

УДК 669.184.244

*А.Н. Смирнов¹, В.Г. Ефимова², А.В. Кравченко¹*¹Донецкий национальный технический университет²Киевский политехнический институт

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВСПЛЫТИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПРОДУВКЕ АРГОНОМ ЖИДКОЙ ВАННЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНЛЗ. СООБЩЕНИЕ 1

Аннотация. Выполнены анализ и физическое моделирование основных технологических факторов, влияющих на количество удаляемых включений при продувке жидкой стали инертным газом в промежуточном ковше. В результате проведенных исследований установлены оптимальные параметры продувки стали при использовании кольцевой продувочной фурмы: расход газа и диаметр пузырьков аргона в момент их отрыва от поры, при которых достигается наилучший рафинирующий эффект.

Ключевые слова: неметаллические включения, промежуточный ковш, продувка аргоном, пузырек, фурма, моделирование.

STUDY CONDITIONS OF NON-METALLIC INCLUSIONS FLOTATION DURING ARGON INJECTION OF LIQUID BATH TUNDISH CCM. REPORT 1

Abstract. Analysis and physical modeling of the main technological factors which affecting on the amount non-metallic inclusions under inert gas injection into liquid steel in the tundish. As a result of the research, the optimal parameters were blowing when using a ring purge lance: consumption gas and argon bubble diameter at the moment of their separation from the pores, that achieves the best refining effect.

Keywords: non-metallic inclusions, tundish, argon blowing, bubble, purging plug, modeling.

Мировые тенденции увеличения спроса на марки стали ответственного назначения обуславливают для производителей металлопродукции необходимость увеличения требований к чистоте стали по содержанию неметаллических включений. Загрязнение стали неметаллическими включениями происходит на всех этапах производства, доводки и разливки и обуславливается, прежде всего, процессами раскисления и вторичного окисления стали, перемешиванием металла и шлака в ходе технологических переливов, а также разрушением огнеупоров сталеразливочного и промежуточного ковша.

Одним из наиболее эффективных и широко используемых в металлургической практике методов удаления неметаллических включений из жидкой стали является ее продувка аргоном в ковше. Фактически продувка стали в ковше аргоном является обязательной операцией при производстве качественных сталей. Между тем последующий перелив металла из сталеразливочного в промежуточный ковш обычно сопровождается дополнительным захватом неметаллических включений из шлака, а также его вторичным окислением. В связи с этим в металлургической практике все большее внимание уделяется процессам продувки стали аргоном непосредственно в промежуточном ковше [1, 2]. По данным различных исследователей [3, 4], продувка инертным газом в промежуточном ковше позволяет сократить количество неметаллических включений размером более 50 мкм на 70 %, а включений размером 25 – 50 мкм на

40 %. Между тем эффект рафинирования достигается преимущественно при продувке жидкой ванны в пузырьковом режиме. При этом увеличение расхода более определенных (критических) значений приводит к снижению эффекта рафинирования вследствие турбулизации перемешивания металла и шлака в области выхода пузырьков аргона.

Развитие этой технологии в последнее время фокусировалось на достижении двух целей: обеспечение хорошего перемешивания, способствующего увеличению площади поверхности раздела фаз «газ–жидкость–включения» и транспортировки включений к шлаковому покрову. Принимая во внимание результаты ряда работ последних лет, посвященных вопросу удаления включений за счет флотации газовыми пузырями на холодных и горячих моделях [3 – 6] можно заключить, что на настоящий момент отсутствует фундаментальная трактовка механизмов удаления включений из жидкой стали за счет флотации пузырями аргона в промежуточном ковше.

Целью данной работы является анализ и оценка на физической модели основных технологических факторов, влияющих на количество удаляемых включений за счет механизма их прикрепления к газовым пузырям и вероятности адгезии, зависящих от размера пузыря и расхода газа.

Механизм флотации неметаллических включений пузырями аргона из жидкой стали можно обобщенно свести к следующим процессам: подход пузыря

к включению; формирование тонкой металлической пленки между включением и пузырьем; скольжение включения по поверхности пузыря; прорыв пленки и образование линии контакта трех фаз (пузырь–включение–пленка); флотация агрегата включение–пузырь.

