

Молчанов Л.С., Синегін Є.В., Андрюхін Р.П.

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПЛИВАННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТАЛЕРОЗЛИВНИХ КОВШАХ ІЗ ВДОСКОНАЛЕНИМ ПРОФІЛЕМ ФУТЕРОВКИ

Анотація

В статті методами фізичного моделювання досліджено процес видалення зі сталі неметалевих включень за відсутності інших сторонніх впливів на метал (продувки інертним газом, електромагнітного перемішування тощо). Метою роботи є підвищення ефективності видалення зі сталі неметалевих включень. Поставлена мета досягається шляхом використання вогнетривкої футерівки спеціальної конструкції, яка дозволяє створити сприятливу для видалення неметалевих включень гідродинамічну картину потоків під час випуску сталі зі сталеплавильного агрегату в ківш. Визначення геометричного профілю футеровки необхідного для поліпшення умов видалення неметалевих включень здійснено методами фізичного моделювання на прозорій моделі сталерозливного ковша. Для проведення моделювання були визначені числа подоби, що описують процес спливання неметалевих включень впродовж випуску сталі та її витримки в сталерозливному ковші перед розливкою, та розраховані масштаби параметрів, задіяних при моделюванні. За результатами моделювання методом оптимізації було визначено оптимальний геометричний профіль футерівки.

Ключові слова: сталерозливний ківш, неметалева включення, спливання, фізичне моделювання, конструкція футерівки

Abstract

In the article, by using methods of physical modeling, the process of removal of nonmetallic inclusions from steel without external influences (argon bottom blowing, electromagnetic stirring, etc.) has been investigated. The aim of the work is to increase the efficiency of removal of non-metallic inclusions from steel. This goal is achieved by using a refractory lining of a special design that allows you to create a hydrodynamic pattern of flows, favorable for removing non-metallic inclusions, when steel is tapped from a steelmaking unit into a ladle. Determination of the geometrical profile of the lining required to improve the conditions for removal of nonmetallic inclusions has carried out by methods of physical modeling on a transparent model of the casting ladle. For the simulation, the similarity numbers have been determined, describing the process of non-metallic inclusions floating up during the steel tapping and its holding in the ladle before casting, and the scales of the parameters used in the simulation were calculated. According to the optimization results, the optimal geometrical profile of the lining was determined.

Keywords: teeming ladle, non-metallic inclusion, floating, physical modeling, lining design

Вступ

Сучасний рівень розвитку сталеплавильного виробництва характеризується підвищенням вимог до якості і споживчих властивостей металопродукції в умовах розвитку ринкової конкуренції. При цьому високі вимоги до якості виробів зазвичай розглядаються в тісному взаємозв'язку з його собівартістю, що зумовлює актуальність проблеми зниження матеріало- і енергоємності продукції на всіх стадіях виробництва. На сьогоднішньому етапі розвитку сталеплавильного виробництва невід'ємною його частиною стає позапічна обробка сталі. Проте окрема категорія так званих міні-заводів й досі позбавлена потужностей для позапічного рафінування сталі, зокрема й від неметалевих включень (НВ). Для цих та деяких інших категорій підприємств з метою видалення НВ доцільно застосовувати такі конструктивні і технологічні прийоми як вибір раціональної геометрії робочого простору ковша та оптимальна тривалість витримки сталі перед розливанням.

Аналіз літературних джерел та постановка задач дослідження

Основними силами, що діють на тверді або рідкі часточки НВ у рідкій сталі є сили тяжіння, Архімеда та в'язкого тертя. При спливанні часточки сферичної форми у ламінарному режимі за чисел Рейнольдса $Re < 2$ швидкість її руху визначають з умови рівноваги сил, що на неї діють. Закон для визначення швидкості спливання часточки в рідині

має назву закону Стокса [1]. Проте з різних причин, зокрема через перехід часточки у турбулентний режим руху, спливання групи (ансамблю) часточок тощо, закон Стокса описує неадекватно. Теж саме спостерігається й за реальних умов спливання НВ в сталерозливному ковші впродовж витримки сталі перед розливкою: відмінна від сферичної форма НВ, суміжний рух групи НВ, спливання їх у перехідному або турбулентному режимі.

