

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 31, 2023, № 1 (332), 28-33

<https://doi.org/10.15407/steelcast2023.01.028>

УДК 621.74.047

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

А.В. Нарівський¹, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., директор, e-mail: av.narivskii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1596-6401>, Web of Science ResearcherID: AAE-8282-2022

С.В. Семірягін², канд. техн. наук, доц., заст. ген. директора, e-mail: td.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8733-3216>

В.В. Осипенко², ген. директор, e-mail: g.d.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-9934-7615>

А.Ю. Семенко¹, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>, Web of Science ResearcherID: GYD-3600-2022

Ю.П. Скоробагатько¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: yulka.ukr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

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

²ТОВ НВП «Дніпроенергосталь» (Запоріжжя, Україна)

Вдосконалення функціональних і технологічних рішень для модернізації підігріву сталі в проміжному ковші машини безперервного лиття

Досить перспективною в плані вдосконалення технології безперервного розливання сталі є використання системи плазмового підігріву металу безпосередньо в проміжному ковші. При цьому на ефективність такої технології значний вплив має конструкція проміжного ковша, місце розташування плазмотрона, спрямованість руху циркуляційних потоків та їх швидкість, наявність примусового перемішування рідкометалевої ванни та ін.

У конструктивному плані основні технічні рішення, які пропонуються для плазмового підігріву сталі в проміжному ковші, базуються на створенні проміжного двокамерного ковша. Причому нагрівання сталі здійснюється у спеціальній прийомній камері. Такі нагрівальні пристрої досить компактні, щоб бути вбудованими в проміжні ковші без будь-яких істотних модифікацій. Більш того, такі нагрівальні пристрої практично не зменшують корисного обсягу проміжного ковша.

Широке поширення технології плазмового підігріву металу в проміжному ковші машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) на ряді металургійних заводів світу обумовлено необхідністю підвищення стабільності параметрів процесу лиття та покращення якості заготовки при одночасному зниженні питомих енергетичних витрат. При цьому створюються додаткові передумови для трансформації проміжного ковша в мультифункціональний агрегат для коригування температури сталі та можливості її рафінування.

Особливо актуальним є використання плазмового підігріву у проміжному ковші в умовах міні-заводів, що експлуатують технологічні агрегати невеликої місткості, для яких реалізація традиційних вискоєфективних рішень щодо позапічної обробки, а також обробки на агрегатах ківш-під не завжди уявляється можливою внаслідок складності організації процесу нагріву, великих витрат тепла та високих питомих витрат на вогнетриву. Крім того, такий проміжний ківш може бути досить ефективний при розливанні якісних марок сталей на заготовки малих перерізів, які виробляються, як правило, порівняно невеликими партіями, що ускладнює їх доведення в невеликих сталерозливних ковшах.

Ключові слова: безперервне розливання, проміжний ківш, плазмовий підігрів, температура сталі, міні-завод, заготовка, перемішування, аргон.

В останні два десятиліття в машинобудуванні помітно посилюються вимоги до якості безперервнолитих заготовок, що обумовлено як конкуренцією на світовому ринку металопродукції, так і новими технологічними процесами, в яких поєднуються процеси розливання і подальшої прокатки.

Сучасний проміжний ківш машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), який по суті виконує основні операції щодо стабілізації процесу розливання, є мультифункціональним металургійним агрегатом безперервної дії, функції якого у нових та вдосконалених МБЛЗ суттєво розширено. Крім суміщення дискретної подачі металу від плавильного агрегату і квазібезперервного переливу в кристалізатор на практиці здійснюється доведення сталі в проміжному ковші, а також додаткове рафінування та мікролегування металу.

У рамках такої модернізації та розширення функціональності на багатьох металургійних виробництвах відбувається оснащення проміжних ковшів системами підігріву металу. Наявність можливості, в останній перед кристалізатором футерованій ємності для розміщення металу, додаткового підігріву дозволяє значно підвищити якість і стабільність властивостей одержуваної безперервнолитої заготовки і знизити її собівартість [1–3].

