования движения расплава в промежуточном ковше и кристаллизаторе МНЛЗ. *Известия Высших Учебных Заведений: Черная Металлургия*. 2019; 62(5):374-380. URL: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-374-380>

Надійшла 22.04.2020

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: Naukova Dumka, [in Russian].
2. Smirnov, A. N., Kuberskii, S. V., Smirnov, E. N., Verzilov, A. P., Maksaev, E. N. (2017) Influence of meniscus fluctuations in the mold on crust formation in slab casting. *Steel in Translation*, no. 47, 478–482.
3. Smirnov, A. N., Kravchenko, A. V., Verzilov, A. P. Improvement of modeling methods and optimization of parameters of steel batching systems in the mold of slab continuous casting machine. *Наукові праці ДонНТУ. Metallurgy*, v. 13 (194), 98–107 [in Russian.]

4. Shipelnikov, A. A., Rogotovskiy, A. N., Bobyleva, N. A., Skakov, S. V. (2019) Current problems and prospects for the development of computer simulation of melt motion in the intermediate ladle and mold of continuous casting machine. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii: Ferrous metallurgy*, 2019; 62 (5): 374-380. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-374-380> [in Russian].

Received 22.04.2020

A. P. Verzilov, PhD (Engin.), Senior Research Scientist,
e-mail: verzilovalex@gmail.com

A. Yu. Semenko, PhD (Engin.), Junior Research Scientist

Yu. Yu. Kulish, Junior Research Scientist, e-mail: deatherob@gmail.com

D. I. Goyda, Engineer 1 kat.

A. R. Verzilova, Leading Engineer

D. S. Vasiliev*, Postgraduate

Institute of Physics and Technology of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

*Odessa National Polytechnic University (Odessa, Ukraine)

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE INNER DIAMETER AND THE DEPTH OF PLACEMENT OF THE SEN IN THE MOLD OF RADIAL BILLET CCM

Problems of optimization of casting parameters during casting of high quality varietal billet in a continuous way were studied. The influence of the inner diameter and the depth of the SEN in the mold of the radial CCM have been carried out. The basis of the research was the construction of a flowing SEN in the conditions of operation of the mold of CCM PJSC "Dnipro Metallurgical Plant", depth of placement of the SEN in the range from 60 to 180 mm in 20 mm increments, and diameters of the SEN cavity 28, 32, 36 mm. As a result of researches it is established that the use of SEN with an inner diameter of 28 mm is possible if its immersion depth is in the range of 80 to 100 mm. Variation of the depth of the recess in this limit does not significantly change the nature of the flow distribution. The jet has a clearly formed directional character and is at a sufficient distance from the walls of the mold. The use of SEN with an internal diameter of 36 mm is complicated by the fact that the jet at all depths of submergence of the beaker is unformed and pressed to a greater radius. As a result, it is possible to flush out the hardened crust of the metal and there is a likelihood of breakouts. However, one glass immersion depth was found, 100 mm, which satisfies the requirements necessary to obtain a high-quality billet. The convective flow coming out of the SEN penetrates into the liquid phase by an acceptable value, and the velocities under the metal mirror do not create conditions for the development of wave- and vortex-forming. The use of the SEN with an internal diameter of 32 mm is most justified. When used it is possible to change the depth in the widest range from 80 to 120 mm, which will not significantly change the ratio of distribution of turbulent flows. The jet is integral and is at a safe distance from the walls of the mold, the kinetic energy of the jet manages to dissipate to the horizon of crystallization without creating prerequisites for washing the crust of the metal along the axis of the mold, and velocities in the meniscus zone are within acceptable limits.

Keywords: *billet continuous casting machine, submerged entry nozzle (SEN), mold, mathematical modeling, depth of placement.*