

УДК 621.74.047**А.Н. Смирнов, В.Г. Ефимова, А.В. Кравченко, К.Е. Писмарев****УДАЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ИЗ СТАЛИ В ПРОМКОВШЕ ПРИ ЕЕ ПРОДУВКЕ АРГОНОМ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ БЛОКИ**

В результате выполненных комплексных исследований показано, что продувка жидкой ванны металла в промковше аргоном обеспечивает рафинирующий эффект в части удаления крупных неметаллических включений. Наибольший результат может быть достигнут при использовании пористых продувочных блоков, обеспечивающих продувку в пузырьковом режиме с диаметром пузырьков менее 3 мм. В промышленных условиях установлено, что при продувке стали аргоном в промковше количество крупных неметаллических включений (1,5 балла и выше) на 10-25% ниже, чем в сравнительных слябах. Наилучшие результаты были достигнуты при расходе вдуваемого газа 10-12 л/мин на один продувочный блок.

Ключевые слова: неметаллические включения, продувка, рафинирование, промежуточный ковш, продувочный блок, пузырек.

Введение и анализ публикаций по теме исследования

Образование неметаллических включений, происходящее в ходе внепечной обработки и непрерывной разливки стали, непосредственно связано с поведением кислорода, находящегося в металле, шлаке и футеровке сталеразливочного и промежуточного ковшей, а также с эмульгированием частиц шлака при принудительном перемешивании и технологических переливах металла [1,2]. Удаление неметаллических частиц из стали при продувке инертными газами происходит благодаря их прикреплению к пузырьку на границе металл–газ [3]. По данным [4] время, необходимое для перехода неметаллических включений через межфазную границу металл – газ, может оцениваться как $10^{-4} - 10^{-6}$ с. Это свидетельствует о том, что практически любое столкновение неметаллической частицы с пузырьком газа независимо от ее химического состава и гидродинамических условий должно приводить к прикреплению неметаллической фазы к пузырю. Тем не менее, на практике столь значительного снижения содержания неметаллических включений при обычных режимах продувки не достигается, что следует рассматривать как подтверждение того факта, что далеко не все столкновения пузырьков с включениями приводят к их сцеплению. Кроме того, некоторая часть неметаллических включений затягивается в металлическую ванну в области бурления и выхода пузырьков из металла в шлак.

Благоприятные условия для всплытия и удаления неметаллических включений создаются во время пребывания стали в промковше МНЛЗ. Современный промковш, как правило, оснащен специальными приспособле-

ниями, обеспечивающими всплытие и отделение неметаллических включений в результате правильной организации потоков движения металла, его фильтрации и продувки инертным газом [5,6]. Вместе с тем выбор рациональной конструкции промковша и оптимальных параметров продувки зависит от определенной совокупности критериев и технологических параметров, что обуславливает необходимость проведения исследований применительно к конкретной МНЛЗ.

Цель работы

Целью настоящего исследования было проведение комплексных теоретических, лабораторных и промышленных исследований по оценке эффективности удаления неметаллических включений в промковше МНЛЗ и определение рациональных значений интенсивности продувки, которая бы обеспечивала оптимальный размер газовых пузырьков, а также не приводила к оголению зеркала металла и захвату шлаковой фазы.

Основная часть

Во время интенсивной продувки, охватывающей весь объем жидкой ванны, в ней устанавливается режим развитой однородной и изотропной турбулентности, при которой укрупнение взвешенных частиц за счет пульсаций конвективных потоков происходит быстрее.

Важнейшим результатом продувки металлической ванны инертным газом является быстрое удаление неметаллических включений за счет интенсивного их укрупнения в потоках, обтекающих всплывающие пузырьки. Удаление неметаллических включений из стали в шлак может осуществляться за счёт флотации взвеси всплывающими пузырьками и ускоренного укрупнения их в образующихся потоках. Время быстрого градиентного укрупнения монодисперсной взвеси τ_{zp} можно определить из соотношения [3]:

$$\tau_{zp} = \frac{2,44 \cdot 10^{-4}}{n_0 r^3} \cdot Q \frac{R}{\sqrt[3]{1 + \frac{U}{Q}}} \quad (1)$$

где n_0 – количество частиц неметаллических включений; r – радиус частиц, *мкм*; R – радиус всплывающих пузырьков, *мм*; Q – расход газа, *л/мин*; U – скорость движения металла, *м/мин*.

Из этого выражения следует, что τ_{zp} линейно уменьшается с уменьшением размера пузырей и несколько в меньшей степени – с увеличением расхода газа. Соответственно рафинирующую продувку целесообразно осуществлять в режиме мелких пузырьков, равномерно распределённых по объёму расплава.

