

Л.С. Молчанов¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудникА.С. Лантух², аспирантЕ.В. Синегин², канд. техн. наук, доц., e-mail: kaf.stal@metanmetau.edu.ua¹Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр, Украина²Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

Определение рационального профиля футеровки сталеразливочных ковшей для повышения эффективности удаления неметаллических включений

В статье методами физического моделирования исследован процесс удаления из стали неметаллических включений при отсутствии других внешних воздействий на металл (продувки инертным газом, электромагнитного перемешивания и т. д.). Предложена новая конструкция футеровки, которая путем корректирования потоков жидкой стали во время выпуска из печи позволяет улучшить условия удаления неметаллических включений из стали.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, конструкция футеровки, неметаллические включения.

Введение. На сегодняшний день актуальным направлением развития металлургии является очистка стали от неметаллических включений (НВ) и снижение расходов на ее получение. Источниками загрязнения стали НВ являются контактирующие с металлом огнеупорные материалы и шлак, а также продукты раскисления металла. Для удаления НВ применяют методы, основанные на ускорении всплывания частиц НВ в шлаковую фазу и применении керамических фильтров. Подобные методы применяют на всех этапах сталеплавильного производства, начиная от выплавки стали и заканчивая затвердеванием слитков или непрерывнолитых заготовок. К ним относятся: продувка расплава инертным газом, электромагнитное перемешивание, модифицирование включений с целью перевода их в жидкое состояние и агрегации [1]. Все эти методы требуют применения дополнительных комплектующих (пористых пробок, керамических фильтров), оборудования (электромагнитных мешалок) или материалов (модификаторов). Из этого следует, что известные методы, хотя и позволяют существенно повысить эффективность удаления НВ, однако, в то же время повышают капитальные и эксплуатационные затраты сталеплавильного производства.

Постановка задачи исследования. Как уже было сказано выше, в основе методов интенсификации удаления НВ из стали лежит повышение скорости их всплывания. Однако определенное влияние на скорость всплывания НВ имеют и конвекционные потоки, вызванные как естественной конвекцией, так и искусственной, что имеет место непосредственно при выпуске стали из печи в ковш и в течение некоторого времени после его завершения. Форма рабочего пространства ковша непосредственно влияет на продолжительность пребывания частиц НВ в стали, особенно маленьких размеров, поскольку форма рабочего пространства определяет характер циркуляции пото-

ков жидкости и образования застойных зон. Исходя из этого, авторами была выдвинута гипотеза, согласно которой закругления на стыке футеровки стен и днища ковша должны направлять конвекционные потоки жидкости вверх, уменьшая, таким образом, продолжительность пребывания мелких НВ в стали.

Целью исследований является определение оптимального радиуса закругления футеровки сталеразливочных ковшей на участке соединения футеровки днища и стен, обеспечивающего наилучшие условия для удаления НВ из стали. Достижение поставленной цели осуществляли за счет метода физического моделирования на изотермической модели. При проведении моделирования учтено влияние на частички НВ силы Архимеда и вязкого трения, а также конвекционных потоков, образованных в объеме расплава, при выпуске стали из печи в ковш. Влиянием естественной конвекции для условий моделирования процесса всплывания НВ в ковше для условий лабораторного эксперимента было решено пренебречь для упрощения математического описания процесса.

Методика проведения эксперимента. По результатам подготовительного этапа [2] авторами с использованием π -теоремы [3, 4] было установлено, что процесс всплывания НВ после наполнения сталеразливочного ковша можно описать критерием Архимеда (Ar), модифицированным критерием гомотропии (Ho_m) и линейным симплексом (D):

$$Ar = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_{НВ}^3}{\rho_p \cdot \nu_p^2}, \quad Ho_m = \frac{g \cdot \tau^2}{h_p}, \quad D = \frac{d_{НВ}}{h_p}, \quad (1)$$

где ρ_p и $\Delta\rho$ – соответственно плотность жидкости и разница плотностей жидкости и НВ, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $d_{НВ}$ – диаметр НВ, м; ν_p – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; τ – время, с; h_p – уровень жидкости в ковше, м.

Для проведения физического моделирования была собрана экспериментальная установка, имитирующая выпуск стали из сталеплавильного агрегата в ковш масштабом 1:8, схема которой приведена на рис. 1. В ходе эксперимента в модели сталеразливочного ковша между стенками и дном устанавливали закругление различного радиуса. Выбор остальных масштабов моделирования и детальная методика эксперимента приведены в работах [2, 5].

