

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»МРНТИ 53.31.23
УДК: 669.154.002.61DOI [10.53002/028](https://doi.org/10.53002/028)В.И.Казаков¹, Д.А.Семерок¹, А.С.Бражников¹, В.С.Кузьмин¹, А.С.Исабекова²¹*Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан
(E-mail: v.kazakov@tttu.edu.kz)*²*Университет имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан
(E-mail: isabekovaarai.com)***Сокращение оксидных неметаллических включений в стальном расплаве за счет совершенствования схемы подачи раскисляющих материалов в сталь-ковш**

В статье рассматриваются причины образования оксидных неметаллических включений (ОНВ) в процессе выпуска углеродистого пролупродукта из кислородно-конвертерного агрегата и их влияние на качество металла. Известно, что основными источниками кислорода в стали являются остаточный кислород после продувки и атмосферный кислород которым струя металла насыщается в процессе выпуска в сталь-ковш. На основании теоретического анализа и численного моделирования с использованием ANSYS Fluent обоснована эффективность подачи раскисляющих материалов непосредственно под струю металла. Такой подход обеспечивает лучшее перемешивание, более полное усвоение реагентов и снижение образования включений, по сравнению с традиционной подачей на периферию ковша. Представлены рекомендации по модернизации схемы введения сыпучих материалов с целью повышения эффективности операции раскисления и снижения себестоимости производства стали.

Ключевые слова: раскисление, стальной расплав, оксидные включения, сталь-ковш, ферросплавы, алюминий, моделирование, гидродинамика, шлак, кислород.

Введение

Выпуск плавки из кислородно-конвертерного агрегата сопровождается операцией раскисления-легирования металла с целью удаления из расплава растворенного кислорода, оставшегося после продувки, а также в результате взаимодействия струи расплава с атмосферным воздухом. Наличие свободного кислорода в стали приводит к образованию газовых пор (пузырей) в процессе затвердевания слитка, повышенному количеству неметаллических включений и окислению легирующих элементов.

Методы и материалы

Оксидные неметаллические включения (ОНВ) представляют собой твердые частицы, образующиеся в стальном расплаве в результате взаимодействия кислорода с компонентами, стали или шлака [1,2]. К ним относятся, в первую очередь, соединения на основе оксидов алюминия (Al_2O_3), кремния (SiO_2), кальция (CaO), магния (MgO) химические реакции образования данных оксидов приведены ниже.



ОНВ имеют негативное влияние на качественные характеристики стали, а именно:

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

1. Снижают механические свойства. Включения являются концентраторами напряжений и могут способствовать зарождению и распространению трещин, особенно при динамических и циклических нагрузках [2]. Это ухудшает прочностные и пластические характеристики стали.

2. Затрудняют обрабатываемость. Включения могут мешать резке, сварке, прокатке и другим видам обработки. Твердые и остроугольные оксиды алюминия, например, вызывают ускоренный износ инструмента.

3. Приводят к дефектам поверхности. При прокатке включения вытягиваются в нитевидные образования, вызывая поверхностные и подповерхностные дефекты, влияющие на внешний вид и коррозионную стойкость изделия.

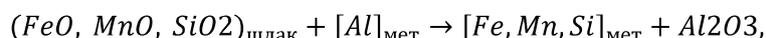
4. Ухудшают качество сварных соединений. Включения на границах зерен могут привести к хрупкости сварного шва и снижению его прочности.

Основным источником кислорода в металле является остаточный кислород, оставшийся в расплаве после продувки (примерно 300–1000 ppm). Без дополнительной обработки этот растворённый кислород при снижении температуры и взаимодействии с легирующими элементами образует оксидные включения непосредственно в металле (*эндогенные* включения). Например, в традиционном процессе конвертерной плавки избыток кислорода сначала накапливается в расплаве, а затем при раскислении превращается в продукты раскисления, остающиеся в металле [3].

Концентрация кислорода в стали (полученной без вакуумной обработки) после внепечной доводки составляет порядка $100 \cdot 10^{-6}$ (100 ppm), однако современными методами её удаётся снизить до ~10 ppm и даже <5 ppm для специальных сталей [2].

Конечный конвертерный шлак содержит значительное количество оксидов FeO и MnO (FeO 5–10%, MnO >1%). При выпуске часть шлака может захватываться вместе с металлом в сталеразливочный ковш.

