

УДК 669.018.046:621.74.047

В. В. БЕЛОУСОВ^а, А. Я. БАБАНИН^б^а ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ^б ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**ОСОБЕННОСТИ ПОТОЧНОГО УДАЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ВКЛЮЧЕНИЙ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ
МНЛЗ**

Аннотация. Методом численного моделирования выполнены исследования движения неметаллических включений в виде алюмината кальция химического состава $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ в циркуляционных потоках в промежуточном ковше МНЛЗ в зависимости от их радиуса. Установлено, что для удаления НВ диаметром 100–30 мкм достаточно организовать восходящие потоки, а для удаления включений диаметром менее 30 мкм необходимо применять дополнительные устройства для продувки металла аргоном через пористую вставку.

Ключевые слова: конструкционные стали, неметаллические включения, численное моделирование, алюминаты кальция.

Современные требования к повышению качества конструкционных сталей, применяемых в гражданском и промышленном строительстве, машино- и автомобилестроении, судостроении, обуславливают необходимость повышения чистоты металла по неметаллическим включениям (НВ). Окончательным технологическим звеном, позволяющим осуществить их удаление, является промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [1]. Поэтому исследование влияния гидродинамических потоков металла в промежуточном ковше на удаление НВ является актуальной задачей.

Исследования проводили методом численного моделирования. Приняты следующие допущения:

- в процессе поточного рафинирования во включении не происходят никаких термодинамических, физических и химических процессов, оказывающих влияние на их движение;
- в связи с малыми размерами и массой включений, коллективная составляющая диффузионной скорости их движения не оказывают влияние на гидродинамические процессы.

Для оценки движения НВ в циркуляционных потоках применяли критерий Ричардсона (Ri), который равен отношению потенциальной энергии тела, погружённого в жидкость к его кинетической энергии:

$$Ri = \frac{(\rho_0 - \rho_\beta) \bar{g} x}{\rho_m v^2} \quad \text{или} \quad Ri = \frac{Ar}{Re^2}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность жидкости;
 ρ_β – плотность НВ;
 \bar{g} – ускорение свободного падения;
 x – радиус НВ;
 v – скорость движения циркуляционного потока.

Если число Ричардсона меньше единицы, то сила Архимеда (Ar) не играет существенной роли для течения. Если оно больше единицы, то сила плавучести доминирует (в том смысле, что конвекция не может эффективно перемешать расслоившуюся по плотности среду).

Исследования проводились для неметаллических включений с плотностью $\rho_\beta = 3\,032 \text{ кг/м}^3$ и радиусами включений: 5, 10, 15 и 20 мкм. Перечисленные параметры необходимы для определения числа

Архимеда (Ar), которое характеризует движение тел во внешней среде (жидкость или газ), возникающее вследствие неоднородности плотности в системе «тело – внешняя среда» [2]:

$$Ar = \frac{\bar{g}x^3(\rho_0 - \rho_\beta)}{\rho_0\nu^2}. \quad (2)$$

Для определения критерия Рейнольдса (Re), характеризующего отношение динамических сил к вязкостным:

$$Re = \frac{vx}{\nu}, \quad (3)$$

необходимо знать скорость движения НВ. Для этого определяется диффузионная скорость движения НВ, согласно закону Стокса характеризующая движение НВ в неподвижной среде:

$$\bar{w} = \frac{2x^2\bar{g}(\rho_0 - \rho_\beta)}{9\mu}, \quad (4)$$

где μ – динамическая вязкость среды.

Тогда коллективная скорость движения НВ относительно расплава задается формулой:

$$\bar{v} = (1 - k\alpha)\bar{w} + k\alpha\bar{V}, \quad (5)$$

где v и V – относительная скорость НВ и скорость расплава соответственно;
 $k \in [0, 1]$ – эмпирический коэффициент захвата, который определяет долю частицы, захваченной газовой фазой. Очевидно, чем он больше, тем меньше частица;
 α – газовая фаза, распределение которой описывалось в работе [3]. Максимальная скорость движения расплава в ПК, согласно расчетам проведенных в работе [4] составляет 0,44 м/с (расчеты проводились для 43-тонного ПК МК Азовсталь).

