

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.3.136570

УДК 629.746.047

В.Г. Єфімова*, Т.М. Пилипенко
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ІЗ РОЗПЛАВУ СТАЛІ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ЇЇ РОЗЛИВАННІ

Проблематика. Нині основними тенденціями розвитку металургійного виробництва в нашій країні є боротьба за підвищення якості металу в умовах загострення конкуренції як на внутрішньому, так і на світовому ринку. Одною з головних вимог, що ставляться до якісної сталі, є низький вміст неметалевих включень у готовій продукції, а також рівномірний їх розподіл по перетину металевої заготовки. З деякого часу отримання якісного металу стало можливим за рахунок рафінування його в рідкому стані на останньому етапі розливання у проміжному ковші. При цьому проведення досліджень у розливальному пристрої у промислових умовах обмежене внаслідок фізичних умов проведення процесу, а саме завеликого розміру розливального пристрою та високої температури. Ці обмеження можна подолати завдяки переміщенню експериментів з реального пристрою на фізичні моделі та подальшому дослідженню якості отриманого металу металографічними методами. Видалення неметалевих включень на останньому етапі розливання є актуальною задачею. Однак проведені раніше дослідження не враховують впливу термодинамічних факторів на гідродинаміку проміжного ковша.

Мета дослідження. Підвищення якості безперервнолитих заготовок.

Методика реалізації. Термодинамічний аналіз процесів коагуляції та видалення неметалевих включень у шлак. Дослідження гідродинамічних процесів, які відбуваються у проміжному ковші у процесі безперервного розливання сталі і які сприяють видаленню неметалевих включень. Металографічні методики дослідження готового металу.

Результати дослідження. Проведений термодинамічний аналіз дисперсної системи розплав сталі–неметалеві включення показав, що на частинках неметалевої фази утворюються металеві плівки. Фізичне моделювання гідродинамічних потоків показало, що найбільш ефективною структурою потоків, яка сприяє коагуляції неметалевих включень, є вихороподібна. Промислові випробування показали, що зразки металу, які були отримані при застосуванні реакційної камери, містять на 40–80 % менше неметалевих включень.

Висновки. Для створення найбільш сприятливих умов для коагуляції неметалевої фази у проміжному ковші необхідно, щоб він був обладнаний реакційною камерою. Дані термодинамічного аналізу та фізичного моделювання узгоджуються з даними промислових випробувань.

Ключові слова: сталь; коагуляція; неметалеві включення; проміжний ківш.

Вступ

На сьогодні основними тенденціями розвитку металургійного виробництва в нашій країні є боротьба за підвищення якості металу в умовах загострення конкуренції як на внутрішньому, так і на світовому ринку [1].

Одною з головних вимог, що ставляться до якісної сталі, є низький вміст неметалевих включень у готовій продукції, а також рівномірний їх розподіл по перетину металевої заготовки.

З деякого часу отримання якісного металу стало можливим за рахунок рафінування його в рідкому стані на останньому етапі розливання в проміжному ковші. При цьому проведення досліджень у розливальному пристрої у промислових умовах обмежене внаслідок фізичних умов проведення процесу, а саме завеликого розміру розливального пристрою та високої

температури. Ці обмеження можна подолати завдяки переміщенню експериментів з реального пристрою на фізичні моделі та подальшому дослідженню якості отриманого металу металографічними методами [1–5].

Аналіз останніх публікацій свідчить, що для отримання якісної сталі, тобто з найменшим вмістом неметалевих включень, у проміжному ковші додатково встановлюються пороги і перегородки різної конструкції з метою організації раціонального руху потоків розплаву [1–5]. Відомо, що перехід неметалевими включеннями межі розділу фаз розплав–шлак відбувається за рахунок міжфазових явищ у системі розплав сталі–шлак–неметалеве включення.