Певний вплив на швидкість спливання НВ мають і конвекційні потоки, спричинені як природньою конвекцією викликаную градієнтом температури по висоті ковша, так і штучною, що має місце безпосередньо під час випуску сталі з печі в ківш та впродовж деякого часу після його завершення. Форма робочого простору ковша безпосередньо впливає на тривалість перебування часточок НВ, особливо найменших розмірів, оскільки вона визначає характер циркуляції потоків рідини та утворення застійних зон. Виходячи з цього авторами було висунуто гіпотезу, згідно з якою закруглення стіку футерівки стін і днища ковша повинно спрямовувати конвекційні потоки рідини вгору, зменшуючи таким чином тривалість перебування дрібних НВ в сталі.

Мета та завдання дослідження

Метою досліджень є визначення оптимального радіуса закруглення футерівки сталерозливного ковша на ділянці сполучення футерівки днища та стін, який забезпечує найкращі умови для вида-

лення НВ зі сталі. Досягнення поставленої мети здійснювали за рахунок методу фізичного моделювання на ізотермічній моделі. При проведенні моделювання враховано вплив на часточки НВ сили Архімеда та в'язкого тертя, а також конвекційних потоків, утворених в об'ємі розплаву при випуску сталі з печі в ківш. Впливом природньої конвекції для умов відтворення процесу спливання НВ у ковші для умов лабораторного експерименту було вирішено знехтувати для спрощення математичної моделі процесу.

Виходячи із мети до основних задач дослідження можна віднести:

розробка методика низькотемпературного моделювання НВ у ковші при різних геометричних параметрах футерівки сталерозливного ковша;

уточнення масштабу фізичного моделювання при урахуванні впливу різних геометричних параметрів футерівки сталерозливного ковша;

проведення низькотемпературного моделювання впливу геометричних параметрів футерівки сталерозливного ковша на ефективність видалення НВ зі сталі.

визначення раціональних конструктивних особливостей футерівки сталерозливного ковша, що забезпечують ефективне видалення НВ зі сталі.

Матеріали та методика проведення низькотемпературного моделювання процесу спливання НВ у сталерозливному ковші

За результатами підготовчого етапу авторами із використанням π-теореми [1] було встановлено, що процес спливання НВ після наповнення сталерозливного ковша можна описати критеріями Архімеда (Ar), модифікованим критерієм гомохронності (Ho_m) та лінійним симплексом (D):

$$Ar = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_{HB}^3}{\rho_p \cdot \nu_p^2}, \quad Ho_m = \frac{g \cdot \tau^2}{h_p},$$

$$D = \frac{d_{HB}}{h_p}, \quad (1)$$

де ρ_p і $\Delta\rho$ – відповідно густина рідини і різниця густин рідини і НВ, kg/m^3 ; g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ; d_{HB} – діаметр НВ, м; ν_p – кінематична в'язкість рідини, m^2/s ; τ – час, с; h_p – рівень рідини в ковші, м.

Для проведення фізичного моделювання було зібрано експериментальну установку, схему якої наведено на рис. 1.

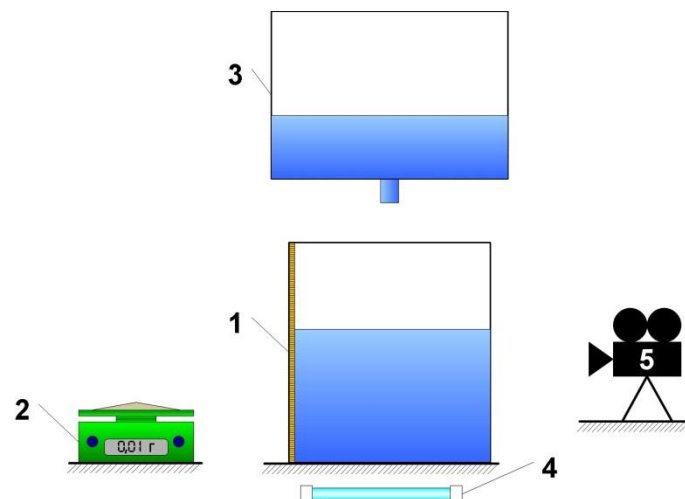


Рисунок 1. Схема дослідної установки: 1 – модель ковша; 2 – електронні ваги; 3 – буферна ємність; 4 – галогенна лампа; 5 – відеокамера

