

Д. т. н. А. Н. Смирнов¹ (✉), к. т. н. В. Г. Ефимова², А. В. Кравченко¹

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

УДК 669.18:621.746.329.047

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОЛЬЦЕВОГО ПОРИСТОГО ОГНЕУПОРНОГО ПРОДУВОЧНОГО БЛОКА ДЛЯ РАФИНИРОВАНИЯ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ

Разработан кольцевой продувочный блок с оптимальным размером пор, который в наибольшей степени способствует удалению неметаллических включений в ванне промежуточного ковша. Эффективность разработанной конструкции кольцевого продувочного блока подтверждена теоретическими расчетами, данными физического моделирования и промышленными испытаниями.

Ключевые слова: промежуточный ковш, кольцевой продувочный блок, неметаллические включения, флотация, физическое моделирование.

Металлургическая практика применения продувочных устройств в промежуточных ковшах подтверждает, что при некоторых условиях количество неметаллических включений в расплавленной стали уменьшается при определенных режимах и условиях ведения продувки [1–3]. Механизм рафинирования стали при ее продувке аргоном заключается в захвате неметаллических включений пузырьками аргона и транспортировании их к слою шлака [4, 5].

Между тем данные работ [6–8] свидетельствуют, что при продувке инертным газом в промежуточном ковшу необходим строгий контроль размера пузырей, а также скорости их образования, поскольку высокий расход газа приводит к эмульгированию шлака и оголению зеркала металла, что способствует его вторичному окислению. При этом установлено, что по мере удаления места расположения продувочного блока от стакана-дозатора гомогенизирующее воздействие продувки снижается.

Подача инертного газа в промежуточный ковш осуществляется через продувочные устройства в дне промежуточного ковша. Основные недостатки применяемых в настоящее время устройств: низкая эффективность удаления неметаллических включений вследствие использования продувочных блоков с различным диаметром пор; возможность обработки только локальных объемов

металла в промежуточном ковшу, находящегося непосредственно над продувочным устройством; повышенный расход газа, в результате чего происходит эмульгирование шлака, а также снижение температуры разливаемого металла [9–11].

Цель данной работы — создание пористого огнеупорного блока, который в наилучшей мере способствует удалению неметаллических включений, а также обеспечивает стабильную газопроницаемость в течение длительного периода эксплуатации (несколько десятков часов) и возможность оперативной корректировки расхода газа при продувке.

По данным работы [12], общее количество прикреплений в секунду составит:

$$N_{\text{об}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{H}{V_{\text{ст}}} \cdot \frac{T_0}{T_{\infty}} \cdot Q_{\text{г}} \frac{3}{d_{\text{п}}} \rho_{\text{в}} = K \rho_{\text{в}}, \quad (1)$$

где H — высота металлической ванны, м; $V_{\text{ст}}$ — объем жидкой стали, перемещаемый пузырем в процессе флотации на свободной поверхности, м³; T_0 и T_{∞} — температура газа на входе и в промежуточном ковшу соответственно, °С; $Q_{\text{г}}$ — расход газа, м³·с⁻¹; $d_{\text{п}}$ — размер пузыря, м; $\rho_{\text{в}}$ — плотность включения, кг·м⁻³.

Тогда величину удаления неметаллических включений δ , %, можно представить как

$$\delta = 100[1 - \exp(-K\tau)], \quad (2)$$

где τ — время продувки, с.

Данные расчетов, выполненных с использованием уравнений (1) и (2), свидетельствуют, что наилучшая эффективность удаления неметаллических включений наблюдается при диаметре пузырей 1,0–3,25 мм и расходе газа 10–12 л·мин⁻¹. При этом следует учесть тот факт, что формирование пузы-



А. Н. Смирнов
E-mail: stalevoz@i.ua

рей меньших размеров сопровождается определенными технологическими эффектами, которые следует учитывать при реализации метода продувки в промышленных условиях. К ним относятся большее время всплытия пузыря, а также возможность захвата всплывающих пузырей конвективными потоками и их затягивания вглубь жидкой ванны и в зону выпускного отверстия стакана-дозатора. Следовательно, при выборе оптимального размера пузырей необходимо учитывать не только высокую эффективность удаления включений, но и минимальные значения времени рафинирования (времени, необходимого пузырям для всплытия через 1 м столба стали) при достаточно высокой скорости всплытия. Так, по данным работы [4], горизонтальная составляющая скорости жидкой стали в зоне выпускного отверстия стакана-дозатора $0,1\text{--}0,25\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, скорость всплытия пузыря диаметром 1,0 и 3,25 мм $0,09$ и $0,3\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ соответственно.