Взаимодействие горячего металла с захваченным окисленным шлаком приводит к реакциям повторного окисления: растворенный алюминий, кремний и марганец встали окисляются этими оксидами шлака, восстанавливая Fe и Mn, а в металле образуются новые оксидные включения, например, Al_2O_3 . Такая реакция может быть представлена упрощённо:



то есть оксиды из шлака «отнимают» кислород у стали, формируя крупные включения глинозёма переменного состава. Аналогично, присутствие свободного SiO_2 в футеровке ковша или шибера может окислять растворённый алюминий стали, увеличивая количество оксидных включений. Поэтому важно максимально отсекал шлак при выпуске стали из конвертера.

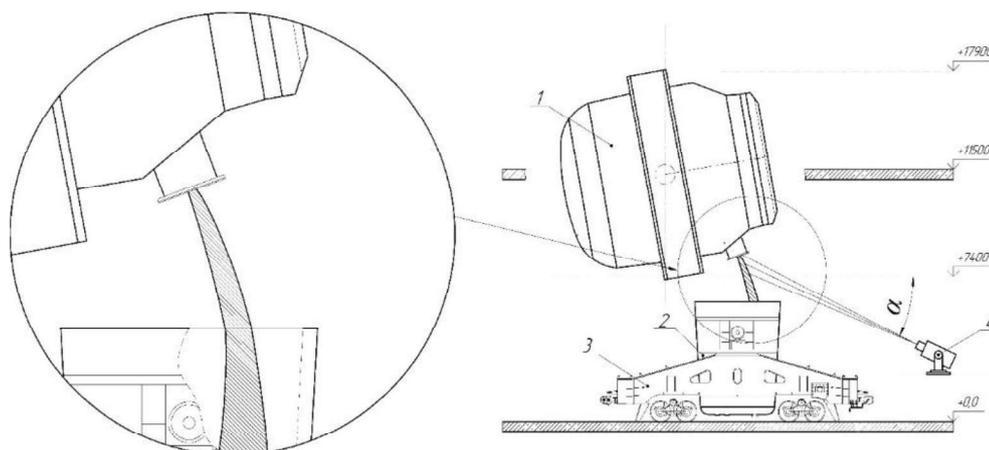
Падение струи расплава в ковш сопровождается интенсивным контактом металла с воздухом. Струя металла эжектирует окружающий воздух. Кислород воздуха (O_2 ~21%) мгновенно окисляет поверхность струи, образуя оксидные плёнки и мелкодисперсные включения, которые затем попадают в объём расплава ковша.

Кроме того, одновременно струя металла захватывает из воздуха азот и водяной пар, что приводит к росту содержания [N] в стали и образованию водорода [H]. Эти газы тоже могут вызывать дефекты (азотная хрупкость, флокены), однако основной ущерб качеству металла наносит именно окисление поверхности струи с образованием неметаллических оксидных продуктов. Ситуация усугубляется при сильном износе леточного канала и образовании шлакометаллического настыля на торце выпускного отверстия.

В таких условиях струя становится распылённой, что увеличивает площадь контакта расплава с воздухом и, как следствие, усиливает окисление металла.

Из рисунка 1 видно, что, струя расплава по мере падения приобретает раздробленный характер и ее диаметр значительно увеличивается в сравнении с выпускным отверстием конвертера которое в зависимости от степени износа составляет 150-180мм.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»



1 – кислородный конвертер; 2 – сталь-ковш; 3 – сталевоз; 4 – камера инфракрасного излучения

Рисунок 1 – Профильная проекция выпуска плавки из кислородного конвертера

В кислородно-конвертерном производстве широко применяется осаждающее раскисление – введение раскисляющих материалов непосредственно в струю выпускаемого металла или в ковш во время заливки. Классическая схема раскисления спокойной стали включает последовательное добавление ферромарганца, затем ферросилиция, и окончательное раскисление алюминием. Как правило, часть алюминия добавляют *под конец выпуска*, когда ковш уже почти заполнен, чтобы он равномерно распределился в объёме расплава. Именно такая последовательность ($Mn \rightarrow Si \rightarrow Al$) обеспечивает высокую степень раскисления: достигается спокойная сталь, не дающая газовых пузыристых выделений при затвердевании слитка.