Полученные на предыдущем этапе результаты [5] дали возможность использовать технику приближен-

ного моделирования, согласно которой безразмерными критериями, которые имеют незначительное (вырожденное) воздействие на процесс (в данном случае линейным симплексом), можно пренебречь. Обеспечив условие $D < 0,01$, было изучено влияние на продолжительность всплывания НВ радиуса закругления при постоянных величинах времени выпуска и размеров частиц и емкости. На рис. 2 приведены фото эксперимента и схематические изображения конвекционных потоков после окончания наполнения ковша.

Для возможности пересчета результатов физического моделирования вместо абсолютной величины радиуса закругления использовали линейный симплекс безразмерного радиуса R :

$$R = \frac{r_z}{r_k}, \quad (2)$$

где r_z и r_k – радиус закругления и дна ковша соответственно, м.

Полученные результаты сравнивали с рассчитанными по модели, полученной в работе [5]. По результатам обработки экспериментальных данных получен график зависимости относительного уменьшения критерия гомохронности и продолжительности всплывания частиц от безразмерного радиуса закругления (рис. 3).

Из графика на рис. 3 видно, что эффективность удаления НВ достигает максимума при величине

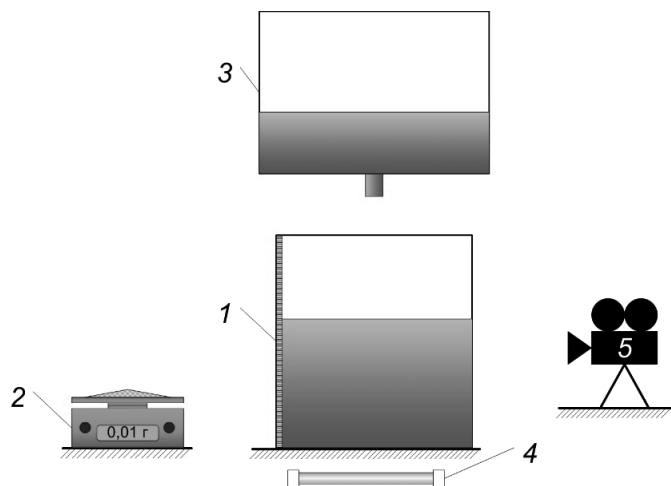


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – модель ковша; 2 – электронные весы; 3 – буферная емкость; 4 – галогенная лампа; 5 – видеокамера