Главенствующую роль в процессе флотации включений определяют такие временные параметры, как время столкновения ($\tau_{ст}$), время скольжения ($\tau_{ск}$) и время индукции ($\tau_{и}$). В случае, если: $\tau_{ст} \geq \tau_{и}$ – включение прикрепляется к поверхности пузыря за счет столкновения; $\tau_{ст} < \tau_{и}$ – включение отскакивает от поверхности пузыря; $\tau_{ск} \geq \tau_{и}$ – включение прикрепляется к пузырю за счет скольжения; $\tau_{ск} < \tau_{и}$ – включения скользят по поверхности пузыря и не закрепляются.

По данным работы [7] время столкновения можно определить как

$$\tau_{ст} = \left(\frac{\pi^2 \rho_B}{12 \sigma_{ст}} \right)^{1/2} d_B^{3/2}, \quad (1)$$

где ρ_B – плотность включения ($\rho_{Al_2O_3} = 3900$, $\rho_{SiO_2} = 2800$ кг·м⁻³); $\sigma_{ст}$ – поверхностное натяжение расплава железа, 1,6 Н·м⁻¹; d_B – диаметр включения, м.

Время скольжения представляет собой [8, 9]:

$$\tau_{ск} = \frac{(d_B + d_n)}{2U_n(1-B^2)A} \ln \left\{ \frac{\tan \frac{\theta_c}{2} \left(\cos ec \theta_c + B \cot \theta_c \right)^B}{\tan \frac{\theta_0}{2} \left(\cos ec \theta_0 + B \cot \theta_0 \right)^B} \right\}, \quad (2)$$

где d_n – размер пузыря, м; U_n – равновесная скорость всплытия пузыря (0,33 – 0,43 м·с⁻¹); B – константа, численно равная 15 [9]; A – константа Гамакера, учитывающая дисперсионное взаимодействие между молекулами макроскопических фаз, равная $1,7 \cdot 10^{-20}$ Дж для силикатных включений и $2,3 \cdot 10^{-20}$ Дж для включений глинозема [9]; θ_0 – угол, при котором частица начинает скользить вдоль поверхности пузыря, для металлургических систем составляет 200; θ_c – угол, за пределами которого не происходит столкновения, равен 60°.

Время индукции определяется выражением [8]

$$\tau_{и} = \frac{(d_B + d_n)}{2U_n(1-B^2)A} \ln \left\{ \frac{\frac{1}{\sqrt{P_{пр}}} + \sqrt{\frac{1}{P_{пр} + D^2 - 1}}}{\left(\frac{1}{\sqrt{P_{пр}}} + B \sqrt{\frac{1}{P_{пр} + D^2 - 1}} \right)^B} \times \frac{(1+BD)^B}{1+D}} \right\}, \quad (3)$$

где $P_{пр}$ – вероятность прикрепления, определяемая из выражения

$$P_{пр} = \frac{2U_n D}{9(U_B + U_n)Y} \left(\frac{d_B}{d_n} \right) \times \left[\sqrt{(X+C)^2 + 3Y^2} + 2(X+C) \right]^2,$$

где U_B – скорость всплытия включения, м·с⁻¹; X, Y, C, D – безразмерные параметры, находящиеся из следующих соотношений:

$$X = \frac{3}{2} + \frac{9 Re_n}{32 + 9,888 Re_n^{0,694}}; Y = \frac{3 Re_n}{8 + 1,736 Re_n^{0,694}};$$

$$C = \frac{U_B}{U_n} \left(\frac{d_n}{d_B} \right)^2; D = \frac{\sqrt{(X+C)^2 + 3Y^2} - (X+C)}{3Y},$$

где Re_n – число Рейнольдса для пузыря.

Для определения оптимальных условий продувки авторами были проведены расчеты основных временных параметров уравнений (1) – (3) с целью определения эффективных условий удаления включений.

Расчеты показали, что для пузырей $d_n = 1,0 - 3,25$ мм встреча пузыря с включением любого размера заканчивается прикреплением, которое происходит за счет скольжения, так как $\tau_{ск} > \tau_{и}$. Так, для включений размером от 1 до 100 мкм, значения $\tau_{ск}$ лежат в пределах от $2 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ с, а $\tau_{и}$ – $1 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ с. При этом, если $d_n = 5$ мм, то к нему прикрепляются включения размером до 65 мкм, а если $d_n = 10$ мм – до 38 мкм.