Установка складалася з набору моделей ковша 1 різних розмірів. Необхідність використання декількох ємностей різних розмірів викликана необхідністю варіювання величин критерію Архімеда і лінійного симплекса у заданих межах незалежно одне від одного. Оскільки до обох критеріїв входить (d_{HB}), то використання ємності сталого розміру при зміні фракції порошку призвело б до виникнення кореляційного зв'язку між (Ar) і (D). Перед початком дослідження навеску гранульованого стеарину зважували на електронних вагах 2 з квалітетом точності 0,01 г виходячи з подоби об'ємного вмісту порошку у рідині на моделі і оригіналі 2,88 $л/м^3$ [3]. Зважену навеску порошку обережно завантажували

на дно ковша після чого заливали з буферної ємності 3 воду. Висоту зливного отвору над днищем моделі ковша змінювали з урахуванням лінійного масштабу для даного дослідження. Знизу ківш підсвічувався галогенною лампою 4 потужністю 150 Вт. Тривалість спливання визначалася з відеозаписів дослідів, які здійснювали на відеокамеру 5.

Весь експеримент складався з двох етапів. Спочатку авторами було проведено серію дослідів на прозорих моделях ковша різних розмірів зі звичайною формою робочого простору. За результатами першого етапу експерименту було визначено математичну модель у критеріальній формі (формула 2), яка дозволяє з достатньою для практич-

них розрахунків точною визначати тривалість спливання групи НВ. Крім цього шляхом регресійного аналізу було доведено незначущість тривалості випуску сталі з печі в ківш при величині числа гомохронності $1,3 \cdot 10^4 < \text{Ho}_m < 1,3 \cdot 10^5$. Також із використанням методики Маркова [4] було підтверджено гіпотезу про автономність лінійного симплексу в області $D < 0,01$. Це дозволяє використовувати при фізичному моделюванні непропорційні за розмірами моделі ковша і НВ за умови, що розмір часточок, які використовуються для імітації НВ, буде щонайменше у 100 разів меншим за рівень рідини у моделі ковша.

$$\text{Ho}_g = 42420 \text{Ar}^{-0,51} D^{-0,86}, \quad R^2 = 0,88 \quad (2)$$

Отримані на першому етапі результати дозволили авторам використати на наступному етапі техніку наближеної подоби, відповідно до якої безрозмірними критеріями, які мають незначний (вироджений) вплив на процес (у даному випадку лінійним симплексом), можна знехтувати. Забезпечивши умову $D < 0,01$, автори у другій серії дослідів вивчали вплив на тривалість спливання НВ радіу-

са закруглення при постійних величинах часу випуску та розмірів часточок і ємності. Інтенсивність процесу спливання НВ визначали візуально по зміні висоти фронту спливання через 30, 60 і 90 сек після закінчення наповнення ковша.

Результати низькотемпературного моделювання з визначення раціональних геометричних параметрів футерівки сталерозливного ковша, що забезпечують ефективне видалення НВ

На рис. 2 - 4 наведені фотографії експерименту через 30, 60 і 90 сек після закінчення наповнення ковша для різних радіусів заокруглення сполучення футерівки донної частини та стін сталерозливного ковша.

На рис. 2 приведені відомості стосовно сталерозливного ковша оснащеного радіусом скруглення $R = 10$ мм ділянки донної частини та стінок футерівки сталерозливного ковша. Відповідно до нього в донній частині ковша спостерігаються застійні зони на ділянці сполучення донної частини та стін футерівки сталерозливного ковша. Це призводить до порушення режиму спливання НВ та збільшує час перебування НВ у розплаві.