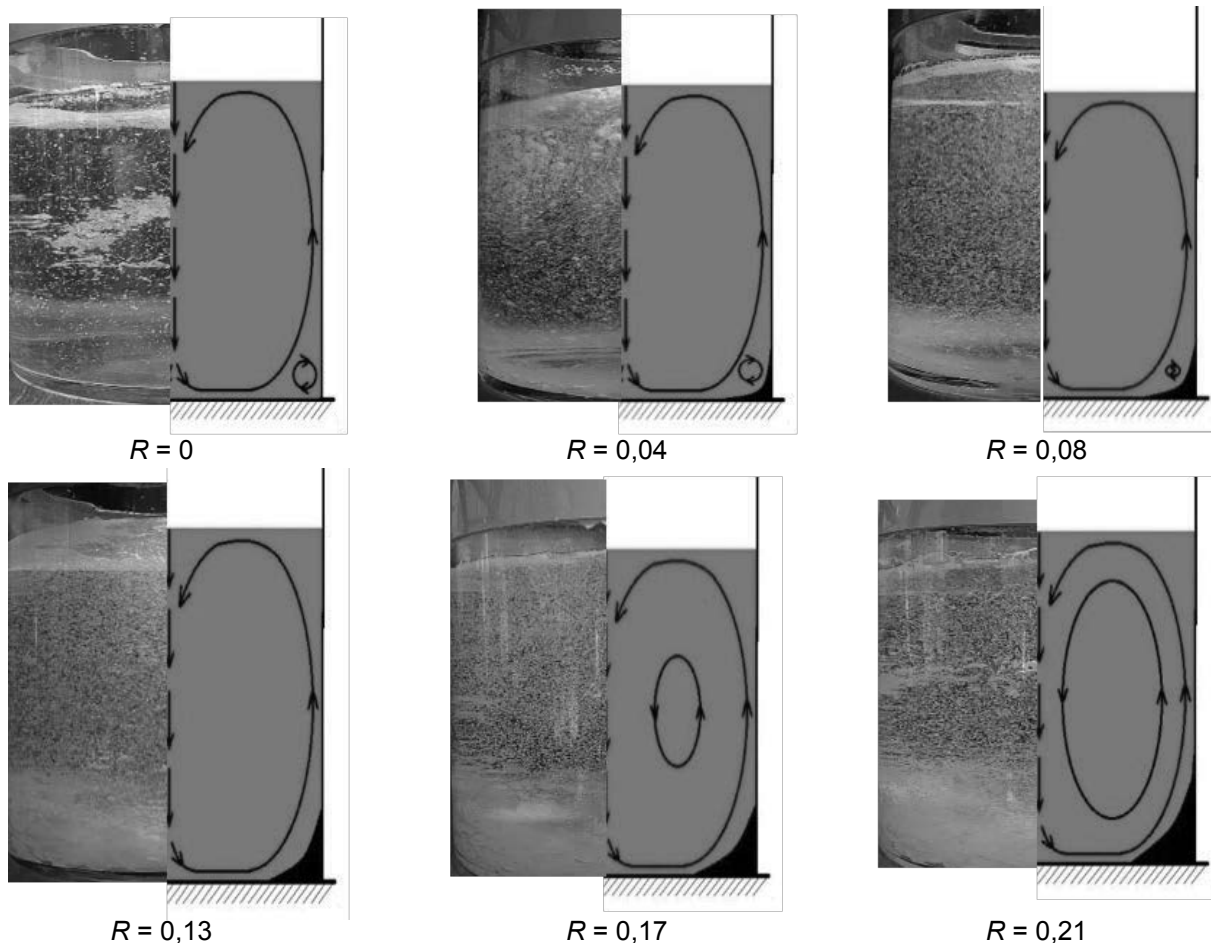


Рис. 2. Всплывание частиц стеарина в модели ковша с различным закруглением дна

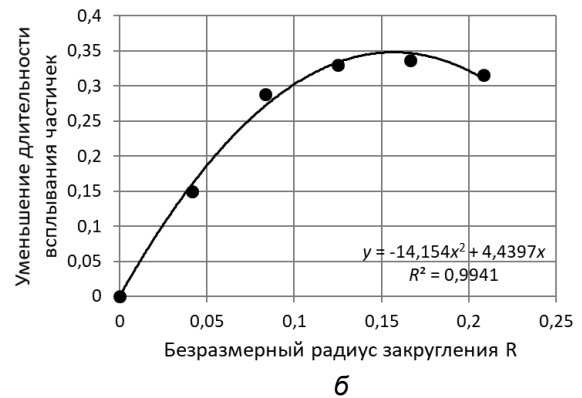
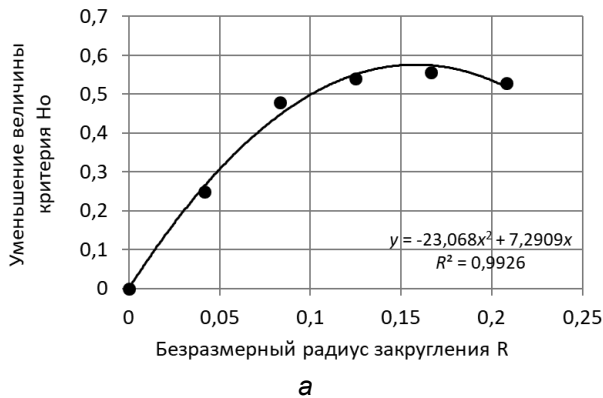


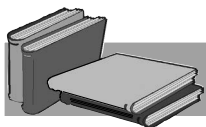
Рис. 3. Влияние закругления днища ковша на величину критерия гомохронности (а) и на продолжительность всплытия частиц (б)

безразмерного радиуса около 0,16. Так, в ковше емкостью 60 т и уровнем металла около 2,3 м продолжительность всплытия НВ размером 500 мкм уменьшится с 18 до 11 секунд. Продолжительность выдержки ковшей такой емкости перед разливкой составляет обычно около 10–15 мин. При обычной форме рабочего пространства ковша предельный размер НВ, которые успевают всплыть в шлак, составляет 570–800 мкм. При изменении рабочего пространства ковша на рекомендуемый с оптимальным радиусом закругления предельно низкий размер НВ, которые удалятся из стали, составит 395–555 мкм.