Исходя из выполненных расчетов, можно предположить, что для процесса флотации неметаллических включений в ванне промежуточного ковша можно рекомендовать диаметр всплывающих пузырей аргона 3,0–3,25 мм и расход газа $10\text{--}12\text{ л}\cdot\text{мин}^{-1}$.

Известно, что диаметры пузырьков аргона зависят от размеров отверстий огнеупора, через который вдувается инертный газ. Поэтому весьма важным фактором для промышленной реализации метода продувки металла инертным газом в промежуточном ковше является применение пористых огнеупорных блоков с мелкими порами одинакового размера. Между тем к эксплуатационным свойствам и прочности таких блоков предъявляются достаточно жесткие требования, поскольку они работают в крайне тяжелых условиях, сопряженных с длительным контактом с жидким металлом, теплообменами, механическим воздействием вследствие контакта с конвективными потоками и др.

При разработке конфигурации продувочного блока были приняты некоторые технологические условия. Конструкция продувочного блока должна обеспечивать:

- подачу пузырьков аргона замкнутым контуром вокруг канала истечения металла из промежуточного ковша;
- отсутствие существенных изменений в схеме футеровки промежуточного ковша;
- отсутствие влияния положения и конфигурации пористой вставки на прочностные показатели продувочного блока;
- равномерный процесс инжектирования вдуваемого аргона в металл в течение длительного периода разлива (8–12 плавов);
- вдувание аргона мелкими пузырьками (диаметром не более 3,25 мм) в пузырьковом режиме;
- принятие во внимание специфики эксплуатации и обслуживания промежуточного ковша.

Как показали выполненные нами металлографические исследования, применение для

продувки пористого огнеупорного изделия на основе MgO в целом обеспечивает необходимые функциональные показатели для вдувания газа. Химический состав исследуемой пористой вставки, мас. %: MgO 74,85, Al₂O₃ 4,626, SiO₂ 4,13, CaO 16,198, MnO 0,123. Однако размеры пористых отверстий в изделии при этом колебались в значительных пределах (рис. 1, а), что обусловило жесткие ограничения по расходу вдуваемого аргона в силу перехода режима продувки из пузырькового в турбулентный. При этом в перемешивание вовлекаются частички покровного шлака, которые затем выявляются в готовой продукции в виде включений размерами 20–200 мкм.

Для увеличения эффективности продувки металла в промежуточном ковше в пузырьковом режиме в работе предложено использовать в качестве продувочных элементов корундовые керамические трубки (рис. 1, б), в которых выполнены тонкие продувочные каналы определенного диаметра.

В настоящей работе разработана оригинальная конструкция огнеупорного продувочного