По данным работы [10] количество столкновений неметаллических включений с пузырем определяется как

$$N_1 = V_{ст} \rho_B P_{пр} = \frac{\pi}{4} d_B^2 H \rho_{\tau} P_{пр},$$

где $V_{ст}$ – объем жидкой стали, перемещаемый пузырем в процессе флотации на свободной поверхности, м³; H – высота металлической ванны, м; ρ_{τ} – изменение плотности включения во времени, кг·м⁻³.

Количество пузырей, поставляемых в жидкую сталь в единицу времени и объема [10]:

$$N_2 = \frac{6Q_{г}}{\pi d_n^3} \frac{T_0}{T_{\infty}} \frac{1}{V_{ст}},$$

где $Q_{г}$ – расход газа, м³·с⁻¹; T_0 и T_{∞} – температура газа на входе и в промежуточном ковше соответственно, °С.

Общее количество эффективных прикреплений в секунду составит

$$N_{об} = N_1 N_2 = \frac{3}{2} \frac{H}{V_{ст}} \frac{T_0}{T_{\infty}} Q_{г} \frac{3}{d_n} \rho_B = K_3 \rho_B. \quad (4)$$

Тогда процент удаления неметаллических включений можно представить как

$$\delta = 100[1 - \exp(-K_3\tau)]. \quad (5)$$

Данные расчетов, проведенные с использованием уравнений (4) и (5) (рис. 1), 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 применение пузырей меньших размеров сопровождается определенными технологическими недостатками, которые следует учитывать при реализации метода продувки в промышленных условиях. К ним относится большое время всплытия пузыря, а также возможность захвата пузырями конвективными потоками затягивания их вглубь жидкой ванны и в зону выпускного отверстия стакана-дозатора. Следовательно, при выборе оптимального размера пузырей необходимо учитывать не только высокую эффективность удаления включений, а также минимальные значения времени рафинирования (времени, необходимого пузырям для всплытия через 1 м столба стали) при высокой скорости всплытия. Так, по данным работы [11] горизонтальная составляющая скорости жидкой стали в зоне выпускного отверстия стакана-дозатора составляет 0,1 – 0,25 м·с⁻¹, а скорость всплытия пузыря диаметром 1,0 мм и 3,25 мм – 0,09 м·с⁻¹ и 0,3 м·с⁻¹, соответственно.

Исходя из выполненных расчетов можно сделать заключение, что для процесса флотации неметаллических включений в ванне промежуточного ковша можно рекомендовать размер всплывающих пузырей аргона ($d_{пн} \approx 3,0 - 3,25$ мм) и расход газа ($Q_r = 10 - 12$ л·мин⁻¹).

Для обеспечения такого режима продувки целесообразно выполнить оценку рационального диаметра отверстий, через которые вдувается аргон. Так, начальный диаметр зарождающегося пузыря $d_{(н)п}$, образующегося в продувочном отверстии при расходе газа $Q_r \geq 2 \cdot 10^{-5}$ м³·с⁻¹, можно найти из соотношения [10]

$$d_{(н)п} = \sqrt[3]{\frac{6\sigma_{ст}D_{п}Q_r}{g\rho_{ст}}}, \quad (6)$$

где $D_{п}$ – диаметр продувочного отверстия, м; g – ускорение силы тяжести, м·с⁻²; $\rho_{ст}$ – плотность расплава стали, кг·м⁻³.

Далее образовавшийся зародыш пузыря начинает расти. Его размер можно рассчитать исходя из того, что к моменту его отрыва от поры, подъемная сила пузыря равна удерживающей силе поверхностного натяжения расплава по периметру зародыша [12]. При этом величиной плотности газа можно пренебречь. Соответственно размер пузыря в момент отрыва от продувочного блока $d_{(от)п}$ будет определяться из выражения

$$d_{(от)п} = \sqrt[3]{\frac{3\sigma_{ст}d_{(н)п}}{2g\rho_{ст}}}. \quad (7)$$

Далее, при всплытии в расплаве стали, размер пузыря постепенно увеличивается. Теплопередача внутри пузыря осуществляется за счет конвекции окружающей жидкости. Тогда с учетом уравнения состояния идеального газа можно записать [13]

$$\rho_r C_{p,r} \frac{dT}{d\tau} = \frac{3}{d_{(от)п}} h_{п} (T_0 - T_{\infty}),$$