Однак проведені раніше дослідження [6–10] не враховують впливу термодинамічних аспектів видалення неметалевих включень у проміжному ковші, а також впливу цих факторів

* corresponding author: yefimovavg@gmail.com

на гідродинамічну ситуацію в проміжній ємності. Тому проведення термодинамічної оцінки ситуації, що відбувається на межі розділу фаз розплав—шлак—неметалеві включення в процесі видалення неметалевих включень, є актуальною задачею.

Постановка задачі

Основною метою наших досліджень є підвищення якості безперервнолитих заготовок за рахунок:

1) проведення термодинамічного аналізу стійкості дисперсної системи розплав сталі—шлак—неметалева включення, який сприяє коагуляції та спливанню неметалевих включень;

2) створення раціональної гідродинамічної ситуації в об'ємі розплавленої сталі у проміжному ковші, що сприяє масообмінним процесам;

3) дослідження готової металевої продукції металографічними методами.

Методика дослідження

На підставі термодинамічного аналізу дисперсної системи розплав сталі—неметалеві включення встановлено основні фізико-хімічні закономірності видалення неметалевої фази з розплаву сталі, що розливається через проміжний ківш.

З метою створення найбільш сприятливих гідродинамічних умов для коагуляції неметалевих включень нами було проведено фізичне моделювання гідродинамічних потоків у проміжному ковші. Для цього нами було створено гідродинамічну модель проміжного ковша у масштабі 1:3 з дотриманням рівності критеріїв подібності Фруда та рівності за числом Рейнольдса.

Методика моделювання полягала у введенні індикаторів потоків, фіксації часу перебування порції гранул у проміжній ємності, фіксуванні розмірів вихрових структур і швидкостей потоків у них. Індикаторами потоків були гранули полістиролу густиною $0,7\text{--}0,9\text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ з розміром частинок 1-2 мм. Змінюючи конструкції реакційних камер перегородок, створювали можливість варіювання гідродинамічних структур, швидкостей потоків і часу перебування порції гранул у проміжному ковші.

Для підтвердження теоретичних принципів видалення неметалевих включень із розплаву сталі та даних фізичного моделювання нами були проведені дослідження в промислових

умовах з метою визначення забрудненості сталі неметалевими включеннями. Оцінку забруднення сталі робили на полірованих шліфах сталевих зразків із використанням мікроскопа "Axiovert-200" у світлому, темному і DIC полях при збільшенні $\times 100$ за ГОСТ 1778-70 і ASTM E45-97 (метод найгірших полів).

Основні результати досліджень

Відомо, що сталь являє собою гетерогенну систему, яка складається з металевої матриці (рідкого або твердого розчину) і неметалевих дисперсних частинок. Процес руху сталі від сталерозливного ковша до кристалізатора призводить до утворення дисперсної системи, яка складається із суспензії твердих продуктів розкиснення та емульсії силікатів у рідкому металі. Тому визначення таких найважливіших характеристик процесів, як термодинамічна можливість перебігу колоїдної взаємодії дисперсної фази з дисперсійним середовищем, термодинамічна стійкість системи, що утворюється, можливість видалення неметалевих включень, здійснюється з урахуванням поверхневих властивостей системи неметалева включення—розплав сталі.

Термодинамічна стійкість плівок і адсорбційних шарів на поверхні твердих тіл та рідин пов'язана із закономірностями видалення продуктів розкиснення зі сталі. Поведінка плівок і адсорбційних шарів істотно впливає на стійкість металургійних дисперсних систем, особливо в процесах укрупнення неметалевих включень і переходу через межі розділу фаз.

Термодинамічна можливість процесу переходу неметалевих включень з об'єму сталі на поверхню розплаву може бути оцінена з використанням загальних умов напрямку перебігу процесів, отриманих на основі другого закону термодинаміки і загального критерію рівноваги Гіббса [11].