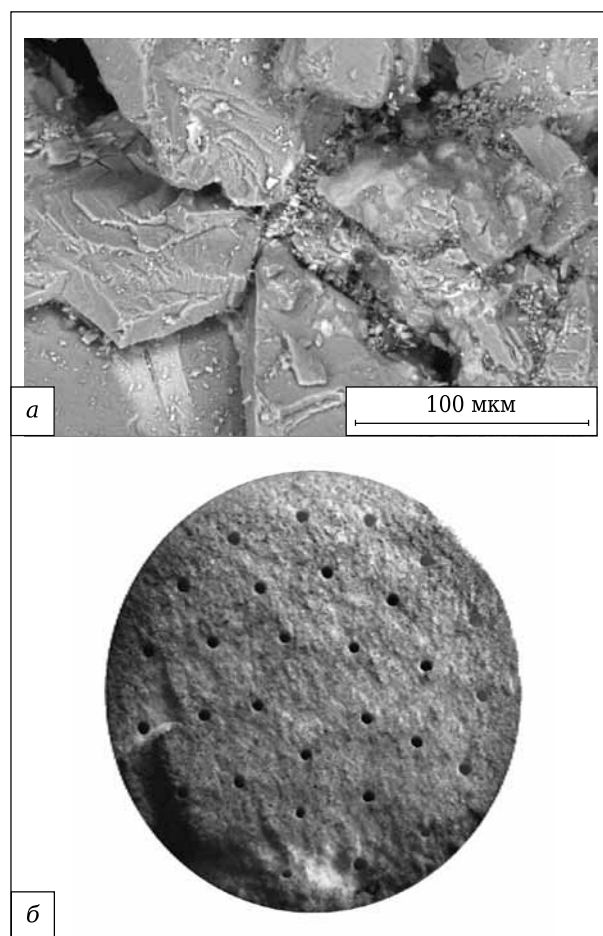


Рис. 1. Пористый продувочный блок: а — микроструктура ($\times 500$); б — торец керамической трубки с регламентированными продувочными каналами (диаметр трубки 10, продувочных отверстий 0,14–0,16 мм)

блока, выполненного в виде кольца. В тело кольца, выполненного из жаропрочного бетона, устанавливали керамические элементы (трубки), в которых выполнены каналы диаметром 0,14–0,16 мм для подачи аргона. Расстояние между керамическими продувочными трубками выбирали таким образом, чтобы восходящие газожидкостные потоки перекрывались между собой на высоте 0,3–0,4 от высоты налива металла в промежуточном ковше (рис. 2). В технологическом плане применение продувочных элементов с малым диаметром отверстий позволяет диспергировать пузырьки газа и обеспечивать продувку в пузырьковом режиме, не вовлекая в перемешивание покровный шлак [13, 14].

Предварительную оценку эффективности удаления неметаллических включений в ванне промежуточного ковша с использованием разработанного продувочного кольцевого блока выполняли на физической модели, что позволило оценить оптимальный размер пор и возможность удаления неметаллических включений.

Масштаб модели 1:4, в качестве базовых критериев подобия были приняты критерии Фруда и гомохронности. В качестве рабочей жидкости использовали воду, которая имеет с жидкой сталью близкие показатели кинематической вязкости. Покровный шлак на поверхности металла в промежуточном ковше имитировали с помощью силиконового или трансформаторного масел, имеющих высокое поверхностное натяжение. При этом вязкость масла может изменяться в значительных пределах в зависимости от его температуры. Это позволяет изучать процесс перемешивания жидкости в промежуточном ковше в совокупности с явлением вовлечения покровного шлака в перемешивание.

Характер поведения и всплытия неметаллических включений изучался с помощью введения в защитную трубу, устанавливаемую между сталеразливочным и промежуточным ковшами, специальной механической смеси (взвеси) гидрофобных частиц плотностью несколько меньше, чем у воды. Для этих целей в работе разработана специальная многокомпонентная смесь из нескольких типов масла и эмульсий и очень мелких твердых частиц.

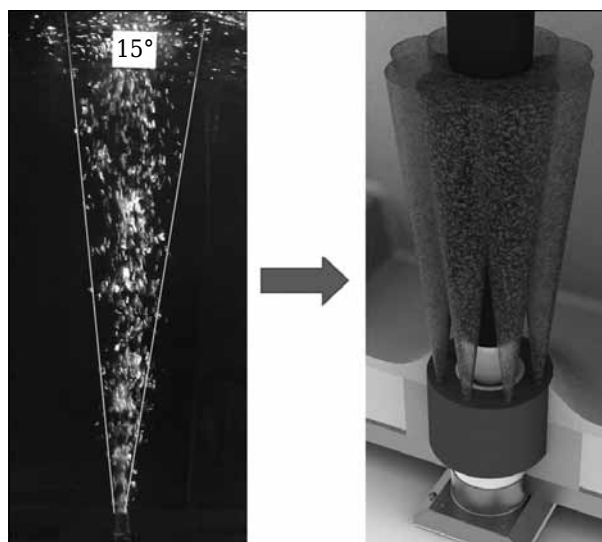


Рис. 2. Методика определения расположения и количества продувочных трубок в гнездовом блоке на основе холодного моделирования

На физической модели было выполнено сравнение эффективности продувки через продувочные устройства различной конструкции и с различным диаметром газовыпускных каналов. Для этого в защитную трубу вводили 200 г субстанции для имитации загрязнения стали неметаллическими включениями. Жидкость, которая вытекала из промежуточного ковша, собирали в специальной емкости, отстаивали в течение нескольких часов и вещество, имитирующее неметаллические включения, взвешивали. Каждый эксперимент повторяли 3 раза, результаты находили как среднее арифметическое. Эффективность отделения включений Θ , %, определяли по формуле

$$\Theta = \frac{M - m}{M} \cdot 100, \quad (3)$$

где M — масса вводимого в защитную трубу вещества, имитирующего неметаллические включения, г; m — масса вводимого вещества, всплывшего на поверхность жидкости промежуточного ковша, г.