где $C_{p,r}$ – изобарная теплоемкость газа, Дж·моль⁻¹·К⁻¹; τ – время расширения пузыря, с; $h_{п}$ – коэффициент теплопроводности газа, Вт·м⁻²·К⁻¹. Решение этого уравнения приводит к следующему выражению [13]:

$$\frac{d_{(от)п}}{d_{п}} = \left(\frac{T_0 + 273}{T_{\infty} + 273} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Расчеты, проведенные с использованием уравнений (6) – (8) при расходах газа 10, 11, 12 л·мин⁻¹ показали, что начальный диаметр зарождающегося пузыря на поре (диаметр продувочного отверстия 0,15 мм) состав-

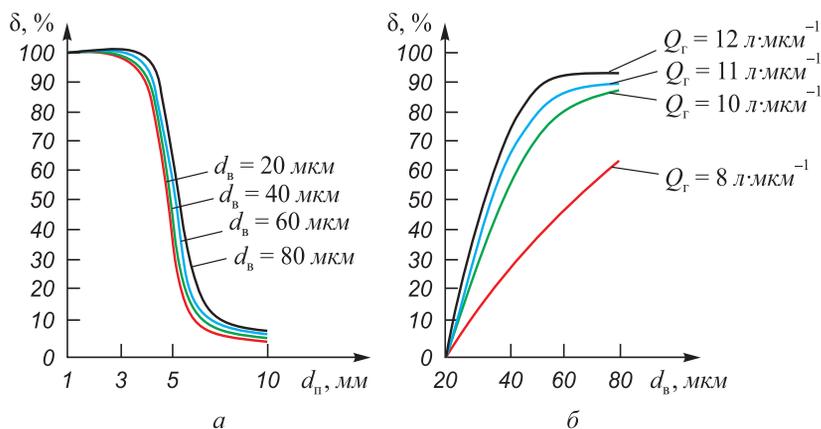


Рис. 1. Эффективность удаления неметаллических включений от размера пузыря (а) и расхода газа (б)

ляет примерно 0,16 мм, в момент отрыва – 1,75 мм, а при всплытии в расплаве стали в промежуточном ковше достигает размеров 3,25 мм.

Дальнейшие исследования эффективности удаления неметаллических включений из промежуточного ковша выполнялись на физической модели. Масштаб модели составлял 1:4, а в качестве базовых критериев подобия были приняты критерий Фруда и гомохронности. Схема модельного стенда приведена на рис. 2. В качестве рабочей жидкости использовалась вода, которая имеет кинематическую вязкость, близкую по величине к жидкой стали. Имитация покровного шлака на поверхности металла в промежуточном ковше осуществлялась с помощью силиконового или трансформаторного масла, которые имеют высокое значение величины поверхностного натяжения. 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 промежуточными ковшами, специальной механической смеси (взвеси) гидрофобных частиц, имеющих плотность несколько меньше, чем вода. Для этих целей разработана специальная многокомпонентная смесь, включающая в себя несколько типов масла и эмульсий и очень мелких твердых частиц.

При этом в ходе экспериментов выполнялась оценка траектории движения частиц «шлака» в жид-

кой ванне промежуточного ковша, а также примерная доля частиц, всплывших на поверхность и вытекших с водой. Движение конвективных потоков жидкости в промежуточном ковше, вызванных ее перемещением от места внедрения струи, падающей из сталеразливочного ковша, до истечения жидкости из стаканов-дозаторов фиксировалось с помощью цифровой видеокамеры.

Общий вид промежуточного ковша лабораторной установки, имитирующей промежуточный ковш слывовой МНЛЗ с основными функциональными элементами, которые оказывают управляющее воздействие на развитие конвективных потоков в жидкой ванне, приведен на рис. 3. Для вдувания воздуха в жидкую ванну использовались специальные продувочные элементы (диаметр отверстий 0,15 мм), обеспечивающие мелкодисперсную структуру газовых пузырьков, которые устанавливались в днище промежуточного ковша.