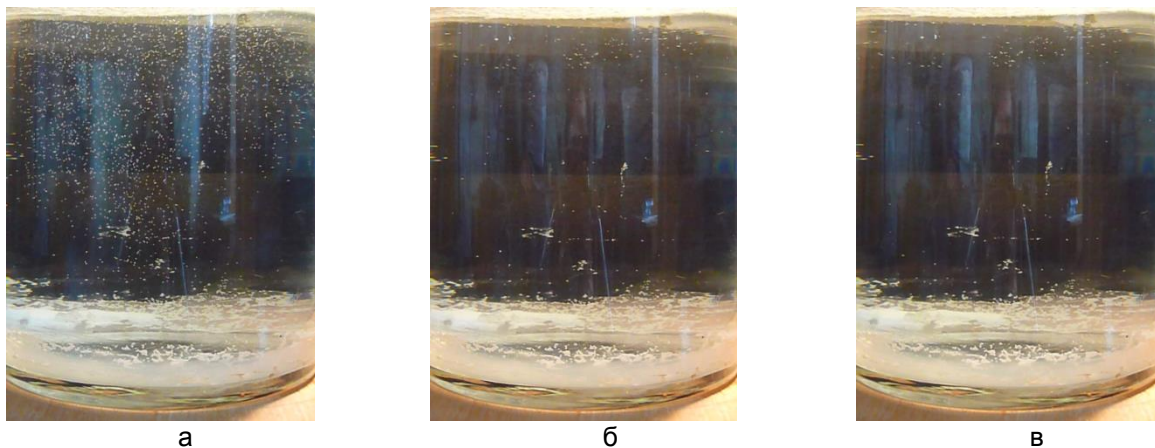


Рисунок 2. Спливання часточок стеарину у моделі ковша з радіусом закругленням днища $R=10$ мм: а) через 30 сек. після наповнення; б) через 60 сек. після наповнення; в) через 90 сек. після наповнення

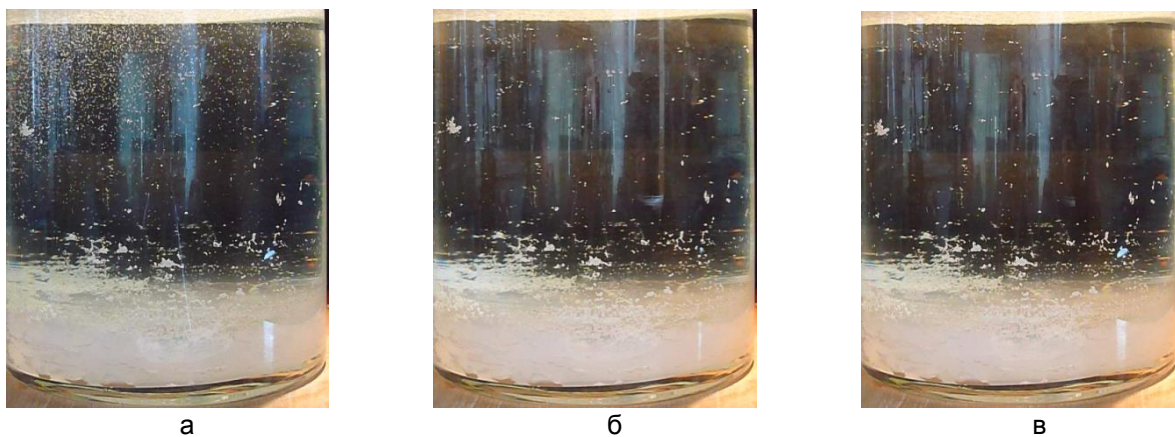


Рисунок 3. Спливання часточок стеарину у моделі ковша з радіусом закругленням днища $R=20$ мм: а) через 30 сек. після наповнення; б) через 60 сек. після наповнення; в) через 90 сек. після наповнення

З метою поліпшення гідродинамічних умов для видалення НВ було збільшено радіус скруглення ділянки сполучення футерівки донної частини та стін сталерозливного ковша (R) до 20 мм. Результати проведеного холодного моделювання за таких умов представлені на рис. 3.