Обобщение полученных экспериментальных результатов (см. таблицу) позволяет акценти-

Оценка эффективности удаления неметаллических включений из промежуточного ковша при различных вариантах организации движения циркуляционных потоков

Вариант	Элементы управления потоками, установленные в промежуточном ковше				Доля вещества, удаленного в шлак, %	
	металлоприемник типа «turbostop»	перегородка	продувочная фурма, диаметр поры 1,5 мм	продувочный блок-балка, диаметр поры 0,14–0,15 мм		кольцевая фурма, диаметр поры 0,14–0,16 мм
1	●	●	● (4)*	—	75–80	
2	●	●	● (6)*	—	84–89	
3	●	●	—	● (4)*	86–90	
4	●	●	—	● (6)	82–86	
5	●	—	—	—	● (4)	93–96
6	●	●	—	—	● (6)	91–95

* В скобках указан расход дувяемого газа, л·мин⁻¹.

ровать внимание на том, что применение кольцевого продувочного блока с диаметром пор 0,14–0,16 мм по совокупности достигаемых эффектов может рассматриваться как достаточно эффективный технологический прием для обеспечения флотации неметаллических включений.

В подтверждение теоретических расчетов и данных физического моделирования были проведены промышленные испытания на 60-т промежуточном ковше слябовой двухручьевой МНЛЗ. Цель проведения промышленных испытаний — определение оптимальной конструкции продувочного устройства, которая наилучшим образом способствует удалению неметаллических включений. Использовали три типа продувочных устройств:

- 1) протяженная продувочная фурма с порами диаметром 1,5 мм;
- 2) продувочный блок-балка с порами диаметром 0,14–0,16 мм;
- 3) кольцевой продувочный блок новой конструкции с порами диаметром 0,14–0,16 мм.

Выбор схемы расположения перегородок и геометрических параметров продувочных элементов в дне промежуточного ковша осуществляли в соответствии с результатами физического моделирования.

Футеровка промежуточного ковша включает в себя теплоизоляционный слой, расположенный между стальным кожухом и слоем высокоглиноземистого бетона, который служит по меньшей мере 800–1000 плавов. Рабочий слой футеровки (на основе магнезита) наносят методом холодного торкретирования. Дозирование стали и ее подачу в кристаллизатор осуществляют с помощью системы огнеупоров стопор-моноблок – стакан-дозатор – погружаемый стакан. Погружаемый стакан (при возникновении необходимости) меняют с помощью устройства для быстрой замены, которое расположено под дном промежуточного ковша и предполагает подачу аргона в стакан-дозатор.

Монтаж продувочной фурмы и блок-балки в дне промежуточного ковша не вызывает дополнительных трудностей и соизмерим по сложности с операциями футеровки. Режим сушки и разогрева футеровки промежуточного ковша, оснащенного продувочной фурмой, не требует изменений и полностью соответствует принятому в цехе графику. Сравнительный анализ влияния трансформации характера перемешивания стали в промежуточном ковше при наличии продувочных протяженных фурм и блок-балок на количество и состав неметаллических включений в непрерывнолитых слябах и готовом прокате выполняли путем разливки опытно-промышленных серий плавов на МНЛЗ № 1 ОАО «Алчевский металлургический комбинат». Всего было разлито 8 серий по 6–10 плавов каждая. Разливали низ-

коуглеродистые, сверхнизкоуглеродистые и трубные стали.

Загрязненность стали оценивали на полированных шлифах на микроскопе «Axiovert-200» в светлом, темном и DIC полях при увеличении в 100 крат по ГОСТ 1778 и ASTM E45-97 (метод наилучших полей).

Установлено, что по большинству показателей, полученных для сравнительного и опытного металла, результаты достаточно близки между собой. Наибольшие различия наблюдаются в показателе точечные включения. При этом максимальный балл для опытных и сравнительных слябов равен 2. В опытном металле, обработанном аргоном через многоканальную протяженную фурму, количество крупных одиночных включений (1,5 балла и выше) на 5–10 % меньше, чем в сравнительном, а при использовании продувочного блока-балки на 10–15 %.