Между тем, различная степень удаления из стали неметаллических включений разного химического состава при идентичных гидродинамических условиях свидетельствует о разной эффективности встреч частиц друг с другом и межфазной поверхностью. Устойчивость дисперсной системы, которой является расплав стали, в условиях, когда оправдан процесс укрупнения, определяется поведением тонких прослоек среды, разделяющих частицы [7]. Если принять, что агрегация неметаллических включений между собой и их переход на поверхность газового пузырька происходит после уменьшения и разрыва разделительного слоя, то фактором, определяющим устойчивость плёнок металла, по данным Б.В. Дерягина, является расклинивающее давление [8]:

$$\Pi = P^{час.} - P^{пл.} = P^{пуз.} - P^{пл.} = -\frac{\partial(\sigma^{час.-пл.} - \sigma^{пуз.-пл.})}{dl} \quad (2)$$

где $P^{час.}$, $P^{пл.}$, $P^{пуз.}$ – давление в фазах неметаллическое включение, пленка и газовый пузырь; $\sigma^{час.-пл.}$; $\sigma^{пуз.-пл.}$ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз частица – пленка, пузырь – пленка, Дж/м²; l – толщина разделительной пленки, м.

По данным Ю.А. Минаева [7] возможность осуществления процесса выхода на межфазную границу оценивается приближенным критерием Z :

$$Z = 0,5\sigma^{2-m} + \Pi \cdot l \quad (3)$$

где σ^{2-m} – поверхностное натяжение на границе раздела фаз газ – металл, Дж/м².

Следовательно, равновесное существование плёнки возможно при конечном отрицательном значении расклинивающего давления, под действием которого жидкость из объёмной фазы затекает в плёнку. Возможность укрупнения включений, агрегации их с газовыми пузырями и перехода в шлаковую фазу определяется кинетикой утончения и прорыва слоёв металла. Высокая устойчивость при малых давлениях (больших размерах частиц) является причиной того, что из стали в ряде случаев весьма трудно удаляются крупные глобулы.

Другим важным условием быстрого удаления из стали твердых частиц (продуктов раскисления) являются встречи с жидкими включениями. При встрече твердой частицы с жидкой первая создаёт повышенное давление на разделительный слой металла и обеспечивает его быстрый прорыв, а вторая быстро растекается после образования периметра смачивания.

Вероятность прикрепления пузырька к частице $P_{прикрепления}$ состоит из трёх этапов: утончение плёнки, прорыв плёнки и её стабилизация. Установлено [9], что для осуществления последних 2-х этапов вероятность утончения плёнки сопоставима с возможностью прикрепления пузыря к неметаллическому включению. В свою очередь, вероятность прикрепления

включения возрастает при уменьшении размера пузырька и увеличении размера частиц, что описывается полуаналитическим уравнением Навье – Стокса. Это уравнение применимо для продольно симметричного и асимметричного потоков пузырей с числом Рейнольдса $Re < 400$ [11, 12]:

$$P_{\text{прикрепления}} = \frac{2u_n D}{9(u_c + u_n)Y} \left(\frac{d_c}{d_n} \right) \left[\sqrt{(X + C)^2 + 3Y^2} + 2(X + C) \right]^2 \quad (4)$$

где d_c и d_n – диаметры частицы и пузыря, м; u_n – скорость подъема пузыря, м/с; X, Y, C, D – безразмерные параметры, которые в свою очередь определяются из следующих соотношений: $X = \frac{3}{2} + \frac{9Re}{32 + 9,888 Re^{0,694}}$;

$$Y = \frac{3Re}{8 + 1,736 Re^{0,694}}; C = \frac{u_c}{u_n} \left(\frac{d_n}{d_c} \right)^2; D = \frac{\sqrt{(X + C)^2 + 3Y^2} - (X + C)}{3Y}.$$

Полуаналитическое решение уравнения (4) подтверждает, что вероятность столкновения увеличивается при уменьшении размера пузырька и увеличении размера частицы [13]. Между тем, по данным работы [14], пузырьки диаметром менее 1 мм не может отделиться от жидкого металла.

Эффективность удаления неметаллических включений ε может быть определена из следующего выражения:

$$\varepsilon = (1 - e^{-K\tau}) \cdot 100 \quad (5)$$

где τ – время пребывания жидкой стали в продуваемой области жидкой ванны проковша; K – константа, определяемая по формуле

$$K = \frac{3U_z P_{\text{прикрепления}} T_C}{2d_n T_0} \quad (6)$$

где U_z – скорость истечения газа в единице площади $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$; T_C и T_0 – соответственно температура стали и температура газа в газожидкостном потоке, К; d_n – диаметр пузырька, м.

Результаты расчётов по уравнению (5) для неметаллических частиц диаметром 40 мкм показывают (рис. 1), что высокая эффективность удаления неметаллических включений для пузырьков газа диаметром $d_n \leq 3$ мм практически не зависит от протяжённости продуваемой газом области и времени пребывания металла в проковше в диапазоне $\tau_T = 240-720$ с. В тоже время для пузырьков газа размером более 5 мм объем продуваемой области и время пребывания в ней жидкого металла оказывают существенное влияние на эффективность удаления включений. В работе [6] на модельных экспериментах также было показано, что для высокой эффективности удаления неметаллических включений ($> 80\%$) размером менее 60 мкм необходимо использовать пузырьки газа размером менее 3 мм.