Рівень температури сталі у проміжному ковші істотно впливає на якість безперервнолитих заготовок, стабільність розливання та продуктивність МБЛЗ. Так, занадто малий рівень перегріву металу, що розливається, над ліквідусом може стати причиною «заморожування» струмка і незапланованого (аварійного) припинення процесу розливання. При надмірному перегріві операторам доводиться зменшувати швидкість розливання, оскільки в іншому випадку підвищується ймовірність прориву скоринки, що твердне під кристалізатором. При цьому відбувається зниження виходу придатного металу та зменшення продуктивності МБЛЗ. Зазвичай кожній марці сталі відповідає певний рівень перегріву, що регламентується, над ліквідусом при розливанні, при якому досягається

оптимальне поєднання якості металу безперервнолитої заготовки і продуктивності розливання [4, 5].

Узагальнюючи численні результати, виконані різними дослідниками у промислових умовах, слід зазначити, що температура сталі в проміжному ковші протягом розливання одного сталерозливного ковша помітно коливається. З початку вона підвищується (протягом 20–25 хв) приблизно на 15–25 °С, що обумовлено прискореним наповненням проміжного ковша до номінального рівня, а потім плавно знижується в міру спустошення сталерозливного ковша внаслідок зниження витрати сталі та втрат тепла, що мають місце через контактуючі з металом поверхні металургійних ємностей, досягаючи мінімального значення в період зливання останніх (холодних) порцій сталі. Після заміни порожнього сталерозливного ковша на повний при серійному розливанні розглянутий цикл зміни температури сталі повторюється (рис. 1).

У металургійній практиці використовуються три найбільш поширені варіанти вирішення проблеми підтримки температури металу: хімічний, дуговий та індукційний підігрів. Перші два способи, як відомо, впливають на хімічний склад, а третій вимагає використання енерговитратного (до 15 кВт·год/т сталі), складного в експлуатації та ремонті обладнання. В останні роки виникає все більший інтерес до використання плазмового нагрівання рідкої сталі безпосередньо у проміжному ковші. Плазмовий підігрів металу в проміжному ковші має ряд переваг у частині досягнення оптимальної макроструктури зливка в порівнянні з методом електромагнітного перемішування і є альтернативою хімічному підігріву в сталерозливному ковші та обробці металу на установці ківш-піч [1, 2].

У промислових плазмових установках застосовуються різні системи підігріву сталі, які працюють як на постійному, так і на змінному струмі [6, 7]. При використанні постійного струму плазмовий пальник, що виступає як катод, опускається у верхню частину футерованої камери, розташованої над дзеркалом