Небольшое снижение содержания неметаллических включений можно объяснить значительным колебанием размеров отверстий, что, соответственно, обуславливает образование пузырьков различных размеров. Эффективность продувки через пористые блоки в значительной мере зависит от реального соотношения крупных и мелких пор, поскольку через крупные поры может проходить большая часть вдуваемого аргона.

При разработке конструкции кольцевой продувочной фурмы предусматривалась ее установка вместо гнездового блока, фиксирующего стакан-дозатор (рис. 3). Установка продувочной фурмы в дно промежуточного ковша (рис. 4) и подвод аргона не вызывали дополнительных монтажных трудностей и были соизмеримы по сложности со штатными операциями футеровки ковша.

Всего было разлиты 4 серии по 6–8 плавов в каждой, получено при этом 8,5 тыс. т слябов. В процессе исследований разливали сталь мар-

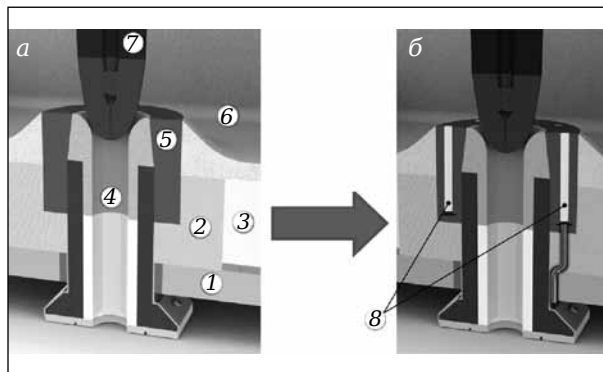


Рис. 3. Схематическое изображение трансформации разливочного узла промежуточного ковша (а) с установкой продувочных элементов в виде кольцевого блока (б): 1 — кожух промежуточного ковша; 2 — набивная масса; 3 — арматурный слой; 4 — стакан-дозатор; 5 — гнездовой блок; 6 — рабочий слой; 7 — стопор-моноблок; 8 — продувочные элементы

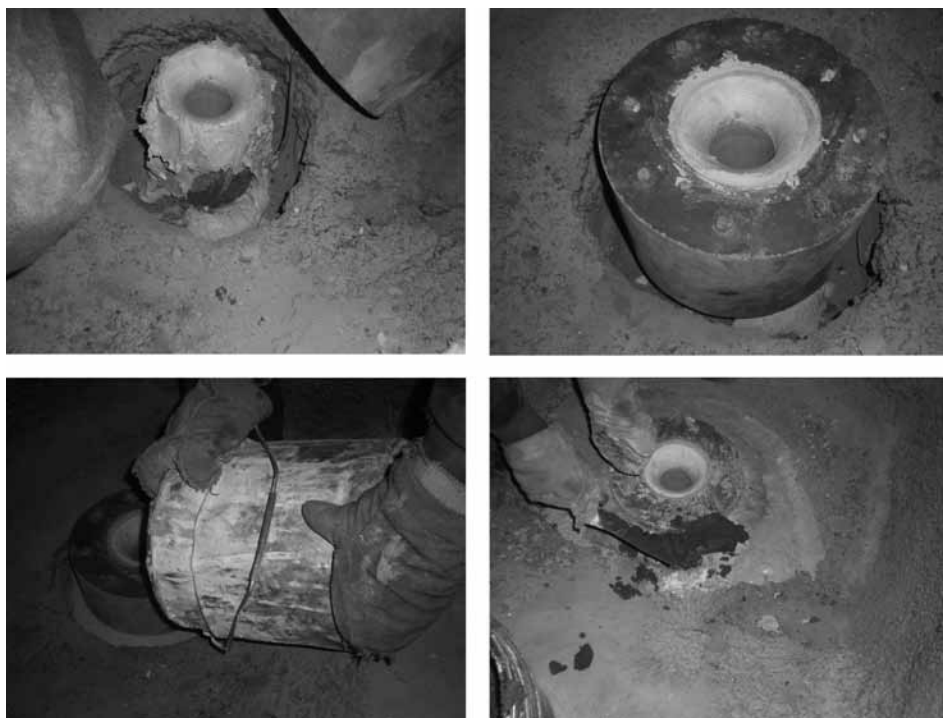


Рис. 4. Внешний вид и установка кольцевого продувочного блока в дне промежуточного ковша слябовой МНЛЗ ПАО «Алчевский металлургический комбинат»

ки BVA на слябы сечением 200×1245 мм. Содержание в стали, %: С 0,14–0,17, Мп 0,7–1,0, Si 0,15–0,35, S <0,015, P <0,020, Al = 0,020–0,040. Сталь предварительно обрабатывалась на установке ковш-печь (в том числе продувалась аргоном) и затем подвергалась вакуумной обработке на установке VD/VOD.