Видалення частинки неметалевого включення на поверхню сталі за відсутності хімічних процесів, розчинення і без урахування впливу стінок агрегату можна відобразити таким чином [11]:

$$\Delta G = \sigma^{(в-г)} - \sigma^{(в-м)} \frac{1 + \cos \theta^{в-м}}{2} - 0,3 \sigma^{(в-м)}, \quad (1)$$

де $\sigma^{(в-г)}$ — поверхневий натяг на межі розділу фаз неметалева включення—газ, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$; $\sigma^{(в-м)}$ — поверхневий натяг на межі розділу фаз

включення—метал, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$; θ^{B-M} — крайовий кут змочування включення розплавом сталі, градуси.

Розрахунки, проведені з використанням рівняння (1), показали, що всі металургійні суспензії та емульсії в процесі спливання на межу розділу фаз метал—газ є нестійкими дисперсними системами.

З урахуванням капілярного тиску швидкість спливання включень сферичної форми може бути подана рівнянням, яке враховує, що на включення, яке спливає, діють три сили: опір руху, зумовлений в'язкістю розплаву, сила виштовхування та зусилля, зумовлене капілярним тиском. Швидкість спливання включення зі сталі описується рівнянням

$$U_A = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_M - \rho_B}{\eta} + \frac{1}{3} \frac{\Delta\sigma}{\pi r^2}, \quad (2)$$

де $\Delta\sigma$ — зміна поверхневого натягу на півсферах включення, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$; g — прискорення сили тяжіння, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$; ρ_M і ρ_B — густини розплаву металу та неметалевого включення відповідно, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; r — радіус неметалевого включення, м.

З урахуванням викладеного вище, швидкість спливання включень у сталі перевищує розраховану за рівнянням Стокса [11].

При використанні рівняння Стокса для характеристики швидкості відділення фаз, що взаємно змочуються, необхідно враховувати наявність плівки середовища на поверхні частинок, які спливають. Наявність такої плівки зумовлена внутрішнім тертям у в'язких рідинах, що враховує співвідношення швидкостей переміщення середовища та частинки, яка рухається в цьому середовищі.

Отже, в розплаві сталі спливає не саме включення, а включення в оболонці металу. Остання збільшує ефективну вагу включення. В результаті цього величина $\rho_M - \rho_B$ у рівнянні (2) зменшується, а відповідно, зменшується і швидкість спливання включення.

Зміна міжфазового натягу впливає на процеси коагуляції включень, а відповідно, і на очищення розплаву сталі.

У разі утворення тонких оболонок на включенні його частинка може видавлювати оболонку до певної межі з утворенням крайового кута змочування на межі розділу фаз розплав метал—газ, близького до 90° . У цьому випадку, за даними [11], можливість виходу вклю-

чення на межу розділу фаз розплав сталі—газ оцінюється наближеним критерієм:

$$K = 0,5\sigma^{M-G} + \Pi \cdot l,$$

де Π — розклинюючий тиск, Па; l — товщина плівки металу, м; σ^{M-G} — поверхневий натяг на межі розділу фаз розплав метал—газ, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$.

Аналіз цього рівняння приводить до висновку, що при $K < 0$ значення розклинюючого тиску буде від'ємним $\left(\Pi \leq -\frac{0,5\sigma^{M-G}}{l} \right)$,

включення самочинно виходитиме з оболонки металу, коагулюватиме та видалятиметься. Наявність плівки металу, що змочує включення, може полегшити зворотне залучення неметалевих включень в об'єм розплаву з межі розділу фаз метал—шлак і тим самим сприятиме збільшенню стійкості дисперсної системи.

Для подолання бар'єрної дії плівок, що змочують включення, необхідне інтенсивне перемішування, при якому збільшення швидкості конвективних потоків приводить до розриву плівок, подальшої коагуляції включень та їх видалення.