На первом этапе исследований на физической модели было выполнено сравнение эффективности различных конструктивных приемов на рафинирование металла в промежуточном ковше. Для этого в защитную трубу вводилось 200 г субстанции для загрязнения стали неметаллическими включениями. Затем жидкость, которая вытекала из промежуточного ковша, собиралась в специальной емкости, отстаивалась в течение нескольких часов и вещество, имитирующее неметаллические включения, взвешивалось. Каждый эксперимент повторялся по три раза, а результаты находились как среднее арифметическое. Эффективность отделения включений определялась по следующей формуле

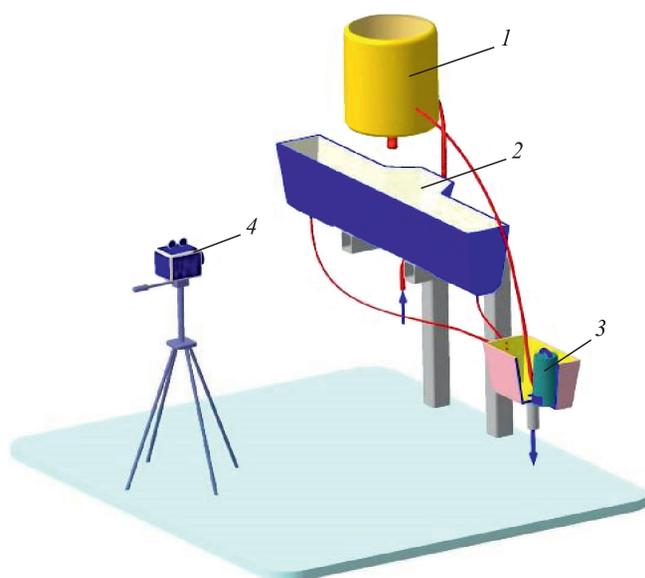


Рис. 2. Схема лабораторного стенда для исследования процессов перемешивания, которые происходят в промежуточном ковше:

- 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш;
3 – емкость для сбора воды, вытекающей из промежуточного ковша с насосом для возвращения ее в сталеразливочный ковш;
4 – цифровая видеокамера

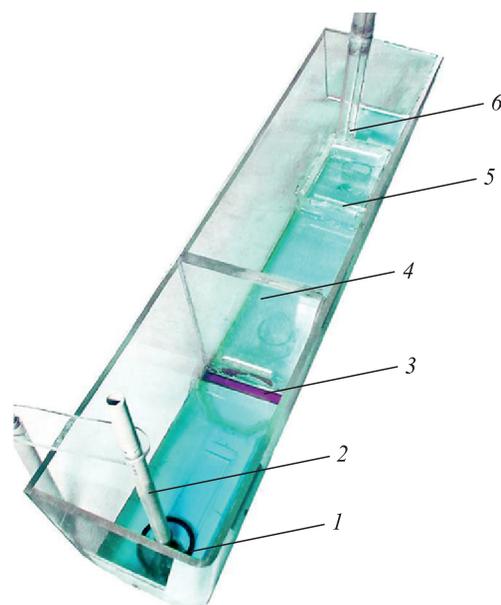


Рис. 3. Общий вид лабораторного стенда промежуточного ковша (вид сверху):

- 1 – кольцевая фурма для вдувания аргона; 2 – стопор;
3 – продувочная балка; 4 – фильтрационная перегородка;
5 – металлоприемник; 6 – защитная труба

$$\Xi = \frac{M - m}{M} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

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 акцентировать внимание на том факте, что применение кольцевого продувочного блока по совокупности достигаемых эффектов может рассматриваться как достаточно эффективный технологический прием для обеспечения флотации неметаллических включений.

При этом важнейшее значение в достижении максимального рафинирующего эффекта имеет величина расхода вдуваемого газа и диаметр пузырьков. Установлено, что при увеличении расхода газа выше определенного предела (примерно $5 - 6 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$) происходит интенсивное перемешивание частиц масла с водой (рис. 4). При этом более мелкие частицы масла вовлекаются конвективными потоками в жидкую ванну промежуточного ковша. Это следует рассматривать как лимитирующий фактор, ограничивающий интенсивность продувки. Для повышения эффективности работы кольцевой фурмы необходимо контролировать характер выхода пузырьков газа на поверхность жидкости в промежуточном ковше, так как этот выход может приводить к перемешиванию металла и шлака.