При збільшенні радіусу скруглення до 20 мм спостерігається поліпшення гідродинамічних умов спливання НВ у металевому розплаві, про що свідчить видалення значної частини часток стеарину вже через 60 сек. після закінчення наповнення ко-

вша. Це викликано відсутністю застійних зон на ділянці сполучення донної частини футерівки та стін ковша.

При подальшому збільшенні радіуса скруглення ділянки сполучення футерівки донної частини та стін сталерозливного ковша (R) до 25 мм спостерігається погіршення умов спливання НВ (рис. 4). Відповідно до отриманих експериментальних даних порушуються гідродинамічні умови спливання НВ за рахунок формування турбулентних потоків рідини у середній частині сталерозливного ковша.

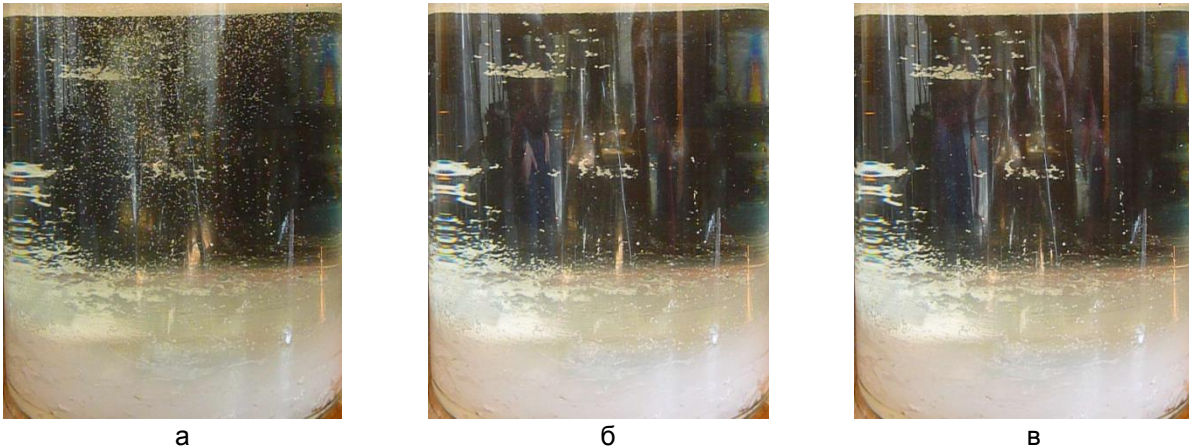


Рисунок 4. Спливання часточок стеарину у моделі ковша з радіусом закругленням днища R=25 мм: а) через 30 сек. після наповнення; б) через 60 сек. після наповнення; в) через 90 сек. після наповнення

Для можливості перерахунку результатів фізичного моделювання замість абсолютної величини радіуса закруглення використовували лінійний симплекс безрозмірного радіуса R

$$R = \frac{r_3}{r_k} \quad (3)$$

де r_3 і r_k – радіус закруглення і днища ковша відповідно, м.

Отримані результати порівнювали з розрахованими за моделлю (2). За результатами обробки експериментальних даних отримано графік залежності відносного зменшення критерію гомохронності та тривалості спливання часточок від безрозмірного радіуса закруглення (рис. 5).

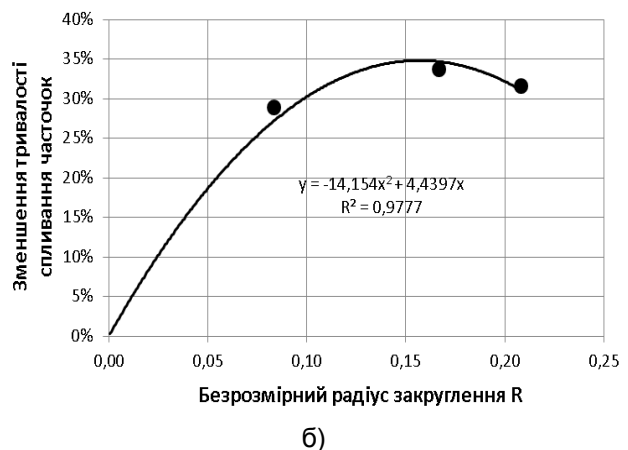
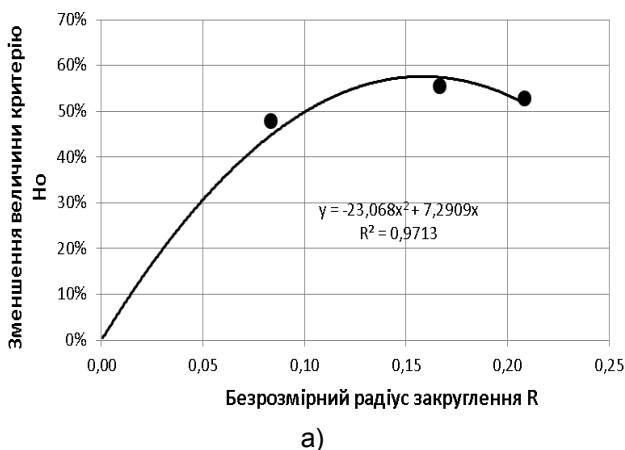