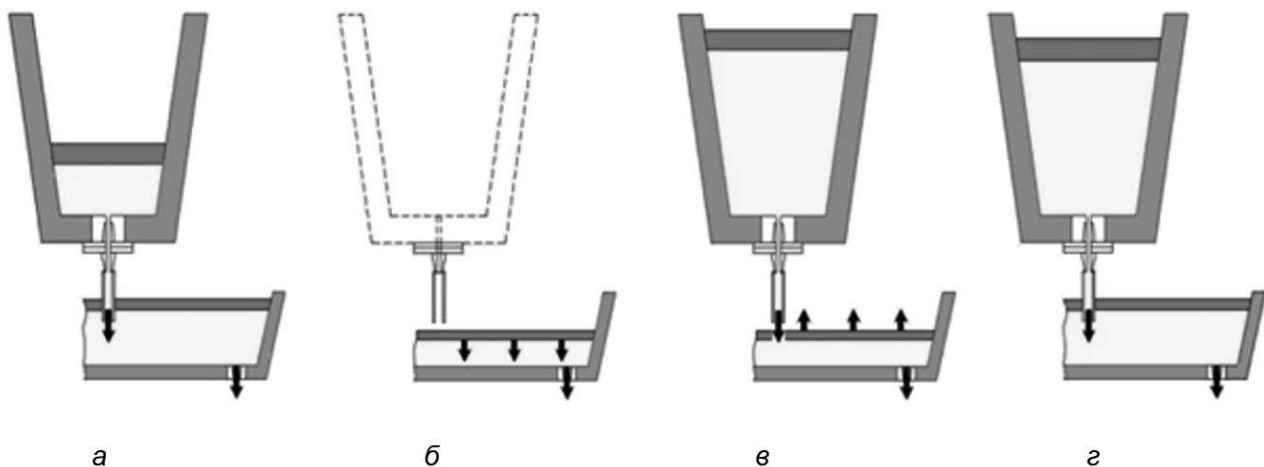


Рис. 1. Періодична заміна сталерозливного ковша в процесі лиття: а – штатний режим розливання; б – розливання з порожнім сталерозливним ковшем; в – новий повний сталерозливний ківш (заповнення проміжного ковша); г – штатний режим розливання

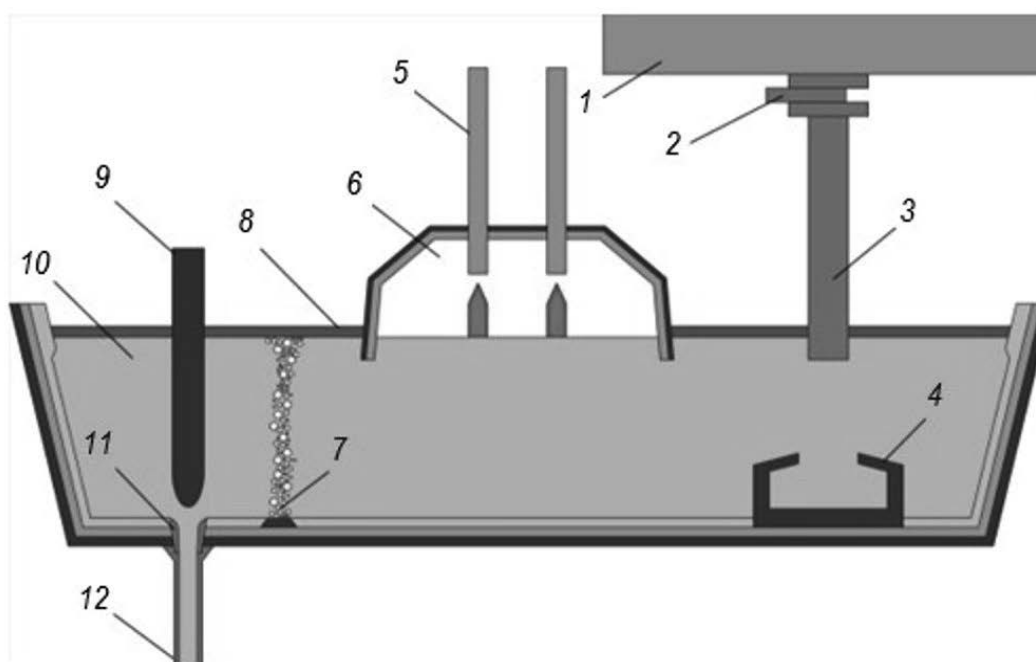


Рис. 2. Схема плазмового підігріву сталі в проміжному ковші: 1 – сталерозливний ківш; 2 – шиберний затвор; 3 – захисна труба; 4 – металоприймач; 5 – плазмовий генератор; 6 – камера підігріву; 7 – продувний блок; 8 – теплоізолююча суміш; 9 – стопор; 10 – рідкометалева ванна; 11 – стакан-дозатор; 12 – занурений стакан

металу в проміжному ковші. Між пальником та розплавленою сталлю запалюється електрична дуга, яка безпосередньо контактує з розплавленим металом, що, по суті, робить анодом всю рідкометалеву ванну (рис. 2).