Выводы. Выполнен анализ условий захвата неметаллических включений восходящими пузырьками инертного газа в жидкой ванне стали в промежуточном ковше. Показано, что рафинирующий эффект получает развитие при пузырьковом режиме продувки с расходом $10 - 12 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$ и диаметре пузырьков в момент их отрыва от поры на уровне $1,75 \text{ мм}$.

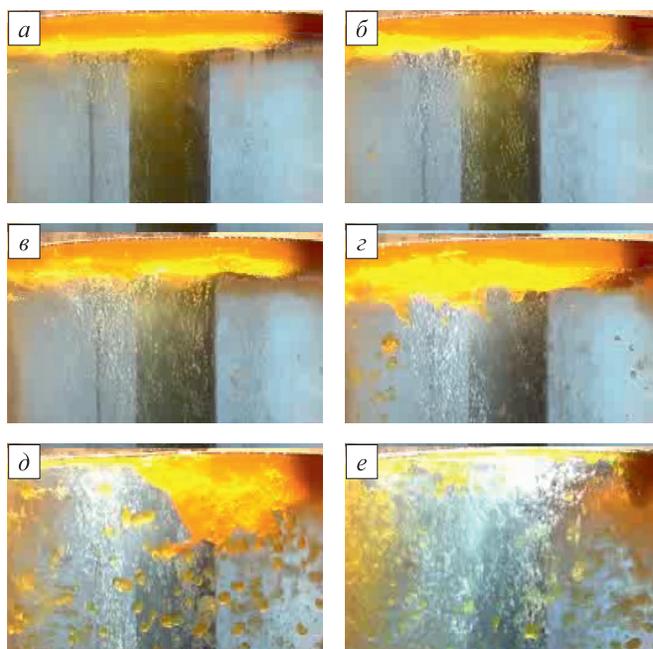


Рис. 4. Влияние интенсивности продувки через кольцевую фурму на характер перемешивания воды и масла при физическом моделировании (вид сбоку), л/мин:
а – 2; б – 4; в – 6; г – 8; д – 10; е – 12

В результате экспериментов на физической модели показано, что максимальный рафинирующий эффект при продувке в промежуточном ковше достигается при использовании кольцевой продувочной фурмы, расположенной в месте истечения стали из промежуточного ковша. Между тем, эффективность удаления неметаллических включений при продувке в значительной степени зависит от перемешивания металла и шлака в месте выхода пузырьков газа в атмосферу, поскольку часть включений может захватываться при перемешивании конвективными потоками. Соответ-

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

Элементы управления потоками, установленные в промежуточном ковше				Доля вещества, удаленного в шлак, %
металлоприемник типа «turbostop»	перегородка	продувочный блок-балка	кольцевая фурма	
•	—	—	—	75 – 80
•	•	—	—	84 – 89
•	•	• (6)*	—	86 – 90
•	•	• (10)	—	82 – 86
•	—	—	• (6)	88 – 93
•	•	—	• (2)	86 – 90
•	•	—	• (4)	93 – 96
•	•	—	• (6)	91 – 95
•	•	—	• (8)	88 – 92
•	•	—	• (10)	84 – 88

* В скобках указан расход вдуваемого газа ($\text{л} \cdot \text{мин}^{-1}$).