Рисунок 5. Вплив закруглення днища ковша на величину критерію гомохронності (а) і тривалість спливання часточок (б)

З графіків на рис. 5 видно, що ефективність видалення НВ досягає свого максимуму при величині безрозмірного радіусу близько 0,16. Так, у ковші ємністю 60 т та рівнем металу близько 2,3 м тривалість спливання НВ розміром 500 мкм змен-

шиться з 18 до 11 секунд. Тривалість витримки ковшів такої ємності перед розливанням складає зазвичай близько 10-15 хв. За звичайної форми робочого простору ковша граничний розмір НВ, які встигають сплисти у шлак складає 570-800 мкм.

При зміні робочого простору ковша на рекомендований з оптимальним радіусом закруглення гранично низький розмір НВ, які видаляються зі сталі, складатиме 395-555 мкм.

Висновки

За результатами фізичного моделювання авторами доведено можливість підвищення ефективності видаленні зі сталі НВ впродовж витримки сталі в ковші перед розливанням. Визначено, що досягнення поставленої мети можливе при незна-

чній модернізації конструкції футерівки сталерозливного ковша, а саме закруглення стику днища і стін із радіусом закруглення близько 16 % від радіуса днища ковша. Швидкість спливання НВ при цьому збільшується на 35 %. Запропоновані заходи дозволяють зменшити гранично низький розмір НВ, які видаляються з ковша приблизно на 31 %. Перспективними дослідженнями є розробка конструкції спеціальних пристроїв типу «турбостоп», які підвищуватимуть ефективність рафінування сталі від НВ.

Бібліографічний список:

1. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учеб. для ВУЗов [2-е изд., перераб и доп.] / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1988. – 464 с.
2. Организация эксперимента [Учеб. пособие] / В.И. Баптизманский, Ю.Н. Яковлев, Ю.С. Паниотов. – К: УМКВО, 1992. – 244 с.
3. Розробка теоретичних засад енерго- та ресурсозаощаджуючих технологій виплавки та безперервного розливання якісних марок сталей. Звіт з НДР (заключний) / НМетАУ. – № ДР 0116U008351; Інв. № Б002020017. – Дніпро, 2017. – 59 с.
4. Марков Б.Л. Физическое моделирование в металлургии / Б.Л. Марков, А.А. Кирсанов. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.

References

1. Frolov Yu.G. The course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems: Proc. for universities [2 nd ed., pererab and dop.] / Yu.G. Frolov. – M.: Chemistry, 1988. - 464 p.
2. Organization of the experiment [Textbook. allowance] / V.I. Baptismansky, Yu.N. Yakovlev, Yu.S. Paniotov. – K: UMKVO, 1992. - 244 p.
3. The development of theoretical ambushes for energy and resource-saving technologies in the melting of glass and non-continuous bottling of steel grades. Star of NDR (prisoner) / NMetAU. – ДР 0116U008351; Інв. No. B002020017. – Dnipro, 2017. – 59 p.
4. Markov B.L. Physical modeling in metallurgy / B.L. Markov, A.A. Kirsanov. – M.: Metallurgy, 1984. – 119 p.

Стаття поступила: 17.09.18