Фізичне моделювання є найбільш ефективним методом досліджень, що дає змогу візуалізувати певні явища і процеси, пов'язані з рухом потоків рідини в проміжному ковші. Найважливішим елементом, що забезпечує коректність одержуваних у ході фізичного моделювання результатів, є дотримання геометричної та гідродинамічної подібності об'єктів [12–14].

Грунтуючись на зазначених вище теоретичних принципах, ми провели фізичне моделювання гідродинамічних потоків на моделі проміжного ковша. Для цього нами було створено гідродинамічну модель проміжного ковша у масштабі 1:3 з дотриманням рівності критеріїв подібності Фруда та рівності за числом Рейнольдса (рис. 1).

Як робочу рідину, що моделює рідку сталь, використовували воду за температури $18\text{--}25^\circ\text{C}$. Вибір води як моделювальної рідини пояснюється тим фактом, що значення в'язкості води і сталі в області температур позапечної обробки досить близькі. Для візуального спостереження газорідних потоків стінки моделі ковша були виконані з прозорого скла. Спостережувані процеси перемішування фіксувалися за допомогою цифрової відеокамери.

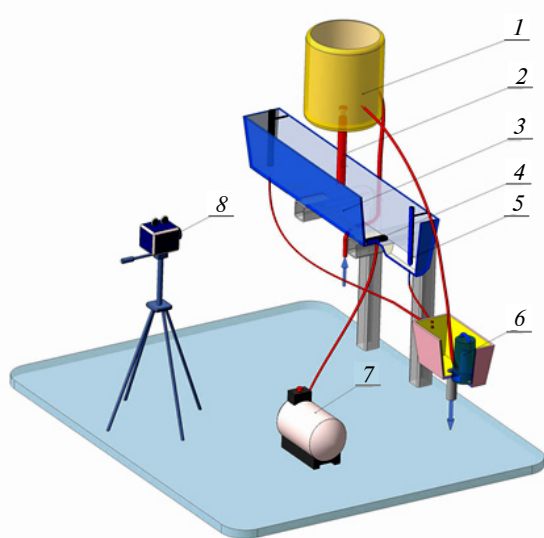


Рис. 1. Схема модельного станда проміжного ковша: 1 – ємність, що імітує розливальний ківш; 2 – захисна труба; 3 – проміжний ківш; 4 – продувальний пристрій; 5 – стопор; 6 – ємність для збору води, яка витікає з проміжного ковша; 7 – компресор; 8 – цифрова відеокамера

Моделюванням встановлено, що з точки зору видалення з рідкої сталі неметалевих включень у проміжних ковшах найбільш ефективною гідродинамічною структурою потоків є вихороподібна, яка забезпечує створення оптимальних умов для коагуляції та видалення неметалевої фази. Ця гідродинамічна структура забезпечує: досить високі швидкості затоплених струменів, що перевищують швидкість опускання металу в ківші; проходження траєкторій поширення струменів вище небезпечних зон затягування неметалевих включень у випускний стакан; створення вимушеної конвекції у всьому обсязі металу, спрямованої до дзеркала металу в проміжному ковші; утворення вихороподібної гідродинамічної структури в розплаві металу. Остання умова є найбільш вирішальною для видалення неметалевих включень з кількісної точки зору з огляду на те, що порції металу в проміжному ковші перебувають дуже нетривалий час. Тому винесення неметалевих включень у шлакову фазу, швидко проходження і коротке перебування в контакті зі шлаком (а також і без контакту) не завжди приводить до асиміляції їх покривним шлаком. Імовірність переходу неметалевих включень у шлак пропорційна їх кількості, розмірам і тривалості контакту зі шлаком. Вихрова структура об'ємів металу дає змогу найкращою мірою та максимально швидко укрупнювати неметалеві

включення і створювати умови для винесення їх у шлакову зону. Утворення цієї гідродинамічної структури можна досягти, якщо проміжний ківш буде обладнано додатковою реакційною камерою, що утворюється за рахунок встановлення додаткової перегородки (рис. 2).