Продувочные элементы первой и второй конструкции устанавливали на один из ручьев (сравнительный), второй ручей (с продувкой через кольцевую фурму) использовали как опытный.

Как показали испытания и визуальные наблюдения, продувка через кольцевой блок обеспечивала стабильный процесс перемешивания металла в промежуточном ковше в течение всего периода эксплуатации и возможность оперативной корректировки величины расхода газа при продувке в диапазоне от 6 до 16 л·мин⁻¹. При этом поверхность покровного шлака, расположенного около стопора, практически не подвергалась возмущениям и разрушениям, выход аргона в атмосферу происходил через отверстия и трещины, образовавшиеся в слое шлака. Вдувание аргона через кольцевой продувочный блок не оказывало существенного влияния на процесс работы стопора и не приводило к его дополнительным вибрациям и колебаниям. Осмотр поверхности стопоров с кольцевым продувочным блоком и сравнительного после окончания разливки позволил установить, что характер их износа в верхней части (в том числе шлакового пояса) одинаков.

Контроль работы продувочных блоков осуществляли во временные отрезки, соответствующие замене сталеразливочного ковша. При падении уровня металла в промежуточном ковше на 250–300 мм наблюдалось интенсивное бурление и разбрызгивание шлака в области выхода пузырьков аргона в атмосферу.

В целом продувочные блоки обеспечивали стабильную газопроницаемость в течение всего периода эксплуатации и возможность оперативной корректировки величины расхода газа при продувке в диапазоне от 6 до 16

л·мин⁻¹. Износ материала продувочного блока по высоте после разливки 6 плавов, т. е. прохождения ~900 т стали через разливочный узел, 10–15 мм.

Влияние продувки аргоном на температуру стали оценивали по замерам температуры непосредственно в кристаллизаторах МНЛЗ. Всего было выполнено 46 замеров. Установлено, что сталь, попадающая в кристаллизатор с продувкой аргоном, в среднем имеет температуру на 2,0–2,5 град ниже, чем в кристаллизаторе без продувки. Максимальные отклонения по ручьям составили 5 град.

Сравнительный анализ эффективности трансформации характера перемешивания стали в промежуточном ковше при наличии продувочных элементов различной конструкции на количество и состав неметаллических включений в непрерывнолитых слябах и готовом прокате проводили по трем стандартам: ГОСТ 1778, ASTM EN 45-05 (Стандартный метод испытания на неметаллические включения), DIN 50602.

Установлено, что в опытном и сравнительном металле имеются преимущественно тонкие сульфидные включения до 0,5 балла, точечные оксидные включения до 0,5 балла и силикатные включения как глобулярной, так и строчечной формы до 4 балла. На всех нетравленных микрошлифах встречаются неметаллические включения в виде скоплений (конгломератов) мелких включений округлой и неправильной геометрической формы. Мак-

симальные размеры крупных включений для сравнительного металла достигают 90 мкм, а для опытного — 50 мкм. В листах от опытных и сравнительных слябов наблюдается высокий балл недеформирующихся силикатов, что указывает на высокую загрязненность стали этими включениями.

В опытном листе оксидов и сульфидов меньше, чем в сравнительном. На микрошлифах всех плавок крупные силикатные включения округлой формы располагаются близко к катаной поверхности (на глубине 0,08–0,73 мм), а некоторые выходят на поверхность.

Установлено, что по большинству показателей полученные для сравнительного и опытного металла результаты достаточно близки между собой. Наибольшие различия наблюдаются в показателе точечные включения. При этом максимальный балл для опытных и сравнительных слябов равен 2. Однако в опытных слябах количество крупных одиночных включений (1,5 балла и выше) на 20–25 % ниже при вдувании аргона через продувочный блок 10–12 л/мин.

