

УДК 669.182133

А. Г. Чернятевич¹, д.т.н., проф., г.н.с., ORCID 0000-0002-4552-4997**В. Г. Герасименко**¹, к.т.н., доц.**Л. С. Молчанов**¹, к.т.н., зав. відділом, ORCID 0000-0001-6139-5956¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ ТА РОЗЛИВКИ СТАЛІ НА МБЛЗ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК В УМОВАХ ВІТЧИЗНЯНИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Повоєнне відновлення гірничо-металургійного комплексу України є одним із найактуальніших завдань розвитку промислового потенціалу України та зміцнення її економічної самостійності. Вирішення цього завдання лежить на шляху освоєння конкурентоспроможної продукції, яка була б такою як за якістю, так і за витратами матеріалів, ресурсів та енергії на її випуск. При виробництві залізничних рейок встановлена оптимальна технологічна схема виплавки якісної сталі, в основі якої лежить функціональний ланцюг "установка з позапічної обробки чавуну - плавильний агрегат - комплексна установка позапічного доведення сталі або установка "ковш-піч", а також вакууматор - машина безперервного розливання сталі". На підставі світового досвіду розглянуто та проаналізовано технологічні особливості виробництва та безперервного розливання сталі залізничного призначення. Представлено рекомендації стосовно технологічних заходів, що необхідно впроваджувати на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» для ефективного виробництва залізничних рейок у повоєнний період з урахуванням світового досвіду. Рекомендовано впровадження у сталеплавильному виробництві багатоярусних кисневих фурм, що дозволить збільшити частку металобрухту у шихті на 10–15%, а при використанні газопорошкової фурми можна досягти практично 100% частки металобрухту у шихті. На етапі безперервної розливки рекомендовано дотримання раціональних температурних та швидкісних режимів розливки відповідно до світового досвіду.

Ключові слова: залізничні рейки, технологічний маршрут, реконструкція, кисневий конвертер, безперервна розливка.

Посилання для цитування: Чернятевич А. Г., Герасименко В. Г., Молчанов Л. С. Вдосконалення технології виплавки та розливки сталі на МБЛЗ для виробництва залізничних рейок в умовах вітчизняних металургійних підприємств. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 295-303. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-295-303>

Актуальність. У контексті повоєнного відновлення гірничо-металургійного комплексу України одним із найактуальніших завдань є розвиток промислового потенціалу України та зміцнення її

економічної самостійності. Вирішення цього завдання лежить на шляху освоєння конкурентоспроможної продукції, яка була б такою як за якістю, так і за витратами матеріалів, ресурсів та енергії на її випуск. Зазначений аспект повною мірою відноситься до виробництва залізничних рейок.

Залізниці в Україні зберігають провідну роль серед різних видів транспорту завдяки протяжності, енергетичній ефективності, безпеці транспортної операції. Експлуатаційна мережа шести залізниць України у довоєнний період становила 51,2 тис. км., при цьому прямі ділянки колії становлять 75% від загального обсягу [1]. При цьому основним параметром досягнення технологічних властивостей рейкового металу є хімічний склад (рівень вмісту шкідливих домішок (сірка, фосфор), газів (кисень, водень, азот), неметалевих включень). Значний вплив на якість готових рейок також чинить стан поверхні та центральної зони сталевих злитків або заготовок.

В останні десятиліття інтенсивно розвивалися нові сталеплавильні технології, що істотно або навіть докорінно змінили структуру виробництва, що склалася, і досягнутий рівень якості рейок [2]. В тому числі: різні варіанти розкислення рейкової сталі, що забезпечують зміну природи та розподілу у рейках неметалевих включень, а також високий рівень дисперсності структури та механічних властивостей; різні варіанти позапічної обробки рейкової сталі в ковшах з використанням інертних або нейтральних газів, синтетичних шлакових сумішей різного складу з метою стабілізації температурного режиму та хімічного складу сталі по ходу розливання, зниження в металі вмісту сірки та неметалічних включень, поліпшення якості поверхні зливка та готових рейок; освоєння киснево-конвертерного та електросталеплавильного виробництва у поєднанні з обробкою сталі в вакууматорах та доведенням її в агрегатах "піч-ківш", розливання на МБЛЗ з метою докорінного підвищення чистоти рейкового металу, поліпшення якості поверхні та зниження до мінімуму витрати сталі на 1 т першосортних довгомірних рейок; розробка та освоєння виробництва рейкової сталі нових композицій шляхом добавки до металу ефективних карбонітридоутворюючих елементів, мікролегованих азотом, обробки лужно-земельними елементами з метою отримання додатково високих, у тому числі спеціальних властивостей.