Плазмовий пальник (катод) та анод під'єднані до джерела постійного струму. Пальник виготовляється з водоохолоджуваної мідної труби з вольфрамовим наконечником. Середня тривалість експлуатації вольфрамового наконечника становить приблизно 100–120 годин [8]. Охолодження пальника здійснюється деіонізованою водою, що дозволяє запобігати утворенню відкладень у його внутрішній порожнині. Для створення стійкого смолоскипа необхідний іонізований газ, що забезпечує формування плазмової дуги. Тим часом більшість промислових газів мають високий потенціал іонізації та непридатні для використання через окислення вольфрамового наконечника, а також погіршення якості металу.

Найбільш перспективними газами для формування плазмової дуги є аргон і азот, використовувані зазвичай як суміші [9]. Причому на практиці встановлено, що довжина дуги збільшується з підвищенням величини напруги та концентрації азоту у газовій суміші. Відповідно для тієї ж сили струму зі збільшенням напруги дуги зростає потужність плазмового факела, що забезпечує більш високу швидкість нагрівання. Тому застосування азоту в газовій суміші є дуже привабливим рішенням з точки зору підвищення потужності дугового вузла. Однак слід зауважити, що для багатьох якісних марок сталі азот є шкідливою домішкою, що призводить до утворення нітридів. Отже, можливість використання його у складі газової суміші повинна визначатися хімічним складом сталі, а також вимогами до її якості. У цьому випадку доцільно використання системи регулювання складу робочого газу для забезпечення роботи пальника на аргоні, азоті або їх суміші з метою значного зменшення експлуатаційних витрат та насичення сталі

Таблиця

Основні технічні параметри системи підігріву плазми

Параметр	Величина
Діаметр пальника, мм	108
Тип струму	однофазний змінний
Сила струму (максимум), кА	7,5
Напруга (максимум), В	350
Потужність, МВт	2,4
Робочий газ	аргон
Витрата охолоджувальної води, м³/год	30

азотом [10].

Слід зазначити, що ефективність роботи плазмового пальника значною мірою залежить від рівня теплових втрат. За даними різних дослідників при плазмовому підігріві приблизно 60–80 % тепла засвоюється рідким металом [11, 12], а решта втрачається з охолоджувальною водою і через футерування нагрівальної камери, температура якої досягає 1800 °С.

Так, на металургійному заводі Kobe Steel (Японія) виконано великий обсяг досліджень щодо використання однофазного змінного струму для плазмового підігріву сталі у проміжному ковші [13]. Основні технічні параметри системи підігріву плазми представлені в таблиці.

Базову конструкцію плазмового пальника показано на рис. 3. Газоподібний аргон проходить через пальник і стартер, після чого спалахують дуги основних електродів. Дуга потім переноситься на метал, і струм йде між основним електродом та металом у проміжному ковші.

Система підігріву складається з двох плазмових пальників діаметром 108 мм та довжиною 4,2 м, розміщених у кришці проміжного ковша над поверхнею сталі. У якості плазмоутворюючого газу використовується аргон з можливістю регулювання витрати в межах 9–20 м³/год (на 1 фурму).

Технологію плазмового підігріву сталі в проміжному ковші використовують багато відомих зарубіжних фірм: Nucor Steel, США; Nippon Steel NKK, Японія; SOLLAC, Франція; Danieli, Prime Metal та ін. Тепловий коефіцієнт корисної дії (ККД) нагріву генераторами плазми (плазмотронами) у зазначених технологіях варіюється в широкому діапазоні (від 50 до 80 %). Нагрівання металу забезпечується тепловим випромінюванням плазми і тепловим потоком в опорних плямах дуги на поверхні рідкої сталі, а при збільшенні потужності дуги збільшується коефіцієнт корисної дії. Типова довжина дуги становить близько 30 см, а середній термічний ККД – 55 %. Ефективність нагріву визначається багатьма технологічними факторами, у тому числі такими, як: напрямок і швидкість руху потоків металу в проміжному ковші, кількість шлаку на поверхні металу, швидкість розливання, конфігурація проміжного ковша та його зводу, довжина та сила струму дуги та ін.