Библиографический список

1. **Tassot, P.** Ways of improving steel quality in the tundish / *P. Tassot, N. Reichert* // *Revue de metallurgie*. — 2010. — № 107. — P. 179–185.
2. **Zhang, L.** State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting / *L. Zhang, B. Thomas* // *Metallurgical and Materials Transactions B*. — 2006. — Vol. 37, № 5. — P. 733–761.
3. **Zhang, L.** Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation / *L. Zhang, S. Taniguchi* // *International Materials Reviews*. — 2000. — Vol. 45, № 2. — P. 59–82.
4. **Arcos-Gutierrez, H.** Mathematical analysis of inclusion removal from liquid steel by gas bubbling in a casting tundish / *H. Arcos-Gutierrez, J. de J. Barreto, S. Garcia-Hernandez* [et al.] // *Applied Mathematics*. — 2012. — № 4. — P. 1–16.
5. **Смирнов, А. Н.** Рафинирование стали в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ при продувке аргоном через кольцевую пористую фурму / *А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко* [и др.] // *Сталь*. — 2013. — № 12. — С. 14–20.
6. **Cwudzinski, A.** Numerical simulation of liquid steel flow and behaviour of non-metallic inclusions in one-strand slab tundish with subflux turbulence controller and gas permeable barrier / *A. Cwudzinski* // *Ironmaking and Steelmaking*. — 2010. — Vol. 37, № 3. — P. 169–180.
7. **Kumar, D. S.** Forced flotation of inclusions in tundish / *D. S. Kumar, T. Rajendra, R. Prasad* [et al.] // *Ironmaking and Steelmaking*. — 2009. — Vol. 36, № 6. — P. 470–475.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях двухручьевых слябовых МНЛЗ ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (г. Алчевск, Украина) выполнены промышленные испытания технологии продувки стали аргоном в промежуточном ковше через кольцевую фурму, расположенную в области установки стакано-дозатора. Продувочные блоки обеспечивали стабильную газопроницаемость в течение всего периода эксплуатации, а также возможность оперативной корректировки величины расхода газа при продувке в диапазоне от 6 до 16 л·мин⁻¹. После разлива 6 плавок износ кольцевого продувочного блока составил 10–15 мм. Таким образом, выбранные для изготовления кольцевого блока огнеупорные материалы фирмы PRCO (КНР) в достаточной степени удовлетворяют условиям эксплуатации и могут быть использованы при последующем производстве таких продувочных узлов.

Установлено, что применение кольцевой фурмы с порами диаметром 0,14–0,16 мм и вдувание аргона в пузырьковом режиме обеспечивают определенный рафинирующий эффект в части удаления крупных неметаллических включений.

8. **Минаев, Ю. А.** Физикохимия в металлургии / *Ю. А. Минаев, В. В. Яковлев*. — М. : МИСИС, 2001. — 320 с.
9. **Смирнов, А. Н.** Непрерывная разливка стали / *А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан*. — Донецк : Цифровая типография, 2011. — 482 с.
10. **Rogler, J.** Modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling / *J. Rogler*. — Canada : Eng. Ryerson University, 2004. — 54 p.
11. **Zhong, L. C.** Fluid flow behaviour in slab continuous casting tundish with different configurations of gas bubbling curtain / *L. C. Zhong, L. Y. Li, B. Wang* [et al.] // *Ironmaking and Steelmaking*. — 2008. — Vol. 35, № 6. — P. 436–440.
12. **Nguyen, A. V.** On modelling of bubble-particle attachment probability in flotation / *A. V. Nguyen, J. Ralston, H. J. Schulze* // *International Journal of Mineral Processing*. — 1998. — Vol. 53, № 4. — P. 225–249.
13. **Пат. 103293 Украина.** Способ рафинирования металлического расплава в промежуточном ковше / Сердюков А. О., Смирнов А. Н., Кравченко А. В. и др. ; заявл. 29.04.13 ; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18.
14. **Пат. 103294 Украина.** Устройство для рафинирования металлического расплава в промежуточном ковше / Сердюков А. О., Смирнов А. Н., Кравченко А. В. и др. ; заявл. 03.06.13 ; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18. ■

Получено 24.03.14

© А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова,
А. В. Кравченко, 2014 г.