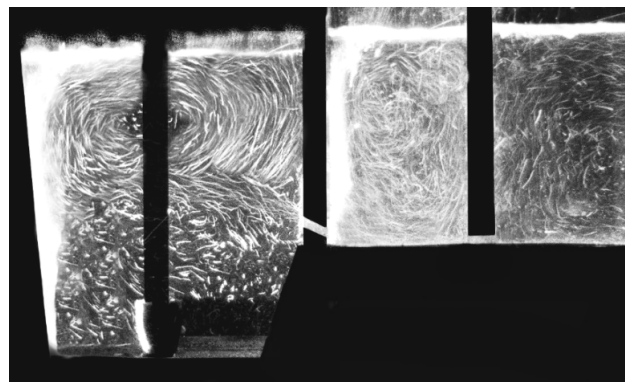


Рис. 2. Реакційна камера, в якій утворюється вихороподібна структура потоків

Дослідження показали, що гідродинамічні процеси, які виникають в проміжному ковші з досліджуваними варіантами конструкцій, певною мірою залежать від гідродинамічного впливу газового потоку, що створюється під час продування. Ефективність впливу продування на створення вихороподібних гідродинамічних структур обернено пропорційна об'єму металу, що обробляється газом. Тому створення великих за об'ємом реакційних камер недоцільне. Найбільш оптимальними слід вважати камери невеликого об'єму. В камерах такого розміру міститься достатній об'єм металу, який забезпечує перемішування металу зі шлаковою фазою, коагуляцію і видалення неметалевої фази. Вплив газу на об'ємні маси рідини при бульбашковому режимі продування є найбільш ефективним, оскільки забезпечує більшу площу контакту бульбашок газу з масою рідини. Тому тиск газу, як показало моделювання, має забезпечувати бульбашковий режим.

У процесі моделювання найкращі результати показали конструкції реакційних камер, що складаються з двох суцільних перегородок із каналами у днищі ковша. Перегородка з боку приймальної камери мала щілину під нахилом 20–25° у бік торцевої стінки проміжного ковша. Ширина щілини становила 45–60 мм. Модельні експерименти показали, що така конструкція проміжного ковша забезпечує час перебування імітаторів неметалевих включень у