В промышленных условиях продувка стали аргоном в мелкодисперсном режиме вызывает определённые технические затруднения, обусловленные, прежде всего, изготовлением продувочных блоков с соответствующей пористостью. Как правило, материал, из которого изготовлен продувочный блок, не смачивается жидкой сталью [15,16]. В исследованиях [17-19], проведённых на холодных и горячих моделях при подаче газа через не смачиваемый материал, показано, что выходящий пузырёк расширяется на поверхности огнеупорного материала. Это затрудняет возможность контроля размеров образующихся пузырьков, поскольку через отверстие выходит уже сформировавшийся пузырь, а также существует возможность соединения пузырьков при их отделении от поверхности продувочного блока. При этом пузырьковый режим продувки формируется при достаточно малом расходе продуваемого газа. Характерной особенностью такого режима продувки является образование отдельных пузырьков непосредственно перед отверстиями для подачи газа. С увеличением расхода вдуваемого газа сначала увеличивается частота образования пузырьков, сохраняющих прежний постоянный объём. В дальнейшем сохраняется постоянная частота образования пузырьков, но увеличивается их объём.

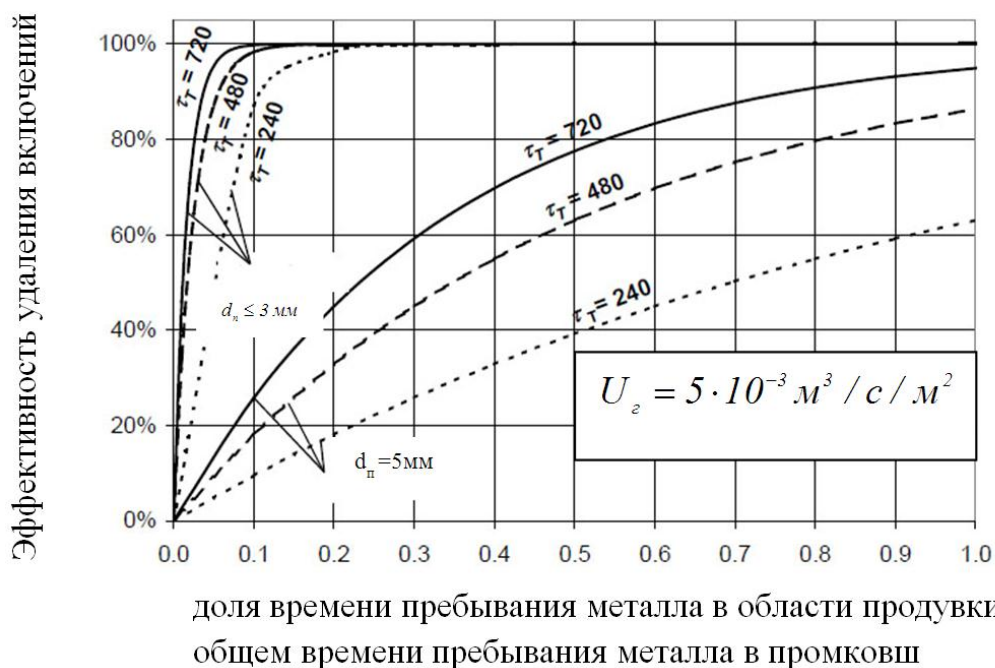


Рисунок 1 – Влияние размера пузырька, объёма продуваемой области и резидентного времени промковша на эффективность удаления неметаллических включений.

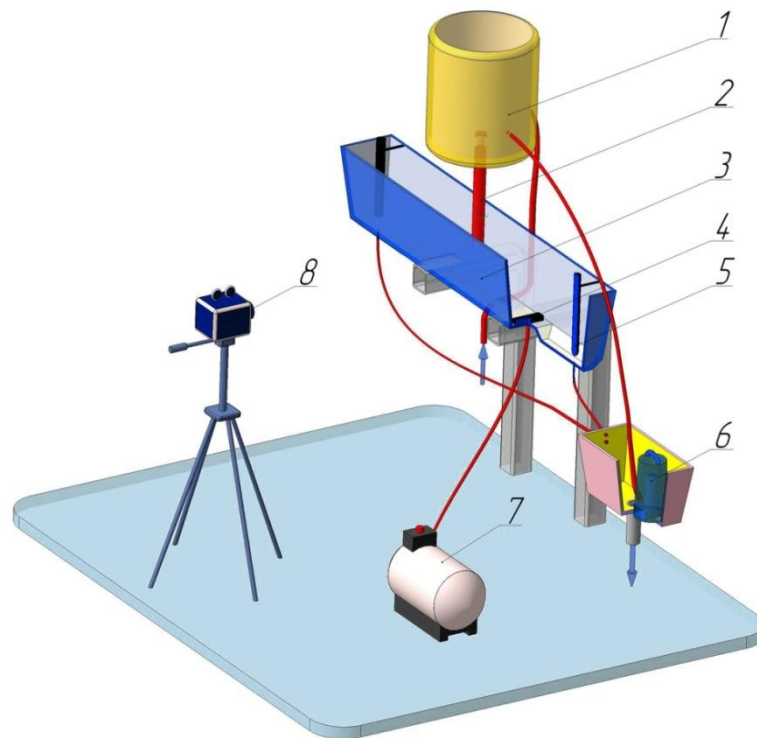
Для случая не смачивания отверстия металлом при выделении газа из отверстия с известным диаметром, размер отделяющегося пузырька можно оценить следующим образом [7]:

$$d_n = \left[\frac{3\sigma_p d_{n,0}}{\rho_p g} N'_C + \left(\frac{9\sigma^2 d_{n,0}^2}{\rho_p^2 g^2} N'_C + \frac{10Q^2 d_{n,0}}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