Беручи до уваги той факт, що нагрів металу плазмовими пальниками здійснюється переважно в певній зоні рідкометалевої ванни, для підвищення його ефективності доцільно здійснювати додаткову примусову гомогенізацію сталі в проміжному ковші шляхом створення циркуляційних потоків, що дозволяють підводити нові порції металу до високотемпературної області плазми. Для формування спрямованих конвективних потоків у проміжному ковші можуть бути використані спеціальні пороги і перегородки, а також продувні блоки та балки, які встановлюються в днище безпосередньо в області плазмового підігріву. Також досить перспективним у плані підігріву сталі є використання системи електромагнітного перемішування (ЕМП) рідкого металу. Всі ці системи сприяють підвищенню ефективності процесу нагрівання та до-

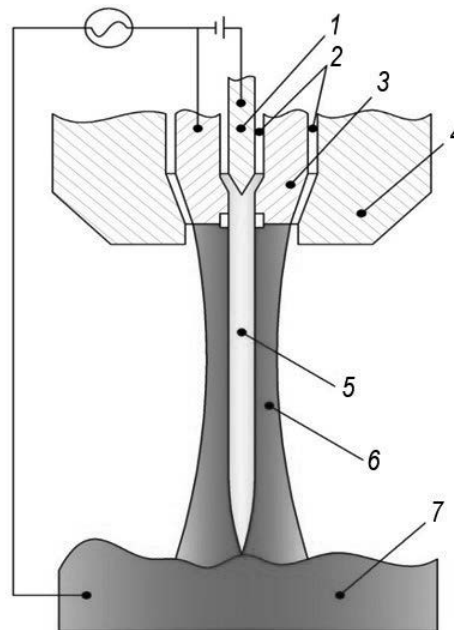


Рис. 3. Принципова схема плазмового газового пальника: 1 – стартовий електрод; 2 – аргон; 3 – основний електрод; 4 – стакан-дозатор; 5 – стартова дуга; 6 – основна дуга; 7 – сталь

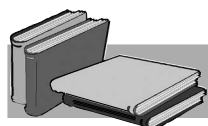
зволяють підтримувати температуру сталі на виході з проміжного ковша на рівні ± 1 °С при стаціонарному режимі розливання [14].

Висновки

1. Широке поширення технології плазмового підігріву металу в проміжному ковші МБЛЗ на ряді металургійних заводів світу обумовлено необхідністю підвищення стабільності параметрів процесу лиття та покращення якості заготовки при одночасному зниженні питомих енергетичних витрат. При цьому створюються додаткові передумови для трансформації проміжного ковша в мультифункціональний агрегат для коригування температури сталі та можливості її рафінування.

2. Технологія плазмового підігріву насамперед застосовна при розливанні відповідальних температурно чутливих марок сталі, схильних до утворення дефектів безперервнолитої заготовки, у тому числі різного роду тріщин і порушень геометричної форми (наприклад, ромбічність сортової заготовки).

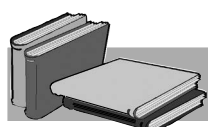
3. Оснащення проміжного ковша системою плазмового підігріву сталі є особливо актуальним рішенням стосовно безперервного розливання сталі довгими і наддовгими серіями, а також у разі отримання спеціальних видів металопродукції (наприклад, труби відповідального призначення, великі зливки) в умовах сучасних металургійних міні-заводів.