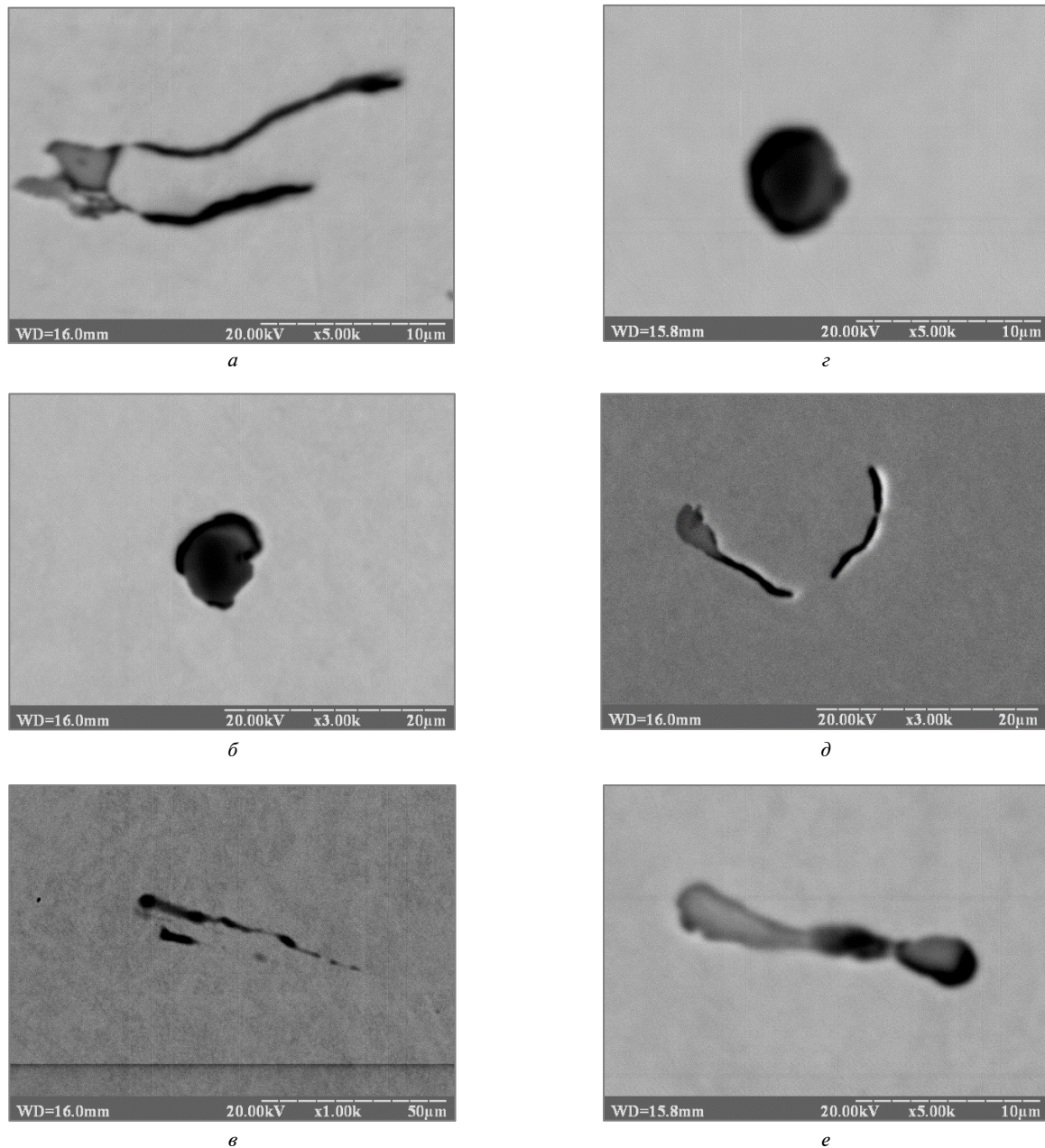


Рис. 3. Основні види неметалевих включень у пробах металу порівняльного (а, б, в) та дослідного (г, д, е)

4–6 разів більший, ніж це має місце при існуючій конструкції проміжного ковша.

Виходячи з теоретичних принципів та експериментів, поставлених на моделі, ми провели промислові випробування з метою підвищення якості металу, який розливається, за рахунок зниження вмісту неметалевих включень.

Як показали кількісні оцінки в зразках металу, що розливався через реакційну камеру, кількість неметалевих включень зменшується в середньому на 40–80 % порівняно з металом, де реакційна камера не застосовувалась.

Основні види неметалевих включень у пробах дослідного металу показані на рис. 3. Встановлено, що в дослідному і порівняльному металі зустрічаються переважно тонкі сульфідні включення до 0,5 бала, оксидні включення до 0,5 бала і силікатні включення до 4 балів.

Висновки

Проведений аналіз термодинамічної стійкості дисперсної системи розплав сталі–неметалеві включення показав, що на частинках

неметалевих включень утворюються стійкі металеві плівки, які перешкоджають процесу коагуляції. Для подолання дії плівок, що змочують неметалеві включення, необхідне інтенсивне перемішування.

Фізичне моделювання дало змогу встановити, що найбільш ефективною структурою гідродинамічних потоків є вихороподібна, яка сприяє коагуляції неметалевих включень і подальшому їх видаленню.

Оцінка забруднення сталі неметалевими включеннями показала, що у зразках сталі, яка була розлита через реакційну камеру, кількість неметалевих включень зменшилась на 40–80 %.