где $d_{n,0}$ – внешний диаметр газовыделительного канала; g – ускорение, характеризующее действие внешней силы, м/с; σ_p и ρ_p – соответственно поверхностное натяжение и плотность расплава; $N'_C = \frac{4\rho_p g v_c}{\pi d'_{n,0} P_{cm}}$ – констан-

та, зависящая от общего объема подводящей системы; Q – расход газа, л/мин; $d_{n,0}$ и $d'_{n,0}$ – внешний и внутренний диаметр газовыделительного канала, м; P_{cm} – статическое давление на его срезе, Па; v_c – скорость турбулентных пульсаций в потоке.

Для оценки эффективности удаления неметаллических включений в зависимости от режимов продувки ванны металла в промковше в настоящей работе разработана оригинальная физическая модель, имитирующая промковш современной двухручьевой слябовой МНЛЗ (рис.2).



1 – емкость, имитирующая сталеразливочный ковш; 2 – защитная труба; 3 – промковш; 4 – продувочный блок типа балка; 5 – стопор; 6 – емкость для сбора воды, вытекающей из промковша (имеет насос для возвращения жидкости в сталеразливочный ковш); 7 – компрессор; 8 – цифровая видеокамера.

Рисунок 2 – Схема модельного стенда промковша.

Модель выполнена из прозрачного материала в масштабе 1:4, а в качестве базовых критериев подобия были приняты критерий Фруда и критерий гомохронности. В качестве рабочей жидкости применяли воду, а для имитации покровного шлака на поверхность металла помещали слой силиконового или трансформаторного масла, имеющих высокое поверхностное натяжение. Для вдувания воздуха в жидкую ванну применяли пористую балку, установленную в днище поперёк промковша. При этом в ходе экспериментов оценивали долю ассимилированных шлаком частиц, которые вводили в промковш через защитную трубу (200 граммов специальной смеси). При этом вытекающую из промковша жидкость собирали в ёмкость и отстаивали в течение двух-трёх часов для того, чтобы вещество, имитирующее неметаллические включения, полностью всплыло на поверхность. После этого имитатор собирали и взвешивали (m). Каждый эксперимент повторяли три раза. Конечный количественный результат эксперимента выражали средним арифметическим.

Эффективность удаления неметаллических включений определяли по формуле:

$$E = \frac{(M - m)}{M} \cdot 100\% \quad (8)$$

где M – масса вводимой в промковш тестовой смеси, г; m – масса тестового вещества, отобранная на выходе из промковша, г.

Общая эффективность удаления неметаллических включений на физической модели для данной конструкции промковша составила 85-94% в зависимости от расхода вдуваемого газа и расположения продувочной балки. Установлено, что максимальный эффект всплытия и удаления включений обеспечивается в том случае, когда расход вдуваемого газа оказывается таким, при котором поверхность воды в промковше не оголяется от расположенного на ней масла и составляет 1,6-1,9 л/мин. При этом размеры пузырьков газа в жидкой ванне составляли 1,3-1,8 мм.

Дальнейшие исследования выполнялись в условиях конвертерного цеха ПАО «Алчевский металлургический комбинат» на 60-тонном промежуточном ковше двухручьевого слябовой МНЛЗ (рис.3).

Выбор схемы расположения перегородок и продувочных балок был осуществлен в соответствии с результатами физического моделирования. Монтаж продувочной фурмы в днище промежуточного ковша не вызывал дополнительных трудностей и был соизмерим по сложности с операциями его футеровки. При этом основное внимание было уделено выбору пористого материала огнеупорного блока для продувки стали аргоном.