В противовес силам плавучести на НВ действует гидродинамическое сопротивление, которое зависит от формы тела, скорости потока и чисел подобия:

$$\chi = c_v \frac{\rho_0\nu^2}{2} S, \quad (6)$$

где c_v – безразмерный коэффициент сопротивления, зависящий от подобия критериев – Рейнольдса [5];
 S – характерная для данного тела площадь.

Результаты расчетов указанных величин сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Радиус НВ, м	Ar	χ , н/м ²	\bar{w} , м/с	\bar{V} , м/с	Re	Ri
0,000005	0,0007075	0,017584	$3,14 \cdot 10^{-06}$	0,3998	1,999	0,000177052
0,000010	0,00566	0,035168	$1,26 \cdot 10^{-05}$	0,3996	3,996	0,000354459
0,000015	0,0191025	0,052752	$2,83 \cdot 10^{-05}$	0,3994	5,991001	0,00053222
0,000020	0,04528	0,070336	$5,03 \cdot 10^{-05}$	0,3992	7,984002	0,000710338

Как видно, чем меньше коэффициент гидродинамического сопротивления (χ), тем больше включение структурировано в гидродинамический поток. С ростом радиуса НВ, критерий плавучести (Ar) растет в параболической зависимости, гидродинамическое сопротивление – почти линейно. Кроме того, силы плавучести (Ar) не влияют существенно на движение НВ к области шлака. Однако влияние конвекции (кинетической энергии, которую характеризует критерий Re^2) для НВ с малым радиусом не существенно.

Это подтверждают графические зависимости, представленные на рисунках 1 и 2.

Таким образом, силы плавучести с увеличением радиуса частицы значительно вырастают, то гидродинамическое сопротивление растет несущественно. А это значит, что попав в восходящий поток, частица малого радиуса может всплывать, а в нисходящем потоке – увлекаться в нижние слои расплава.

Если число Ричардсона меньше единицы, то сила Архимеда (Ar) не играет существенной роли для течения. Если оно больше единицы, то сила плавучести доминирует (в том смысле, что конвекция не

может эффективно перемешать расслоившуюся по плотности среду). Если рассчитать этот критерий для НВ, то получается следующая картина (таблица 2).



Рисунок 1 – Зависимость числа Архимеда от радиуса НВ.

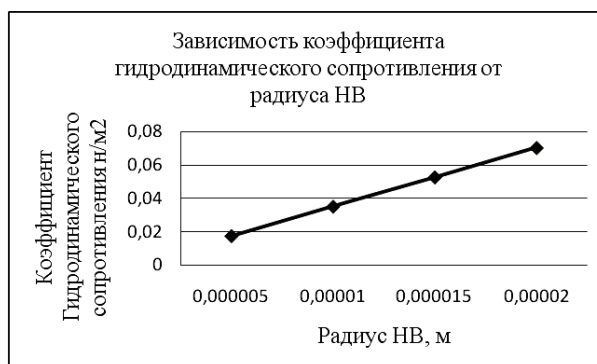


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от радиуса НВ.

Таблица 2 – Зависимость критерия Ричардсона от радиуса НВ

Радиус НВ, м	Критерий Рейнольдса	Критерий Ричардсона
0,000005	1,999	0,000177052
0,00001	3,996	0,000354459
0,000015	5,991001	0,00053222
0,00002	7,984002	0,000710338

Понятно, что силы плавучести не играют существенной роли в движении НВ в область шлака. Однако, наименьшее влияние конвекции (кинетической энергии) имеет место у НВ с малым радиусом. Что же касается коллективной скорости движения НВ, то при увеличении радиуса НВ в 2 раза, скорость уменьшается на 0,6 %. В таблице 1 представлена зависимость коллективной скорости движения НВ от радиуса:

Установлено, что силы плавучести с увеличением радиуса частицы значительно вырастают, а гидродинамическое сопротивление растет несущественно и попав в восходящий поток, частица малого радиуса может всплывать, а в нисходящем потоке – увлекаться в нижние слои расплава, т. е. оставаться в потоке. Для удаления НВ диаметром 100–30 мкм достаточно организовать восходящие потоки, а для удаления включений диаметром менее 30 мкм, необходимо применять продувку металла аргоном через пористую вставку. Полученные результаты применялись в условиях конвертерного цеха ПАО МК «Азовсталь».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроль неметаллических включений – ключевая проблема современной металлургии и материаловедение стали и сплавов железа [Текст] / А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, А. А. Немтинов [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедение. – 2007. – № 1. – С. 11–23.
2. Bloom, F. Mathematical Modeling of the Flotation Deinking Process [Текст] / F. Bloom, T. J. Heindel // Mathematical and Computer Modeling. – 1997. – V. 25, Issue 5, March. – P. 13–58.
3. Белоусов, В. В. Затвердевание металлов и металлических композиций [Текст] : Учебник / В. В. Белоусов, Ф. В. Недопекин, В. Е. Хрычиков, В. А. Лейбензон [и др.]. – Киев : Наукова думка, 2009. – 412 с.
4. Белоусов, В. В. Численное моделирование процессов перемешивания при продувке ванны агрегата «ковш-печь» [Текст] / В. В. Белоусов, В. Ф. Комаров, Е. И. Куликов // Математичне моделювання. – 2007. – № 2 (17). – С. 61–63.
5. Белоусов, В. В. Роль турбулентности в процессах непрерывного рафинирования стали в ванне промежуточного ковша МНЛЗ [Текст] / В. В. Белоусов // Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях : Сб. научн. тр. / под ред. А. Н. Смирнова. – Донецк : Ноулидж, 2013. – С. 157–161.

Получено 09.01.2017

В. В. БЕЛОУСОВ^a, А. Я. БАБАНИН^b ОСОБЛИВОСТІ ПОТОЧНОГО ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ МАЛИХ РОЗМІРІВ В ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МБЛЗ

^a ДООУ ВПО «Донецький національний університет», ^b ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Методом чисельного моделювання виконані дослідження руху неметалічних включень у вигляді алюмінату кальцію хімічного складу $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ в циркуляційних потоках в проміжному ковші МБЛЗ в залежності від їх радіусу. Встановлено, що для видалення НВ діаметром 100–30 мкм досить організувати висхідні потоки, а для видалення включень діаметром менше 30 мкм необхідно застосовувати додаткові пристрої для продувки металу аргоном через пористу вставку.

Ключові слова: конструкційні сталі, неметалеві включення, чисельне моделювання, алюмінати кальцію.

VYACHESLAV BILOUSOV^a, ANATOLY BABANIN^b FEATURES OF THIS REMOVAL OF NONMETALLIC INCLUSIONS OF SMALL SIZE IN THE TUNDISH LADLE OF CONTINUOUS CASTING MACHINE

^a Donetsk National University, ^b Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. By the method of numerical simulations it has been carried out the investigations of nonmetallic inclusions (NMI) in the form of calcium aluminates composition $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ in the circulation flow in the intermediate ladle caster according to their radius. It has been found out that to remove NMI 100–30 micron diameter sufficiently organize updrafts, and to remove particles with a diameter less than 30 microns it is necessary to use additional devices for blowing argon through the porous metal insert.

Key words: constructional steel, nonmetallic inclusions, numerical simulation, calcium aluminates.

Белоусов Вячеслав Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии ГОУ ВПО. Научные интересы: математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в металлургических изделиях.

Бабанин Анатолий Яковлевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации и сервиса автомобилей, технологических машин и оборудования ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: конструкционные трубные стали для производства труб большого диаметра магистральных газо- нефтепроводов.

Білоусов Вячеслав Володимирович – доктор технічних наук, завідувач кафедри фізики нерівноважних процесів, метрології та екології ДОНУ ВПО. Наукові інтереси: математичне моделювання гідродинамічних і тепломасобмінних процесів в металургійних виробках.

Бабанін Анатолій Якович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів, технологічних машин та обладнання ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: конструкційні трубні сталі для виробництва труб великого діаметру магістральних газо-нафтопроводів.

Bilousov Vyacheslav – D.Sc. (Eng.), Professor, the Head of the Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology Department, Donetsk National University. Scientific interests: mathematical modeling of hydrodynamic and heat and mass processes in metallurgical products.

Babanin Anatoly – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Technical Maintenance and Service of Cars and Technological Machines and Equipment Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: structural steel pipes for the production of large-diameter pipes for main gas and oil pipelines.