Введение раскисляющих добавок *непосредственно в струю* сливаемого металла обладает рядом термодинамических и кинетических преимуществ по сравнению с добавлением их на периферию ковша. При добавлении раскислителей под струю реакция с кислородом происходит практически сразу, в объёме падающего металла и в зоне удара струи. Это ведет к быстрому уменьшению активности кислорода $[O]$ в расплаве.

Наиболее эффективно подавать раскислители в область контакта зеркала металла и падающей струи т.к. подавая материалы в струю расплава раскислители будут подвергаться чрезмерному атмосферному окислению ввиду распыленного характера струи и тем самым в меньшей мере взаимодействовать с металлом.

Главным преимуществом подачи раскислителей под струю является обеспечение эффективного перемешивания добавок с металлом за счёт кинетической энергии падающей струи. Если бросать раскислители в уже стоящий металл т.е. на поверхность расплава, материалы прежде чем достичь металла должны пройти слой шлака.

Материалы со сравнительно большой плотностью, как $FeSi$ ($\rho=3,5 \div 5,0 \text{ г/см}^3$) и $FeMn$ ($\rho=6,5 \div 7,3 \text{ г/см}^3$), способны пройти слой шлака имеющего плотность порядка $4,5 \text{ г/см}^3$ (в зависимости от состава), однако в случае ферросилиция последний ввиду своей граничной плотности со шлаком не так активно устремляется вглубь расплава, а в отдельных случаях даже может оставаться на его поверхности. Легкий Al ($\rho=2,3 \div 2,7 \text{ г/см}^3$) зачастую остается плавать на поверхности шлака. При добавлении же в поток частицы раскислителя вовлекаются циркуляцией, быстро расплавляются в горячей струе и разносятся по всему объёму ковша (см. рис. 2).

Таким образом, реакция раскисления протекает в объёме расплава, а не локально у стенок ковша. Это более эффективно связывает кислород и сокращает время полного усвоения раскислителей.

На практике отмечено, что степень использования алюминия при добавлении «под струю» значительно выше. При добавлении крупными кусками (чущками) на поверхность металла угар Al может достигать 70-80% – то есть большая часть металла сгорает, не успев раскислить сталь.

Как упоминалось выше, по мере протекания раскисления ферросплавами и алюминием, в металле образуются продукты – оксидные включения. Важным положительным моментом является то, что при подаче раскислителей ступенчато можно контролировать состав и размер образующихся включений. Например, кремний и марганец, введенные первыми, создают относительно крупные жидкие

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

включения $MnO \cdot SiO_2$, которые частично успевают всплыть до конца выпуска. Затем оставшийся кислород удаляется алюминием – образуются более мелкие твердые Al_2O_3 . В итоге суммарное количество неметаллических включений уменьшается, так как часть их вышла с силикатами, а оставшийся глинозём распределён мелко.

Кроме того, благодаря предварительному раскислению кремнием и марганцем требуется меньшее количество алюминия, что сокращает образование избыточного Al_2O_3 , который мог бы повысить вязкость шлака или вызвать осаждение на стенках ковша.

Для моделирования динамики потоков расплавленного металла в процессе слива из конвертера была применена программа ANSYS Fluent. В качестве расчётной области использовалась типовая геометрия 300-тонного сталеразливочного ковша, причём конечно-элементная сетка включала 16 901 элемент.

Параметры стали, принятые в расчёте, соответствовали плотности 7700 кг/м^3 и динамической вязкости $0,007 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$. Скорость истечения струи из леточного отверстия была принята по расчетам [3] выполненным магистрантом Семерок Д. А. и составила $4,9 \text{ м/с}$.

Для описания взаимодействия расплава с окружающей газовой средой была использована мультифазная модель, позволяющая одновременно учитывать фазы воздуха и жидкой стали. Такой подход обеспечивает более точное воспроизведение реальной картины течения и позволяет выявить особенности гидродинамики металла внутри ковша при различных режимах слива.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 продемонстрированы результаты получившихся расчетов, из которых видно, что падающая струя металла из конвертера образует турбулентные завихрения в толще расплава, которые усиливают перемешивание и способствуют более равномерному распределению тепла и реагентов в объёме ковша. Желтыми стрелками показаны характерные траектории движения гидравлических потоков внутри ковша.