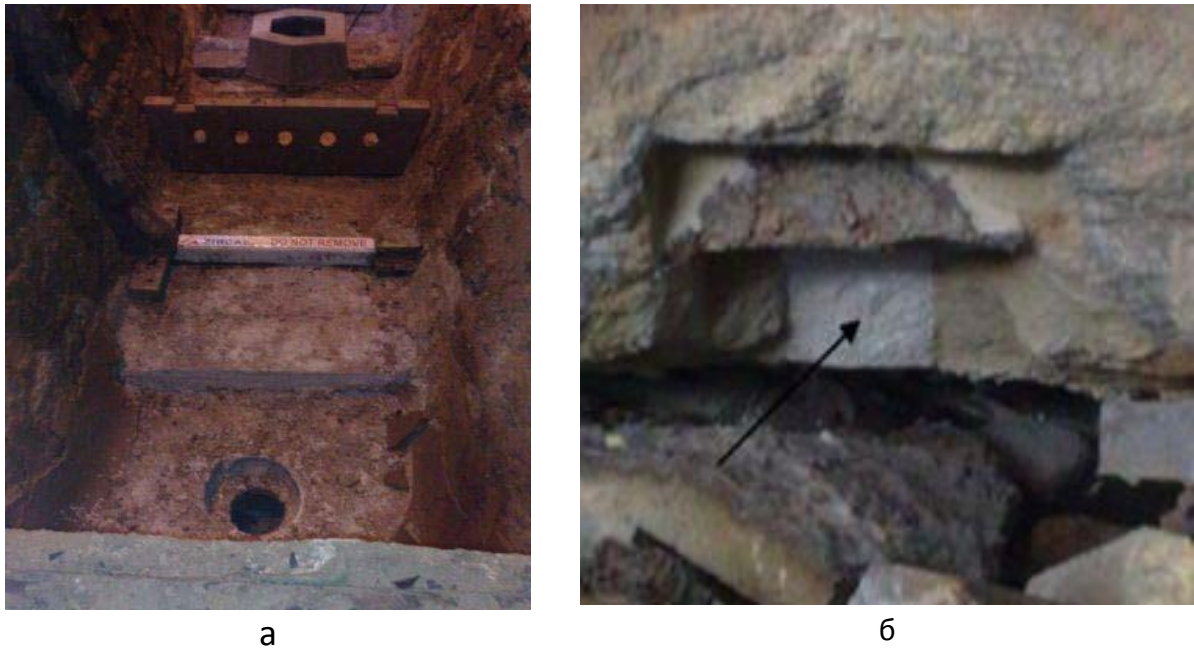


Рисунок 3 – Расположение продувочной фурмы в промковше (а) и – продувочная фурма после разливки 10 плавков (б) (светлый участок).

Для обеспечения режимов продувки газа в мелкодисперсном режиме использовался керамический материал с мелкими порами, химический состав которого был следующим (массовая доля, %): MgO – 74,85; Al_2O_3 – 4,626; SiO_2 – 4,13; CaO – 16,198; MnO – 0,123; NbO – 0,015; MoO_2 – 0,058). Макроструктура продувочного блока представлена на рис.4.

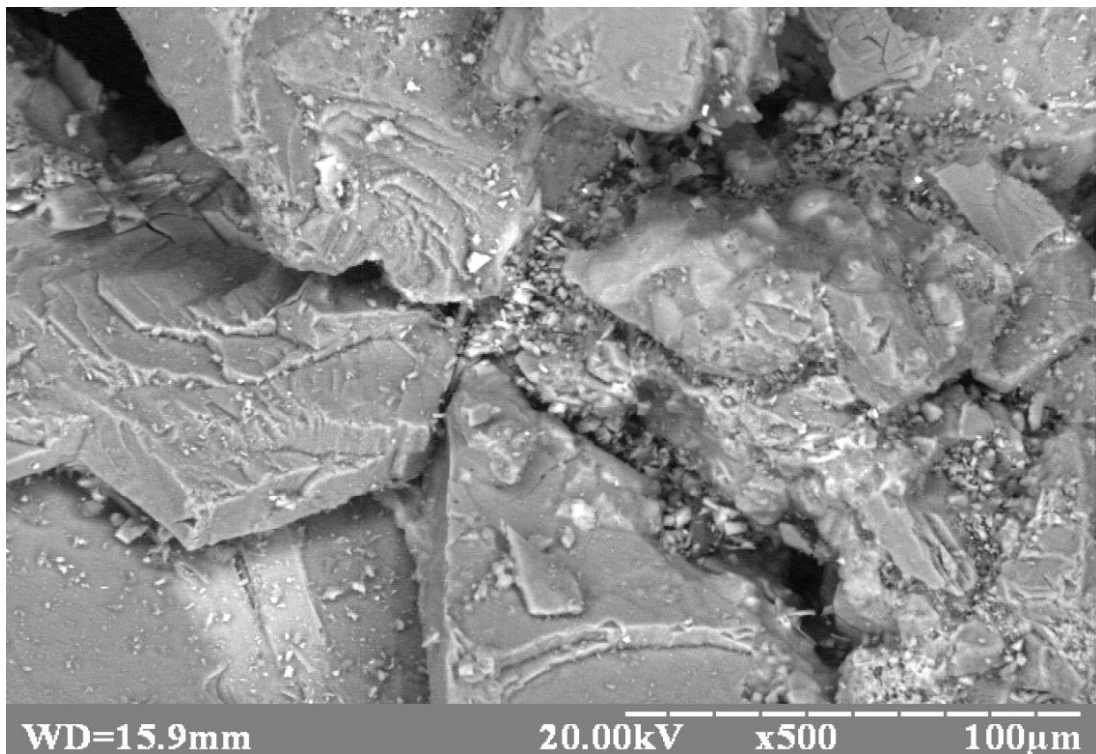


Рисунок 4 – Макроструктура продувочного блока (увеличение x500).