Стан питання. У сталеплавильному виробництві відбувся прогрес, що різко позначився, в частині створення оптимальних технологічних схем, в основі яких лежить функціональний ланцюжок "установка з позапічної обробки чавуну - плавильний агрегат - комплексна установка позапічного доведення сталі або установка "ковш-піч", а також вакууматор - машина безперервного розливання сталі" (рис. 1) [3].

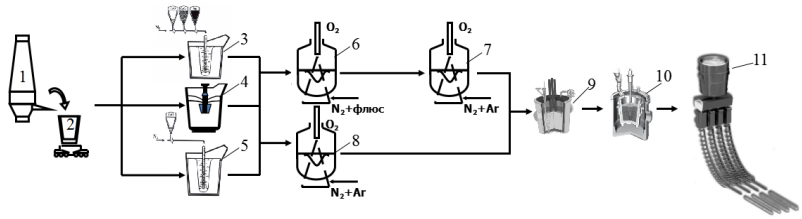


Рисунок 1 – Сучасна схема організації раціонального технологічного маршруту «домена піч - плавильний агрегат - МБЛЗ»: 1 – домена піч; 2 – заливний ківш; 3 – установка мультиінжекції для десульфурації чавуну; 4 – установка KR для десульфурації чавуну; 5 – установка для десульфурації чавуну гранульованим магнієм; 6 – конвертер комбінованого дуття для дефосфорації та видалення кремнію; 7 – конвертер комбінованого дуття для декарбонізації; 8 – конвертер комбінованого дуття, в якому послідовно видаляються кремній, фосфор та вуглець; 9 – установка LF; 10 – установка камерного вакуумування; 11 – МБЛЗ.

Відповідно до відомостей представлених на рис. 1 виробництво металопродукції якісного сортаменту передбачає розмежування процесів видалення сірки та фосфору у просторі виходячи з фізико-хімічних особливостей. Так видалення сірки здійснюється на етапі позапічної обробки чавуну, що зумовлено низькою активністю кисню у розплаві, відповідно до однієї з поширених схем обробки [4]: технологія коінжекції сумішей на основі вапна; технологія моно інжекції металевого магнію (розроблена фахівцями Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України) та технології KR, що передбачає механічне перемішування рідкого чавуну з вапном різної фракції у шматках. Необхідно відзначити, що саме технологія використання металевого магнію відрізняється високою продуктивністю. Подальшим етапом виплавки якісного залізобуглецевого напівпродукту є процес послідовного видалення кремнію, фосфору та вуглецю. Він здійснюється з використанням кисневих конверторів комбінованого дуття і може бути реалізований як в одному агрегаті з послідовним наведенням та видаленням шлаку на кожному етапі рафінування так і у двох агрегатах розміщених послідовно [5]. При виробництві металопродукції залізничного призначення особливе місце відводиться ланці позапічної обробки сталі, що зумовлено високою технічною відповідальністю металовиробів [6]. Відповідно до сучасних схем виробництва металопродукції якісного сортаменту ділянка позапічної обробки повинна включати в себе вакууматор (найчастіше камерного типу через надійність роботи) та установку LF для доведення рідкої сталі за хімічним складом і температурою. Відповідно до світового досвіду, розливання металеві заготовки для виробництва залізничних

рейок здійснюється на МБЛЗ, при чому це забезпечує високу як структурну, так і хімічну однорідність металу з уникненням значної кількості дефектів.

Виходячи з наведеного вище серед вітчизняних металургійних підприємств, що працюють, найбільш доцільно впроваджувати виробництво залізничних рейок в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Таким чином, відповідно до особливостей відновлення сталеплавильного виробництва у повоєнні часи необхідно відзначити, що у зв'язку з утворенням значної кількості металобрухту особливий інтерес будуть представляти технічні рішення щодо переробки підвищеної частки металобрухту у сталеплавильному виробництві. При цьому основним методом виробництва залізовуглецевого напівпродукту є киснево-конвертерний процес, а більшість рішень щодо збільшеної частки металобрухту у кисневому конвертері досягаються за рахунок використання кисневих фурм з можливістю допалення CO до CO_2 у відхідних газах, а також застосування нових прогресивних конструкцій фурм з можливістю введення додаткового теплоносія безпосередньо через фурму. Загальна схема організації різноімпульсних кисневих струменів та фотографії лабораторного випробування багатоярусної та газопорошкової фурм представлені на рис. 2.