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. Киев: Наукова думка, 2018. 264 с.
2. Sahai Y., Emi T. Tundish Technology for Clean Steel Production. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. 316 p.
3. Page D., Kondoh H., Omori M. Improvement Steel Quality via the use of a plasma tundish heater. Proc. 11-th International symposium on plasma chemistry. Loughborough: Plasma chemistry, 1993. P. 502–507.
4. Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Филиппов Г.А. Влияние перегрева при непрерывной разливке на структуру и свойства стали. *Сталь*. 2014. № 9. С. 24–37.
5. Yoshii Y., Nozaki T., Habu Y. Decreasing Non-metallic Inclusions in Molten Steel by Use of Tundish Heating System in Continuous Casting. *ISIJ International*. 1985. Vol. 71. No. 11. P. 52–59.
6. Kittaka S., Wakida S., Kanki T., Hosokawa T. Nippon Steel Type Tundish Plasma Hitter “NS Plasma 1” for Continuous Caster. *Nippon Steel Technical Report*. 2002. No. 85. P. 162–166.
7. Исакаев Э.Х., Филиппов Г.А., Юсупов Д.И. и др. Установка плазменного подогрева стали в промежуточном ковше. *Черная металлургия: Бюл. НТУЭИ*. 2012. № 11. С. 42–45.
8. Troniman J., Comacho D. Plasma tundish heating at Nucor Steel – Nebraska. *Iron and Steel Engineer*. 1995. Vol. 73. No. 11. P. 39–44.
9. Neuschütz D., Zhai Y., Hauck A. Nitrogen transfer into plasma heated steel melts as a function of arc polarity. *Steel research*. 1994. Vol. 65. No. 6. P. 219–224. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.199401061>
10. Мухатдинов Н.Х., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И., Филиппов Г.А. Экономическая эффективность применения плазменного подогрева стали в проковше МНЛЗ. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2015. № 1. С. 99–102.
11. Neuschütz D. Metallurgical applications of high power arc heating systems. *High Temp Chem. Processes*. 2004. No. 4. P. 309–321.
12. Moore C., Healy C.P., Cowx P. Plasma tundish heating as an integral part of continuous casting. *Steel Times International*. 1989. No. 1. P. 44–46.
13. Kittaka S., Wakida S., Sato T. Twin-torch Type Tundish Plasma Hitter “NS Plasma II” for Continuous Caster. *Nippon Steel Technical Report*. 2005. No. 92. P. 16–21.
14. Kimura H., Uehara A., Mori M. Innovation Technologies in Continuous Casting Tundish. *Nippon Steel Technical Report*. 1994. No. 63. P. 22–28.

Надійшла 15.01.2023



REFERENCES

1. Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Efymova, V.H., Kravchenko, A.V., Verzylov, A.P. (2018). Hydrodynamic and physico-chemical processes in tundishes for continuous casting of steel. Kyiv: Naukova dumka, 264 p. [in Russian].
2. Sahai, Y., Emi, T. (2008). Tundish Technology for Clean Steel Production. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 316 p.
3. Page, D., Kondoh, H., Omori, M. (1993). Improvement Steel Quality via the use of a plasma tundish heater. Proc. 11-th International symposium on plasma chemistry. Loughborough: Plasma chemistry, pp. 502–507.
4. Isakaev, E.Kh., Tiuftiaev, A.S., Filippov, H.A. (2014). The influence of overheating during continuous casting on the structure and properties of steel. *Stal*, no. 9, pp. 24–37 [in Russian].
5. Yoshii, Y., Nozaki, T., Habu, Y. (1985). Decreasing Non-metallic Inclusions in Molten Steel by Use of Tundish Heating System in Continuous Casting. *ISIJ International*, vol. 71, no. 11, pp. 52–59.
6. Kittaka, S., Wakida, S., Kanki, T., Hosokawa, T. (2002). Nippon Steel Type Tundish Plasma Hitter “NS Plasma 1” for Continuous Caster. *Nippon Steel Technical Report*, no. 85, pp. 162–166.
7. Isakaev, E.Kh., Filippov, H.A., Yusupov, D.I. (2012). Installation of plasma heating of steel in the tundish. *Ferrous metallurgy*, no. 11, pp. 42–45 [in Russian].
8. Troniman, J., Comacho, D. (1995). Plasma tundish heating at Nucor Steel – Nebraska. *Iron and Steel Engineer*, vol. 73, no. 11, pp. 39–44.
9. Neuschütz, D., Zhai, Y., Hauck, A. (1994). Nitrogen transfer into plasma heated steel melts as a function of arc polarity. *Steel research*, vol. 65, no. 6, pp. 219–224, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.199401061>
10. Mukhatdynov, N.Kh., Tiuftiaev, A.S., Yusupov, D.I., Filippov, H.A. (2015). Economic efficiency of the use of plasma heating of steel in the tundish of CCM. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*, no. 1, pp. 99–102 [in Russian].
11. Neuschütz, D. (2004). Metallurgical applications of high power arc heating systems. *High Temp Chem. Processes*, no. 4, pp. 309–321.