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.

Сравнительный анализ эффективности трансформации характера перемешивания стали в проковше при наличии продувочных балок на количество и состав неметаллических включений в непрерывнолитых слябах и готовом прокате исследовали путем разливки 8 опытно-промышленных серий (6-10 плавов в каждой) на МНЛЗ №1. В ходе исследований разлиты серии для низкоуглеродистых, сверхнизкоуглеродистых и трубных марок стали.

Для оценки состояния поверхности из опытных и сравнительных слябов отбирались образцы (по углам и серединам граней). Оценку выполняли после удаления окалины путем травления в 50% растворе соляной кислоты при 70°C по методике института ЦНИИЧермет. Обобщая результаты оценки качества поверхности опытных и сравнительных образцов, следует отметить наличие явно выраженных «следов» осцилляции с шагом, соответствующим режиму качания кристаллизатора (≈ 5 мм) и глубиной канавки до 0,9-1,0 мм, что соответствует 0 баллу согласно вышеуказанной методике для обоих случаев. Между тем видимых существенных различий между образцами из опытных и сравнительных слитков отмечено не было.

Оценку загрязненности стали осуществляли на полированных шлифах с использованием микроскопа «Axiovert-200» в светлом, темном и DIC полях при увеличении $\times 100$ по ГОСТ1778-70 и ASTM E45-97 (метод наилучших полей). Образцы для исследований отбирались из готовой продукции (листовой стали, прокатанной из сляба до толщины 25 мм). Установлено, что по большинству показателей полученные для сравнительного и опытного металла результаты достаточно близки между собой. Наибольшие отличия наблюдаются в показателе «точечные включения». Как показали наблюдения, они в преобладающем большинстве имеют округлую или овальную форму. Размеры таких неметаллических включений, как правило, не превышали 50-55 мкм. 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 10-25% ниже.

Количество одиночных крупных неметаллических включений возрастает при разливке сталей со сверхнизким содержанием углерода. При этом разница в количестве включений в опытном и сравнительном металле достигала 20-25% при вдувании через продувочный блок аргона с расходом 10-12 л/мин. В качестве примера на рис. 5 приведено частотное распределение одиночных неметаллических включений для плавов 09K11275 и 09K11276.