Перспективами подальших досліджень як на фізичній моделі, так і у промислових випробуваннях є відпрацювання режимів продування рідкої сталі в проміжному ковші, обладнаному реакційною камерою, а саме витрати газу, розміру газовидільних каналів.

References

- [1] V.N. Gushchin and V.A. Ul'yanov, "Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines", *Steel in Translation*, vol. 47, no. 5, pp. 320–324, 2017. doi: 10.3103/S0967091217050060
- [2] G. Yang *et al.*, "Influence of reoxidation in tundish on inclusion for Ca-treated Al-killed steel", *Steel Res. Int.*, vol. 85, no. 5, pp. 784–792, 2013. doi: 10.1002/srin.201300243
- [3] L.E. Holappa *et al.*, "Role of slags in steel refining: Is it really understood and fully exploited?", *Revue de Métallurgie*, vol. 106, no. 1, pp. 9–20, 2009. doi: 10.1051/metal/2009009
- [4] K. Janiszewski, "Refining of liquid steel in a tundish using the method of filtration during its casting in the CC machine", *Metalurgija*, vol. 58, no. 2, pp. 513–521, 2013. doi: 10.2478/amm-2013-0029
- [5] A. Mabentsela, "Numerical and physical modelling of tundish slag entrainment in the steelmaking process", *J. Min. Metall. Sec. B: Metallurgy*, vol. 117, no. 5, pp. 469–483, 2017. doi: 10.17159/2411-9717/2017/v117n5a9
- [6] R. Mishra, "Physical and mathematical modeling of slag entrainment during drainage of steelmaking ladles", *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, vol. 53, no. 5, pp. 782–791, 2013. doi: 10.2355/isijinternational.53.782
- [7] X. Yin, "Inclusion evolution during refining and continuous casting of 316L stainless steel", *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 43, no. 7, pp. 533–540, 2016. doi: 10.1080/03019233.2015.1125599
- [8] M. Warzecha and T. Merder, "Numerical analysis of the non-metallic inclusions distribution and separation in a two-strand tundish", *Metalurgija*, vol. 52, no. 2, pp. 153–156, 2013.
- [9] P. Yan *et al.*, "Interaction between steel and distinct gunning materials in the tundish", *ISIJ International*, vol. 54, no. 11, pp. 2551–2558, 2014. doi: 10.2355/isijinternational.54.2551
- [10] S. Chang *et al.*, "Simulation of flow and heat fields in a seven-strand tundish with gas curtain for molten steel continuous-casting", *ISIJ International*, vol. 55, no. 4, pp. 837–844, 2015. doi: 10.2355/isijinternational.55.837
- [11] Y.A. Minaev, *Physical Chemistry in the Metallurgy*. Moscow, Russia: MSUFP, 2001.
- [12] A.N. Smirnov, "Some questions of an estimation of intensity of mixing at a purge of metal in a ladle with an inert gas. Message 1", *Protsessyi Litya*, no. 4, pp. 41–48, 2008.
- [13] A.N. Smirnov, "Some questions of an estimation of intensity of mixing at a purge of metal in a ladle with an inert gas. Message 2", *Protsessyi Litya*, no. 5, pp. 30–35, 2008.
- [14] A.N. Smirnov, "Some questions of an estimation of intensity of mixing at a purge of metal in a ladle with an inert gas. Message 3", *Protsessyi Litya*, no. 1, pp. 11–19, 2009.