12. Moore, C., Heanly, C.P., Cowx, P. (1989). Plasma tundish heating as an integral part of continuous casting. *Steel Times International*, no. 1, pp. 44–46.
13. Kittaka, S., Wakida, S., Sato, T. (2005). Twin-torch Type Tundish Plasma Hitter “NS Plasma II” for Continuous Caster. *Nippon Steel Technical Report*, no. 92, pp. 16–21.
14. Kimura, H., Uehara, A., Mori, M. (1994). Innovation Technologies in Continuous Casting Tundish. *Nippon Steel Technical Report*, no. 63, pp. 22–28.

Received 15.01.2023

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

A.V. Narivskiy¹, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Director, e-mail: av.narivskii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1596-6401>, Web of Science ResearcherID: AAE-8282-2022

S.V. Semiriagin², PhD (Engin.), Associate Professor, Deputy CEO, e-mail: td.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8733-3216>

V.V. Osypenko², CEO LTD, e-mail: g.d.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-9934-7615>

A.Yu. Semenko¹, PhD (Engin.), Researcher, e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>, Web of Science ResearcherID: GYD-3600-2022

Yu.P. Skorobagatko¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: yulka.ukr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

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

²*LTD Scientific and Manufacturing Enterprise Dneproenergostal (Zaporizhzhia, Ukraine)*

Improvement of functional and technological solutions for modernization of steel heating in the tundish of continuous casting machine

The using of the system of plasma heating of metal directly in the tundish is quite promising in terms of improving the technology of continuous casting of steel. At the same time, the efficiency of this technology is significantly influenced by the design of the tundish, the location of the plasmatron, the direction of movement of the circulation flows and their speed, the presence of forced mixing of the liquid metal bath, etc.

In terms of design, the main technical solutions proposed for plasma heating of steel in a ladle are based on the creation of two-chamber tundish. Moreover, steel is heated in a special receiving chamber. Such heating devices are compact enough to be built into tundish without any significant modifications. Moreover, such heating devices practically do not reduce the useful volume of the tundish.

The widespread use of the technology of plasma heating of metal in the tundish of the continuous casting machine (CCM) at a few metallurgical plants in the world is due to the need to increase the stability of the parameters of the casting process and improve the quality of the workpiece while simultaneously reducing specific energy costs. At the same time, additional prerequisites are created for the transformation of the tundish into a multifunctional unit for adjusting the steel temperature and the possibility of its refining.

The using of plasma heating in the tundish is especially relevant in the conditions of mini-mills operating technological units of small capacity, for which the implementation of traditional highly efficient solutions for out-of-furnace processing, as well as processing on tundish-furnace units, is not always possible due to the complexity of organizing the heating process, large heat losses and high specific costs of refractories. In addition, such tundish can be quite effective when pouring high-quality grades of steel into billets of small cross-sections, which are produced, as a rule, in relatively small mixer-batches, which makes it difficult to prove them in small steel pouring ladles.

Keywords

Continuous casting, tundish, plasma heating, steel temperature, mini-mill, billet, mixing, argon.