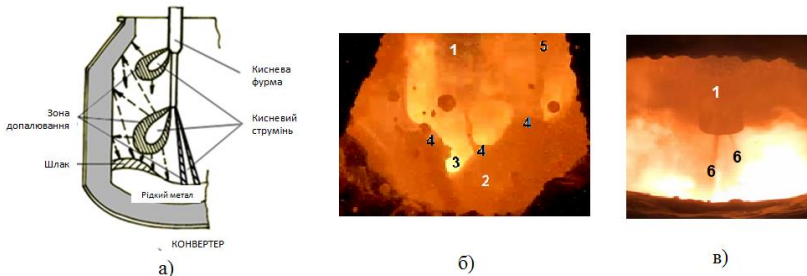


Рисунок 2 – Загальна схема організації різноімпульсних кисневих струменів (а) та фотографії лабораторного випробування двоярусної (б) та газопорошкової (в) фурм: 1– фурма; 2– поверхня шлаку; 3– факела допалювання CO ; 4– сплески шлаку; 5– вихід бурого диму; 6– газопорошковий струмінь, що містить тверде паливо.

Важливим аспектом у сталеплавильному виробництві є те, що з використанням багатоярусних фурм з'являються додаткові керуючі впливи на процес рафінування, які дозволяють проводити дефосфорацію розплаву при більш низьких температурах металу з подальшим підвищенням температури ванни за рахунок додаткового приходу тепла в результаті допалювання CO до CO_2 у спіненій шлакометалевій емульсії [7]. Заміна додаткового кисню на азот на

завершальній стадії продувки забезпечує ефективне зниження рівня спіненої шлакометалевої емульсії перед повалкою конвертера, що супроводжується зниженням втрати металу у вигляді корольків зі скачуемим шлаком, скороченням тривалості виміру температури ванни, відбору проб металу і шлаку.

Застосування багатоспelloвої паливно-кисневої фурми дозволить одержати економічний ефект за рахунок підвищення терміну експлуатації фурми, зниження витрати чавуну на плавку, підвищення продуктивності киснево-конвертерного процесу в результаті скорочення тривалості нагрівання підвищеної кількості металевого брухту [8]. Загалом впровадження у виробництво багатоярусних кисневих фурм дозволить збільшити частку металобрухту у шихті на 10–15%, а при використанні газопорошкової фурми можна досягти практично 100% частки металобрухту у шихті.

Наступним найважливішим етапом у виробництві металу залізничного призначення є безперервне розливання сталі. Завдяки теоретичним та експериментальним дослідженням, у світовій практиці безперервного розливання оформився ряд тенденцій, які значною мірою сприяли прогресу у розливанні сталі [9]. Таким чином, при реконструкції сталеплавильного виробництва для ефективного розливання металу з подальшим отриманням залізничних рейок, у сортову МБЛЗ мають бути закладені наступні конструктивні та технологічні рішення [10, 11]:

- продуктивність одного струмка – до 250 тис. т сталі на рік;
- швидкість розливання – до 6 м/хв;
- розливання здійснюється переважно закритим струменем (у разі необхідності відкритим);
- кристалізатор подовжений параболічний або іншої геометричної форми, що сприяє ефективному формуванню якісної твердої скоринки;
- кількість точок розгину заготовки – 2 та більше;
- переважна кількість струмків 4-6 (у разі потреби 7-8);
- кількість зон у ЗВО – 3 або 4 (остання вода-повітря);
- електромагнітне перемішування у кристалізаторі;
- автоматичний контроль рівня металу у кристалізаторі;
- механізм хитання кристалізатора – гідравлічний.

При виробництві якісної БЛЗ необхідно враховувати та додержуватися раціональних режимів охолодження заготовки [2, 11]:

1) температура поверхні заготовки повинна знижуватися в зоні вторинного охолодження (ЗВО) безперервно аж до моменту закінчення тверднення з метою зниження до мінімуму напруг, що розтягують, у внутрішніх шарах (розігрів заготівлі на будь-яких ділянках допускається не вище, ніж на 500°C);

2) температура поверхні в кінці ЗВО повинна бути не нижче 800°C, але й не вище 1000°C (досвід закордонних дослідників показує, що для МБЛЗ криволінійного типу слід рекомендувати підтримування температури поверхні заготовок наприкінці ЗВО не нижче 950°C);

3) розподіл температури по периметру заготівлі має бути рівномірним;

4) неприпустимі різкі зміни в інтенсивності тепловідведення при виході зливка з кристалізатора в ЗВО.