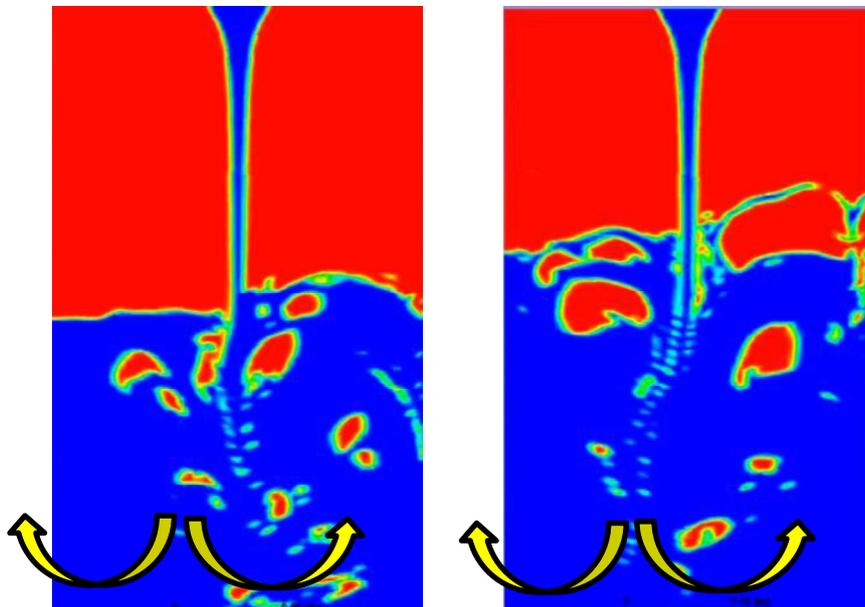


Рисунок 2 – Гидравлические возмущения металла в ковше образованные кинетической энергией падающей струи (результаты получены с использованием ПО Ansys Fluent)

Выводы и рекомендации

Эффективность подачи раскислителей под струю сливаемого углеродистого полупродукта подтверждается выполненными расчетами. Однако на множестве предприятий описанной проблеме

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

уделяется недостаточное внимание, что влечет за собой повышенный угар дорогостоящих раскисляюще-легирующих материалов и соответственно влияет на себестоимость выпускаемой продукции. Это выражается в использовании гравитационного транспорта, не позволяющего вносить реагенты в описанную зону, подача большую часть времени выпуска осуществляется на периферию ковша где материалы взаимодействуют с шлаком на поверхности металла, что снижает эффективность их использования и ведет к дополнительному образованию ОНВ которые в дальнейшем взаимодействуют с металлом в граничном слое металл-шлак.

Таким образом с целью повышения эффективности операции раскисления-легирования и снижения себестоимости стальной продукции необходимо модернизировать схему введения сыпучих материалов со стационарным исполнением гравитационного полотна на подвижную.

Список литературы

1. Ефимов В.А. Вторичное окисление и рафинирование при непрерывной разливке стали / Ефимов В.А. // Вестник Приазовского Государственного технического университета. – 1999. №7. – С. 135–141.
2. Скребцов А.М., Кузьмин Ю.Д., Терзи В.В., Качиков А.С., Секачев А.О. Содержание оксидных неметаллических включений в стали в зависимости от агрегата ее выплавки / Скребцов А.М., Кузьмин Ю.Д., Терзи В.В., Качиков А.С., Секачев А.О. // Вестник Приазовского Государственного технического университета. – 2012. №25. – С. 51–53.
3. Wei Xiao, Min Wang, Yanping Bao the Research of Low-Oxygen Control and Oxygen Behavior during RH Process in Silicon-Deoxidization Bearing Steel // Metals, 2019, № 9, 812, DOI:10.3390/met9080812.
4. Zhong-Liang Wang, Yanping Bao Development and prospects of molten steel deoxidation in steelmaking process // International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2024, 31(1), DOI:10.1007/s12613-023-2740-4
5. Д.А. Семерок, В.И. Казаков, В.С. Кузьмин, А.С.Бражников Аспекты образования закристаллизовавшегося раструба на торцевом сечении сталевыпускного узла кислородного конвертера / Д.А. Семерок, В.И. Казаков, В.С. Кузьмин, А.С.Бражников // Сборник LIV Республиканская научно-практическая конференция. – 2024. – С. 47–55.