Выводы

По результатам физического моделирования авторами доказана возможность повышения эффек-

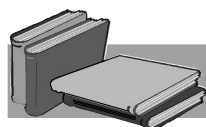
тивности удаления из стали НВ во время выдержки стали в ковше перед разливкой. Определено, что достижение поставленной цели возможно при незначительной модернизации конструкции футеровки сталеразливочных ковшей, а именно закругления на стыке днища и стен с радиусом закругления около 16 % от радиуса днища ковша. Время всплывания НВ при этом сокращается на 35 %. Предложенные меры позволяют уменьшить предельно низкий размер НВ, которые удаляются из ковша, примерно на 31 %. Перспективным направлением исследований является разработка конструкции специальных устройств типа «турбостоп», которые будут повышать эффективность рафинирования стали от НВ.



ЛИТЕРАТУРА

1. Величко О.Г., Стоянов О.М., Бойченко Б.М., Нiziaев К.Г. Технології підвищення якості сталі: підручник. – Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2016. – 196 с.
2. Лантух О.С., Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Методика фізичного моделювання спливання ансамблю неметалевих включень у сталеразливному ковші // *Математичне моделювання*. – 2018. – № 1 (38). – С. 95–99.
3. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.
4. Бapтизмaнський В.И., Яковлев Ю.Н., Паниотов Ю.С. Организация эксперимента: учеб. пособие. – К: УМКВО, 1992. – 244 с.
5. Лантух А.С., Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Физическое моделирование всплывания неметаллических включений в сталеразливочных ковшах малой емкости // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 1-2 (296-297). – С. 45–49.

Поступила 20.11.2018



REFERENCES

1. Velychko, O.H., Stoianov, O.M., Boichenko, B.M., Niziaiev, K.H. (2016). Technology for improving steel quality: textbook. Dnipropetrovsk: Seredniak T.K., 196 p. [in Ukrainian].
2. Lantukh, O.S., Molchanov, L.S., Synehin, Ye.V. (2018). Method of physical modelling of floating the group of nonmetallic inclusion in a teeming ladle. *Matematychnе modeliuвання. Mathematical modelling*, no. 1 (38), pp. 95–99 [in Ukrainian].
3. Markov, B.L., Kirsanov, A.A. (1984). Physical modeling in metallurgy. Moscow: Metallurgii, 119 p. [in Russian].
4. Baptizmanskiy, V.I., Yakovlev, Yu.N., Paniotov, Yu.S. (1992). Organization of the experiment. Kyiv: UMKVO, 244 p. [in Russian].
5. Lantukh, A.S., Molchanov, L.S., Synehin, Ye.V. (2018). Physical modeling of floating of the nonmetallic inclusions in steel-teeming ladles of small capacity. *Metall i lit'o Ukrainy*, no. 1–2 (296–297), pp. 45–49 [in Russian].

Received 20.11.2018

Анотація

Л.С. Молчанов¹, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник; **О.С. Лантух²**, аспірант; **Є.В. Синегін²**, канд. техн. наук, доц.,
e-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, Україна

²Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна

Визначення раціонального профілю футерівки сталерозливних ковшів для підвищення ефективності видалення неметалевих включень

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). Запропоновано нову конструкцію футерівки, яка шляхом коригування потоків рідкої сталі під час випуску з печі дозволяє поліпшити умови видалення неметалевих включень зі сталі.

Ключові слова

Сталерозливний ківш, конструкція футерівки, неметалеві включення.

Summary

L.S. Molchanov¹, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher;
A.S. Lantukh², Postgraduate student; **Ye.V. Synehin²**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua

¹Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

²National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Determination of the rational profile of the lining of steel-teeming ladles to improve the removal efficiency of non-metallic inclusions

In the article, by using methods of physical modeling, the process of removal of non-metallic inclusions from steel without external influences (argon bottom blowing, electromagnetic stirring, etc.) has been investigated. A new lining design has been proposed that corrects the liquid steel flows during tapping and improves the conditions for removing non-metallic inclusions from steel.

Keywords

Steel-teeming ladle, lining design, non-metallic inclusions.