Для забезпечення виконання вищевказаних умов безперервного розливання слід вирішити задачу визначення раціонального розподілу щільності зрошення по периметру заготовки, її довжині, витрат охолоджувальних агентів та конструктивних особливостей пристроїв, що їх подають. При цьому показники раціонального режиму вторинного охолодження повинні бути узгоджені з іншими показниками процесу розливання - зі швидкістю витягування заготовки, температурою рідкої сталі при розливі, складом хімічним сталі, конструктивними особливостями МБЛЗ. Таким чином, правильно обраний стабільний температурний режим є одним із основних параметрів процесу безперервного розливання сталі. Вважають, що оптимальна температура металу в промківші повинна перевищувати температуру ліквідус на 25-30°C. Для цього в процесі розливання метал у промковші підігрівають і підтримують температуру на заданому рівні. Допускається відхилення температури сталі в проміжному ковші на 5°C вище максимально допустимої під час розливання першої плавки.

Що стосується швидкості безперервного розливання злитків, вона є також важливим параметром, що визначає продуктивність МБЛЗ та якість заготовок. Задана швидкість визначає також температуру металу, що подається на розливу, режими зворотно-поступального руху кристалізатора та охолодження зливка. Зі збільшенням швидкості прямо пропорційне зростає продуктивність установок. Проте, при збільшенні швидкості розливу зростає довжина лунки рідкої фази, зменшується кут змикання фронту кристалізації, що може призвести до збільшення осьової пористості. Крім того, при високих швидкостях розливу й тонкій оболонці зливка, що утворюється в кристалізаторі, збільшується схильність до утворення поздовжніх і поперечних тріщин. Швидкість розливу визначає також техніко-економічні показники роботи МБЛЗ, причому неоднозначно.

Висновки

Розглянуто та проаналізовано технологічні особливості виробництва та безперервного розливання сталі залізничного призначення. Представлено рекомендації стосовно технологічних

заходів, що необхідно впроваджувати на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» для ефективного виробництва залізничних рейок у повоєнний період з урахуванням світового досвіду.

Перелік посилань

1. Нестеров Д. К. *Производство и качество рельсовой стали*. Харьков : Основа, 1994. 212 с.
2. *Основы технологии производства железнодорожных рельсов* / Поляков В. В., Великанов А. В. М. : Металлургия, 1990, - 416с.
3. Разработка энергоэффективной технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом / А. Г. Чернятевич, Л. С. Молчанов, П. О. Юшкевич, В. В. Вакульчук // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2018. Вып. 32. С. 182–207.
4. Сопоставление различных технологий ковшевой десульфурации чугуна магнием / А. Ф. Шевченко, А. С. Вергун, А. М. Шевченко, И. А. Маначин, Б. В. Двоскин // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2015. Вып. 30. С. 118-129.
5. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы / А. Г. Чернятевич, Л. С. Молчанов, П. О. Юшкевич // *Металл и литей Украины*. 2017. № 6-7. С. 17–21.
6. Козырев Н. А., Павлов В. В., Годик Л. А., Дементьев В. П. *Железнодорожные рельсы из электростали*. Новокузнецк, 2006. 388 с.
7. Исследование структуры и параметров реакционных зон при верхней продувке применительно к проектированию многоцелевых конвертерных фурм / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, Д. А. Лаврик, Е. Л. Мастеровенко // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2002. № 12. С. 16-21.
8. Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Юшкевич П. О., Вакульчук В. В. Повышение ресурсо- и энергосберегающей эффективности комбинированной продувки конвертерной ванны. *Экология и промышленность*. 2018. № 2. С. 58-65.
9. Герасименко В. Г., Молчанов Л. С. Направления развития производства мелкосортных заготовок для получения длинномерного проката. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, 2018. Вып. 32. С. 259-274.
10. Технологические особенности выбора рациональных схем перевода металлургических комбинатов, ориентированных на выпуск мелкосортной металлопродукции, на непрерывную разливку стали / Герасименко В. Г., Бойченко Б. М., Перерва В. Я., Чайка Д. В. // *Теория и практика металлургии*. 2011. № 5-6. С. 44-47.
11. Смирнов А. Н., Глазков А. Я., Пилюшенко В. Л. и др. *Теория и практика непрерывного литья заготовок*. Донецк: ДонГТУ, ООО “Лебедь”, 2000. 371 с.

References

1. Nesterov, D. K. (1994). *Proizvodstvo i kachestvo relsovoi stali*. Osnova
2. Polyakov, V. V., & Velikanov, A. V. (1990). *Osnovi tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnikh relsov*. Metallurgiya.