В.И. Казаков, Д.А.Семерок, А.С.Бражников, В.С.Кузьмин, А.С.Исабекова

Оксидті метал емес қоспаларды болат балқымасындағы азайту үшін раскисляушы материалдардың болат-ковшқа беру схемасын жетілдіру

Мақалада оттегі конвертер қондырғысынан көміртекті жартылай фабрикаттарды шығару кезінде оксидті металл емес қосындылардың пайда болу себептері және олардың металл сапасына әсері қарастырылады. Болаттағы оттегінің негізгі көздері үрлеуден кейінгі қалдық оттегі және болат шөмішке жіберу кезінде металл ағыны қаныққан атмосфералық оттегі екені белгілі. Теориялық талдау және ANSYS Fluent көмегімен сандық модельдеу негізінде тотықсыздандыратын материалдарды металл ағынының астында тікелей беру тиімділігі дәлелденді. Бұл тәсіл шөміштің шегіне дәстүрлі берумен салыстырғанда жақсырақ араластыруды, реагенттердің толық ассимиляциясын және қосындылардың түзілуін азайтуды қамтамасыз етеді. Тотықсыздандыру операциясының тиімділігін арттыру және болат өндірісінің өзіндік құнын төмендету мақсатында сусымалы материалдарды енгізу схемасын жаңарту бойынша ұсыныстар берілген.

Түйінді сөздер: раскисляция, болат балқымасы, оксидті қоспалар, болат ковш, ферросплавтар, алюминий, модельдеу, гидродинамика, шлак, оттегі.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

V.I. Kazakov, D.A.Semerok, A.S.Brazhnikov, V.S.Kuzmin, A.S.Isabekova

Kazakh improvement of the scheme for feeding deoxidizing materials into steel ladle

The article discusses the causes of formation of oxide non-metallic inclusions (ONI) during the release of carbon semi-finished product from the oxygen converter unit and their impact on the quality of the metal. It is known that the main sources of oxygen in steel are residual oxygen after blowing and atmospheric oxygen with which the metal stream is saturated during the release into the steel ladle. Based on theoretical analysis and numerical modeling using ANSYS Fluent, the efficiency of feeding deoxidizing materials directly under the metal stream is substantiated. This approach ensures better mixing, more complete assimilation of reagents and reduced formation of inclusions, compared to traditional feeding to the periphery of the ladle. Recommendations are presented for modernizing the scheme for introducing bulk materials in order to improve the efficiency of the deoxidation operation and reduce the cost of steel production.

Keywords: deoxidation, steel melt, oxide inclusions, bucket steel, ferroalloys, aluminum, modeling, hydrodynamics, slag, oxygen.

References

- 1 Efimov V.A. Vtorichnoe okislenie i rafinirovanie pri nepreryvnoy razlivke stali / Efimov V.A. // Vestnik Priazovskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 1999. №7. – S. 135–141.
- 2 Skrebtsov A.M., Kuz'min Yu.D., Terzi V.V., Kachikov A.S., Sekachev A.O. Soderzhanie oksidnykh nemetallicheskikh vklyucheniy v stali v zavisimosti ot agregata ee vyplavki / Skrebtsov A.M., Kuz'min Yu.D., Terzi V.V., Kachikov A.S., Sekachev A.O. // Vestnik Priazovskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2012. №25. – S. 51–53.
- 3 Wei Xiao, Min Wang, Yanping Bao. The Research of Low-Oxygen Control and Oxygen Behavior during RH Process in Silicon-Deoxidization Bearing Steel // Metals, 2019, № 9, 812, DOI:10.3390/met9080812.
- 4 Zhong-Liang Wang, Yanping Bao. Development and Prospects of Molten Steel Deoxidation in Steelmaking Process // International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2024, 31(1), DOI:10.1007/s12613-023-2740-4.
- 5 D.A. Semerok, V.I. Kazakov, V.S. Kuz'min, A.S. Brazhnikov. Aspekty obrazovaniya zakristallizovavshegosya rastruba na torstevom sechenii stalevypusknogo uzla kislородного конвертера / D.A. Semerok, V.I. Kazakov, V.S. Kuz'min, A.S. Brazhnikov // Sbornik LIV Respublikanskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. – 2024. – S. 47–55.