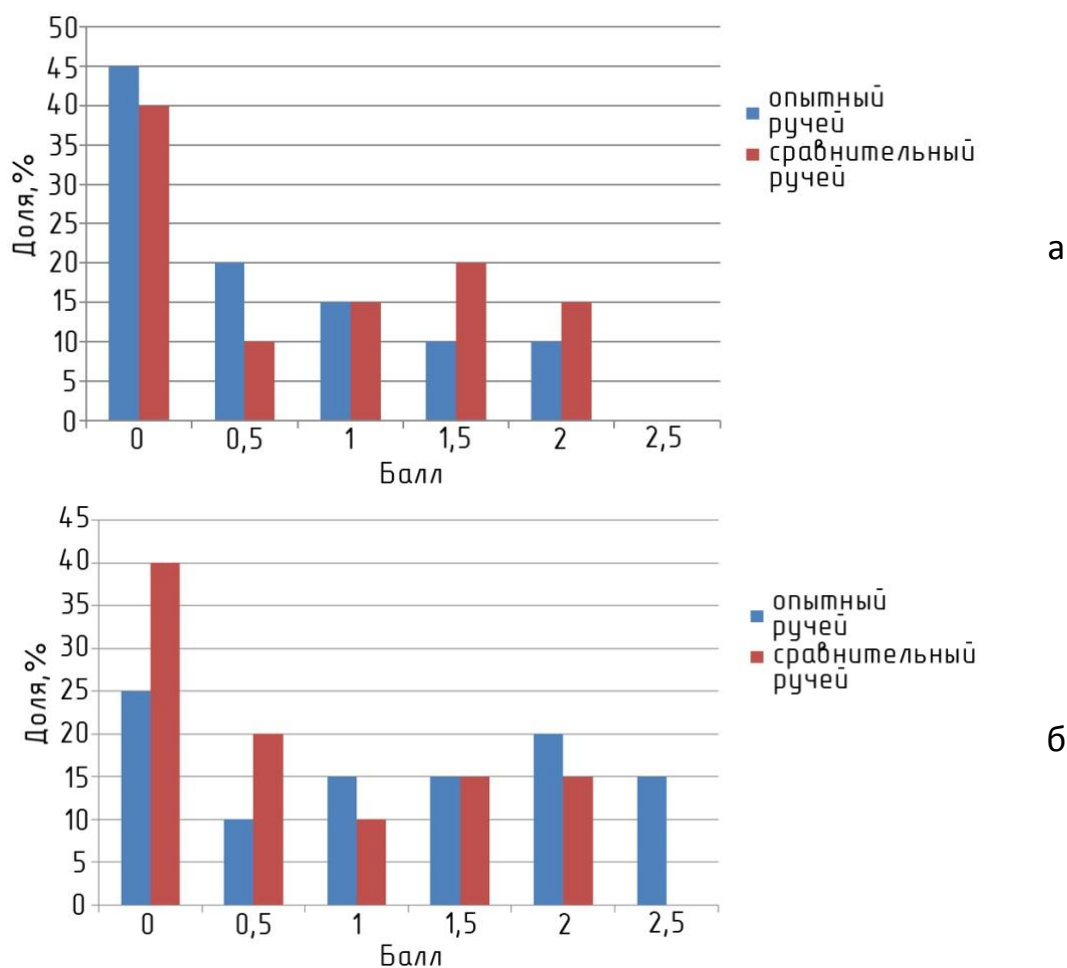


Рисунок 5 – Частотное распределение одиночных НВ в сравнительном и опытном слябах при продувке с расходом 10 л/мин (а) и 15 л/мин (б).

При более высоких расходах аргона (например, 15-16 л/мин) наблюдается интенсивное бурление металла и шлака в зоне выхода пузырьков аргона, что обуславливает дополнительное загрязнение стали в промковше (рис.5 б).

Согласно полученным данным при интенсивном бурлении в опытном металле наблюдается некоторое увеличение количества крупных неметаллических включений (бал 2 и бал 2,5). Этот факт следует рассматривать как свидетельство того, что вдувание аргона в промковш должно быть ограничено определённым расходом, который не вызывает бурления.

Анализируя причины наличия или обнаружения крупных неметаллических включений в отобранных пробах следует, прежде всего, принять во внимание тот факт, что они имеют преимущественно округлую форму. Эти включения представляют собой оксисульфидные конгломераты, включающие такие элементы как кремний, алюминий, кальций, сера, кислород и пр. Это можно рассматривать как свидетельство того, что неметаллические включения являются частицами захваченного в перемешивание шлака или конгломератами слипшихся между собой частичек оксидов (продуктов

раскисления и вторичного окисления) и сульфидов [20-22]. Пример такого включения приведён на рис.6 (увеличение x2000).

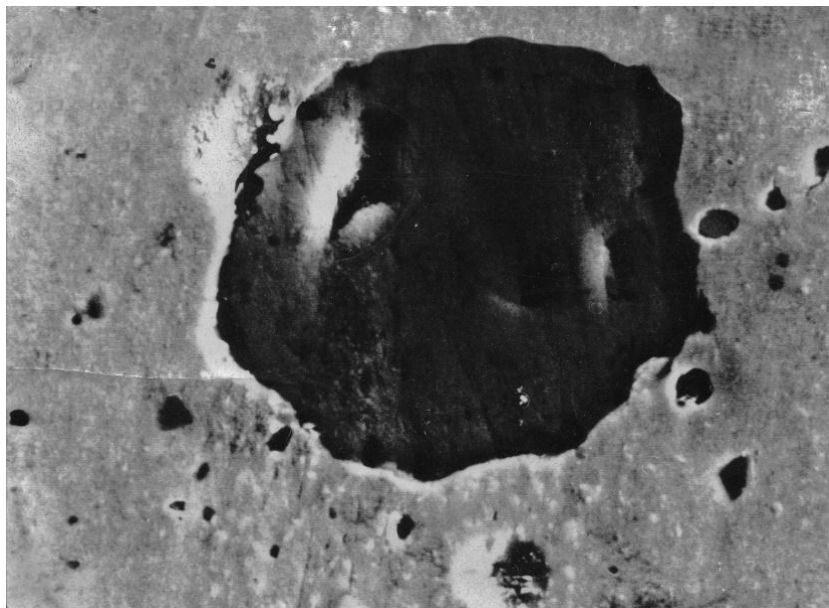


Рисунок 6 – Вид единичного крупного неметаллического включения, обнаруженного в образце из опытного сляба.

Заключение

В результате выполненных теоретических, лабораторных и промышленных исследований показано, что продувка жидкой ванны металла в промковше аргоном обеспечивает рафинирующий эффект в части удаления крупных неметаллических включений. Наибольший эффект может быть достигнут при использовании пористых продувочных блоков, обеспечивающих продувку в пузырьковом режиме с диаметром пузырьков менее 3 мм. При этом продувочные блоки необходимо располагать в днище промковша в поперечном положении относительно движения циркуляционных потоков

В промышленных условиях установлено, что при продувке стали аргоном в промковше количество крупных одиночных неметаллических включений (1,5 балла и выше) на 10-25% ниже, чем в сравнительных слябах (без продувки). Наилучшие результаты были достигнуты при расходе вдуваемого газа 10-12 л/мин на один продувочный блок. При более высоких расходах аргона (например, 15-16 л/мин) наблюдается интенсивное бурление металла и шлака в зоне выхода пузырьков аргона, что обуславливает дополнительное загрязнение стали в промковше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Окенко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. - М.: Металлургия. 1980. – 176 с.

2. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. - Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. - 536 с.
3. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах. – М.: Металлургия, 1994. - 440 с.
4. Tassot P., Reichert N. Ways of Improving Steel Quality in the Tundish // *Revure de Métallurgie*. – 107. – 2010. - pp.175-185.
5. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. - Донецк: Цифровая типография, 2011. – 482 с.
6. Rogler J. Modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling. – Canada: Eng. Ryerson University, 2004. – 54 p.
7. Минаев Ю.А., Яковлев В.В. Физико–химия в металлургии. – М.: МИСИС, 2001. – 320 с.
8. Дерягин Б.В., Н.В. Чураев, Муляр В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1986. – 398 с.
9. Nguyen A.V., Ralston H.J., Schulze H.J. On modeling of bubble – particle attachment probability in flotation // *International Journal of Mineral Processing*. 1998. 53 (4). – P.225–249.
10. Nguyen A.V. Hydrodynamics of liquid flows around air bubbles in flotation // *International Journal of Mineral Processing*. 1999. 56 (1-4). – P.165 – 205.
11. Dobby G.S., Finch G.H. Particle size dependence in flotation derived from a fundamental model of the capture process // *International Journal of Mineral Processing*. 1987. № 21. – P.241 – 260.
12. Nguyen A. V., Shulze H.J. Probability of collision between particles and bubbles in flotation: The theoretical inertialess model involving a swarm of bubbles in pulp phase // *International Journal of Mineral Processing*. 1994. 40 (3-4). – p. 155 – 169.
13. Schulze H.J. Physico-Chemical elementary process in flotation, analysis from point of view of colloid science. – Amsterdam: Elsevier, 1984. – 348 p.
14. Davies R.M., Taylor G. The Mechanics of Large Bubbles Rising through Extended Liquids and through Liquids in Tubes // *Proceeding the Royal of Society A*. 1950. Vol. 200. № 1002. February. – P.375 – 390.
15. Barthel H., Hammerer W., Suppaner M. Segment Purging Plugs for Steel Treatment in Ladles // *Taikabutsu – Refractories*. 1998. 50. No3. – P.128-136.
16. Tassot P. Innovative concepts for steel ladle porous plugs // *Millenium Steel*. 2006. – P.111-115.
17. Szekely J., Evans J.W., Sohn H.Y. Gas-solid reactions. – Kluwer. – 1979. – 409 с.
18. Hogbin Y., Shibata H., Suzuki M. Characteristics of agglomeration of various inclusion particles on molten steel surface. – *ISIJ International*. – Vol. 37. - № 10. – 1997. – p. 946 – 955.
19. Yogeshwar Sahai, Toshihiko Emi. Tundish Technology for clean steel production / The Ohio State University, USA; Institute of research of Iron and Steel, Jangsu/ Sha – Steel, China. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2008. – 329 p.
20. Han Z. Mechanism of Iron Entrainment into Slag due to Rising Gas Bubbles / Z.Han, L.Holappa // *ISIJ International*. – 2003. – Vol.43. – No.3. – P.293-297.
21. Тюркдоган Е.Т. Раскисление и десульфурация в ковше и неметаллические включения в стали – теоретические основы и практические наблюдения // *Чистая сталь*. Сборник научн. тр. – М.: Металлургия, 1987. - 368с.

22. Kundu A.L. Gupt K.M., P.Krishna Rao. Morphology of Nonmetallic Inclusions Using Silicon, Aluminum and Calcium-Silicon Alloy in Steel Melt // Metallurgical Transaction B. 1989. Vol. 20B. October. — P.581-594.

Надійшла до редакції 04.10.2011

Рецензент д.т.н., проф. М.О. Маняк

© Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В., Писмарев К.Е.

УДК 621.744.072.2.001.891.573

Е.Ю. Кушнерова, В.Н. Бредихин, Н.А. Маняк, А.И. Шевелев

К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ В ЗАКРЫТЫЙ ГРАФИТОВЫЙ ФОРМООБРАЗОВАТЕЛЬ

Выполнен анализ установки горизонтального непрерывного литья как объекта управления. Определена структурная схема управления и статистические алгоритмы управления процессом литья в горизонтальный кристаллизатор. Разработанная система управления стабилизирует технологические параметры, увеличивает производительность установки и выход годного, исключает пористость и дефекты поверхности заготовки.

Ключевые слова: непрерывное литье, анализ, схема, управление, параметры, производительность, выход годного.

Введение

Одним из возможных путей повышения эффективности производства, улучшения качества продукции и условий труда является широкое использование методов непрерывного литья. Наиболее прогрессивными, с экономической и технической точек зрения, являются установки горизонтального непрерывного литья в графитовый формообразователь с медной водоохлаждаемой рубашкой. Несмотря на то, что установки горизонтального непрерывного литья (УГНЛ) имеют высокие технико-экономические показатели, их работа может быть значительно улучшена за счет стабилизации технологических параметров, нахождения оптимальных режимов ведения процесса, автоматизации управления работой установки.

Постановка задачи

Анализ особенностей тепловых потоков, структуры и механических свойств заготовки, отливаемой на УГНЛ, позволяет представить следующую модель её формирования [1].

При установившемся режиме вытягивания заготовки в жидком ядре, жидко-твёрдой и твёрдо-жидкой зонах графитового формообразователя с