3. Chernyatevich, A. G., Molchanov, L. S., Yushkevich, P. O., & Vakulchuk, V. V. (2018). Razrabotka energoeffektivnoi tekhnologii kombinirovanoi produkvi konverternoi vanni kislom i neitralnim gazom. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 32, 182-207
4. Shevchenko, A. F., Vergun, A. S., Shevchenko, A. M., & Manachin, I. A., Dvoskin, B. V. (2015). Sopostavlenie razlichnikh tekhnologii kovshevoi desulfuratsii chuguna magniem. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 30, 118-129
5. Chernyatevich, A. G., Molchanov, L. S., & Yushkevich, P. O. (2017). Visokotemperaturnoe modelirovanie produkvi konverternoi vanni s primeneniem trekhvarusnoi furni. *Metall i lite Ukraini*, (6-7), 17-21
6. Kozirev, N. A., Pavlov, V. V., Godik, L. A., & Dementev, V. P. (2006). *Zhelezodorozhnie relsi iz elektrostali*. Novokuznetsk
7. Protopopov, Ye. V., Chernyatevich, A. G., Lavrik, D. A., & Masterovenko, Ye. L. (2002). Issledovanie strukturi i parametrov reaktsionnikh zon pri verkhnei produvke primenitelno k proektirovaniyu mnogotselevikh konverternikh furn. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, (12), 16-21
8. Chernyatevich, A. G., Molchanov, L. S., Yushkevich, P. O., & Vakulchuk, V. V. (2018). Povishenie resurso- i energosberegayushchei effektivnosti kombinirovanoi produkvi konverternoi vanni. *Ekologiya i promishlennost*, (2), 58-65
9. Gerasimenko, V. G., & Molchanov, L. S. (2018). Napravleniya razvitiya proizvodstva melkosortnikh zagotovok dlya polucheniya dlinnomernogo prokata. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 32, 259-274
10. Gerasimenko, V. G., Boichenko, B. M., Pererva, V. Ya., & Chaika, D. V. (2011). Tekhnologicheskie osobennosti vibora ratsionalnikh skhem perevoda metallurgicheskikh kombinatov, orientirovannikh na vipusk melkosortnoi metalloproduksii, na neprerivnuyu razlivku stali. *Teoriya i praktika metallurgii*, (5-6), 44-47
11. Smirnov, A. N., Glazkov, A. Ya., Pilyushenko, V. L. et al. (2000). *Teoriya i praktika neprerivnogo litya zagotovok*. DonGTU, OOO "Lebed"

A. H. Cherniatevych¹, D. Sc. (Tech.), Professor, Principal Researcher, ORCID 0000-0002-4552-4997

V. H. Herasymenko¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor

L. S. Molchanov¹, Ph. D. (Tech.), Head of Department, ORCID 0000-0001-6139-5956

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF STEEL MELTING AND CASTING AT CONTINUOUS CASTING MACHINE FOR THE PRODUCTION OF RAILWAY RAILS UNDER THE CONDITIONS OF DOMESTIC METALLURGICAL ENTERPRISES

Abstract. The post-war restoration of the mining and metallurgical complex of Ukraine is one of the most urgent tasks of developing Ukraine's industrial potential and strengthening its economic independence. Solving this task lies in the

development of competitive products, which would be such both in terms of quality and in terms of the consumption of materials, resources and energy for their production. In the production of railway rails, an optimal technological scheme of high-quality steel smelting is established, which is based on the functional chain "installation for out-of-furnace processing of cast iron - melting unit - complex installation of out-of-furnace steel proofing or "bucket-furnace" installation, as well as a vacuum cleaner - machine for continuous pouring of steel". On the basis of world experience, the technological features of production and continuous pouring of railway steel are considered and analyzed. Recommendations are presented regarding technological measures that must be implemented at "KAMET-STEEL" PJSC for the effective production of railway rails in the post-war period, taking into account world experience. It is recommended to implement in steelmaking production of multi-level oxygen lances, which will allow to increase the share of scrap metal in the charge by 10-15%, and when using a gas powder lance, it is possible to achieve almost 100% of the share of scrap metal in the charge. At the stage of continuous casting, it is recommended to observe rational temperature and speed regimes of casting in accordance with world experience.

Key words: railway rails, technological route, reconstruction, oxygen converter, continuous casting.

For citation: Cherniatevych, A. H., Herasymenko, V. H., & Molchanov, L. S. (2023). Improvement of the technology of steel melting and casting at continuous casting machine for the production of railway rails under the conditions of domestic metallurgical enterprises. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 295-303. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-295-303>

*Стаття надійшла до редакції збірника 13.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*