венно явление выхода пузырьков газа из стали в шлак, а затем в атмосферу требуют самостоятельного исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zhong L., Li Y., Wang B. et al. // Ironmaking and Steelmaking. 2008. Vol. 35. No. 6. P. 436 – 440.
- Chattopadhyay K., Hasan Isac M., M., Guthrie R.I.L. // Metallurgical and Materials Transactions B. 2010. Vol. 41. No. 1. P. 225 – 233.
- Satish Kumar D., Rajendra T., Ranjan M. // Ironmaking and Steelmaking. 2009. Vol. 36. No. 6. P. 470 – 475.
- Tassot P., Reichert N. // Revue de Metallurgie. 2010. Vol. 107. No. 5. P. 179 – 185.
- Garcia-Hernandez S., J. de Barreto J., Ramos-Banderas J., Solorio-Diaz G. // Steel Research International. 2010. Vol. 81. No. 36. P. 453 – 460.
- Cwudzinski A. // Ironmaking and Steelmaking. 2010. Vol. 37. No. 3. P. 169 – 180.
- Hou Q., Yue Q., Wang H., Zou Z., Yu A. // ISIJ International. 2008. Vol. 48. No. 6. P. 787 – 792.
- Zhang L., Taniguchi S., Matsumoto K. // Ironmaking and Steelmaking. 2002. Vol. 29. No. 5. P. 326 – 336.
- Zhang L., Taniguchi S. // International Materials Reviews. 2000. Vol. 45. No. 2. P. 59 – 82.
- Nguyen A.V., Ralston J., Schulze J. // International Journal of Mineral Processing. 1998. Vol. 53. No. 4. P. 225 – 249.
- Arcos-Gutierrez H., Barreto J., Garcia-Hernandez S., Ramos-Banderas A. // Journal of Applied Mathematics. 2012. P. 1 – 16.
- Минаев Ю.А., Яковлев В.В. Физико-химия в металлургии – М.: МИСИС, 2001. – 320 с.
- Thomas B., Huang X., Sussman R. // Metallurgical and materials Transaction B. 1994. Vol. 25. P. 527 – 547.

© 2013 г. А.Н. Смирнов, В.Г. Ефимова, А.В. Кравченко

Поступила 7 августа 2013 г.

УДК 669.14.018.8:669.112.227.1

О.К. Токовой¹, Д.В. Шабуров²

¹Южно-Уральский государственный университет
²ОАО «Челябинский металлургический комбинат»

РАЗРАБОТКА ШЛАКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АССИМИЛЯЦИИ НИТРИДОВ ТИТАНА ПРИ РАЗЛИВКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ. СООБЩЕНИЕ 3

Аннотация. Исследована динамика изменения азота в нержавеющей аустенитной стали в процессе сталеплавильного предела. Предложена шлаковая композиция для ассимиляции включений титана из нержавеющей стали. Опытная проверка показала, что шлак системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ способен поглощать в промежуточном ковше до 14,1 % оксидов титана, уменьшая загрязненность аустенитной нержавеющей стали неметаллическими включениями.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, азот, шлаковая система, оксиды титана, неметаллические включения.

DEVELOPMENT OF SLAG SYSTEM FOR THE ASSIMILATION OF TITANIUM NITRIDES IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL CASTING. REPORT 3

Abstract. Investigated the dynamics of nitrogen concentration in austenitic stainless steel in steel-making process. Proposed the slag composition for assimilation of titanium containing inclusions from stainless steel. Pilot testing has shown that the slag system $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ can absorb in the tundish ladle up to 14.1 % of oxides of titanium, reducing the pollution of the austenitic stainless steel by nonmetallic inclusions.

Keywords: stainless steel, nitrogen, slag system, oxides of titanium, nonmetallic inclusions.

Запороченность листовой нержавеющей аустенитной стали 08-12X18H10T поверхностными дефектами связана с выделением нитридов титана при охлаждении стали в кристаллизаторе и образованием крупных скоплений, которые вместе со шлакообразующими смесями (ШОС) формируют в кристаллизаторе конгломераты из металла и шлака – так называемые «коржи». Оставшиеся в непрерывнолите слэбе, они впоследствии при прокатке раскатываются, образуя поверхностные дефекты холоднокатаного листа.

В работе [1] представлен механизм образования этого дефекта. Как следует из изложенных представлений, предотвратить выделение нитридов титана при кристалли-

зации нержавеющей титансодержащей стали невозможно. Поэтому основным направлением уменьшения этого дефекта является создание условий, предупреждающих образование таких скоплений путем ассимиляции выделяющихся из стали нитридов титана шлаковой фазой.

Известно [2], что когда расплав покрыт слоем шлака, изменение свободной энергии твердой частицы на межфазной поверхности жидкий металл – шлаковая фаза

$$\Delta G = \sigma_{\text{т-ш}} - \sigma_{\text{ж-ш}} - \sigma_{\text{т-ж}} < 0. \quad (1)$$

Из уравнения (1) видно, что выделению твердой частицы из расплава в шлак благоприятствуют высокие