В.Г. Ефимова, Т.Н. Пилипенко

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УДАЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ИЗ РАСПЛАВА СТАЛИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ЕЕ РАЗЛИВКЕ

Проблематика. В настоящее время основными тенденциями развития металлургического производства в нашей стране является борьба за повышение качества металла в условиях обострившейся конкуренции как на внутреннем, так и на мировом рынке. Одним из главных требований, предъявляемых к качественной стали, является низкое содержание неметаллических включений в готовой продукции, а также равномерное их распределение по сечению металлической заготовки. С некоторого времени получение качественного металла стало возможным за счет рафинирования его в жидком состоянии на последнем этапе разлива в промежуточном ковше. При этом проведение исследований в разливочных устройствах в промышленных условиях ограничено вследствие физических условий проведения процесса, а именно слишком большого размера разливочного устройства и высокой температуры. Эти ограничения можно преодолеть путем перемещения экспериментов с реального устройства на физические модели и дальнейшего исследования качества полученного металла металлографическими методами. Удаление неметаллических включений на последнем этапе разлива является актуальной задачей. Однако проведенные ранее исследования не учитывают влияния термодинамических факторов на гидродинамику промежуточного ковша.

Цель исследования. Повышение качества непрерывнолитых заготовок.

Методика реализации. Термодинамический анализ процессов коагуляции и удаления неметаллических включений в шлак. Исследование гидродинамических процессов, протекающих в промежуточном ковше в процессе непрерывной разливки и способствующих удалению неметаллических включений. Металлографические методики исследования готового металла.

Результаты исследования. Проведенный термодинамический анализ дисперсной системы расплав стали–неметаллические включения показал, что на частицах неметаллических включений образуются металлические пленки. Физическое моделирование гидродинамических потоков показало, что наиболее эффективной структурой потоков, которая способствует коагуляции неметаллических включений, является вихреобразная. Промышленные испытания показали, что образцы металла, которые были получены при применении реакционной камеры, содержат на 40–80 % меньше неметаллических включений.

Выводы. Для создания наиболее благоприятных условий для коагуляции неметаллической фазы в промежуточном ковше необходимо, чтобы он был оборудован реакционной камерой. Данные термодинамического анализа и физического моделирования согласуются с данными промышленных испытаний.

Ключевые слова: сталь; коагуляция; неметаллические включения; промежуточный ковш.

V.G. Yefimova, T.M. Pilipenko

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF REMOVING THE NON-METALLIC INCLUSIONS FROM THE MOLTEN STEEL DURING CONTINUOUS CASTING PROCESS

Background. Nowadays the main directions of the metallurgical production development in our country are the improvements of the metal quality, caused by the increased competition on both the internal and the world markets. One of the main requirements for the high quality steel is low content of the non-metallic inclusions in the finished product, as well as their uniform distribution along the metal blank cross-section. The manufacturing of the high quality metal has become possible, for some time now, because of its refining in the molten state at the last stage of casting in the tundish. Investigations in the casting device under the industrial conditions are limited, because of the physical conditions of the process being carried out, the too large size of the casting device and high temperature in particular. These limitations can be overcome, if the experiments are carried out not on the conventional device, but on the physical model with the further investigation of the metal quality, taking advantage of the metallographic methods.

Objective. The aim of the paper is the quality improving of continuously cast steel.

Methods. Thermodynamic analysis of coagulation and removal of non-metallic inclusions into slag have been applied. Investigation of hydrodynamic processes occurring in the tundish during continuous casting, which contributes to the removal of nonmetallic inclusions. Metallographic methods of investigation of finished product (steel).

Results. The thermodynamic analysis of the disperse system of molten steel–non-metallic inclusions has shown that metallic films (layers) are formed on top of non-metallic phase particles. Physical modeling of hydrodynamic flows showed that the most effective structure of flows, which promotes the coagulation of nonmetallic inclusions, is a vortex type system. Industrial tests have shown that metal samples that were obtained with the use of “reaction chamber” contain 40–80 % less of non-metallic inclusions.

Conclusions. In order to create the most favorable conditions for the coagulation of the non-metallic phase in the tundish, it is necessary that “reaction chamber” is used during the process. The data of thermodynamic analysis and physical modeling correspond to data of industrial tests.

Keywords: steel; coagulation; non-metallic inclusions; tundish.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
12 березня 2018 року

Прийнята до публікації
31 травня 2018 року