

УДК 669.018:046.558:621.74.047

Л.В. Камкина, А.Г. Безшкуренко, В.Ю. Камкин, С.В. Пройдак

## РАСКИСЛЕНИЕ СТАЛИ И ПРОБЛЕМА УДАЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

### Актуальность исследований

Рост требований к качеству металлопродукции, особенно высокоответственным изделиям с необходимой повышенной надежностью в эксплуатации, обуславливает необходимость поиска новых технологических решений, позволяющих производить металл с более высокими свойствами. Одним из существенных факторов, определяющих уровень свойств стали, являются неметаллические включения, представленные в большинстве своем оксидами. Термодинамически предотвратить возможность образования последних не представляется возможным, поскольку при существующих технологиях производства в металле всегда присутствует кислород и элементы, с ним взаимодействующие. В этом случае резко ухудшается разливка стали, что выражается в интенсивном зарастании стаканов дозаторов и погружных стаканов. В зависимости от степени отложений возникают различные проблемы: уменьшение эффективного сечения канала сталеразливочного узла промежуточного ковша, ограничение количества металла, разливаемого через один ручей, полное прерывание процесса, снижение качества заготовки. Как правило, качество стали значительно улучшается путем удаления примесей и включений до очень низкого уровня.

### Обзор последних исследований, постановка проблемы

При проведении операций финишного этапа производства стали основными элементами, способными существенно снизить содержание активного кислорода в стали и тем самым снизить вероятность образования включений, снижающих эксплуатационные показатели стали, являются алюминий и кальций. Широкое использование кальцийсодержащих материалов (порошкообразных или в виде проволоки) объясняется многофакторностью влияния кальция на физико-химическое состояние расплава, микроструктуру заготовки и свойства металлопродукции [1]. При проведении последующих после выплавки стали операций, связанных с разливкой и кристаллизацией металлического расплава, а, следовательно, с охлаждением металла, происходит снижение растворимости кислорода и серы в железе (10-ти кратное по кислороду и 20-ти кратное по сере) и, как следствие, зарождение и рост вторичных включений [2]. К тому же в ходе разливки металл “получает”, как правило, порцию кислорода и эффект рафинировочных операций, проведённых в ковше нивелируется.

После проведения внепечной обработки в стали в растворенном виде находятся кислород, алюминий и кальций. В этом случае интенсивность образования продуктов раскисления и других соединений будет определяться степенью удаления от равновесия между алюминием, кальцием и активным кислородом. Исследование состава неметаллических включений в раскисленной алюминием электростали после обработки «белым» шлаком показывает [3], что включения состоят преимущественно из алюминатов кальция и магnezияльной

шпинели. При этом наибольшее количество алюминатов кальция представлено частицами  $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Общеизвестно, что основным фактором, определяющим остаточное содержание в стали растворенного кислорода, является содержание в ней углерода. Анализ данных промышленных плавов высокоуглеродистой стали показывает, что при содержании углерода около 0,7% вакуумно-углеродное раскисление обеспечивает в металле около 0,0015-0,0020%, кислорода, что несколько ниже равновесной с содержанием кремния.

Расчеты основных термодинамических параметров реакций с их участием для реальных металлических расплавов могут быть основой для прогнозирования особенностей и кинетики превращения глинозема в легкоплавкие алюминаты и алюмосиликаты кальция типа  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  при изменении внешних условий воздействия на изучаемую систему. Скоростные показатели процессов образования неметаллических включений при эффективной организации их перевода в шлак, очевидно, будут определяться скоростью диффузионных потоков взаимодействующих компонентов и степенью их удаления от равновесия.

Основываясь на анализе исследований, посвященным этому вопросу, следует отметить, что регламент ввода кальцийсодержащей порошковой проволоки обосновывают, исходя из соотношения  $[\text{Ca}]/[\text{Al}]_{\text{окс}}$ . Ограничение и контроль содержания оксидного алюминия в металле, необходимое для обеспечения стабильности серийной разливки и качества стали, в свою очередь, определяется процессами и способами раскисления и легирования стали, типом применяемых ферросплавов в условиях изменения физико-химического состояния металла конкретной плавки.

В работе [4] при проведении модифицирования стали на вакууматоре, основной задачей которого являлась глобуляризация и измельчение неметаллических включений, выполнена оценка степени усвоения кальция из железокальциевой порошковой проволоки по готовому металлу. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование проволоки взамен силикокальция повысило усвоение кальция в 2 раза и составило 8,0 – 14,5 % и увеличило отношение  $\text{Ca}/\text{S}$  до 0,3 – 0,4 против 0,1 – 0,2. При этом средняя величина отношения  $\text{Ca}/\text{Al}$  по опытным плавкам составила 0,106. В работе, к сожалению, не рассмотрено влияние реальных условий исследования на возможность взаимодействия кальция с кислородом, являющееся необходимым условием для трансформации оксидов алюминия в более легкоплавкие соединения.

Таким образом, при решении задачи достижения стабильного усвоения кальция, трансформации глинозема в жидкие алюминаты кальция необходимо учитывать возможность взаимодействия серы металла с частью вводимого кальция, влияния содержания в металле остаточного алюминия, углерода и др. факторов.

Дальнейшее повышение чистоты стали непосредственно связаны с проведением ряда операций по внепечной обработке металла, которые сводятся, в основном, к раскислению и микролегированию стали, к модифицированию примесей путем ввода различных элементов. При этом зачастую пренебрегают количеством примесей, оставшихся после выплавки стали, их качественным составом, не учитывают степень их удаления от динамического равновесия в условиях, когда могут возникнуть противоречия между термодинамикой и

кинетикой реальных процессов. Поэтому для обоснования рациональной технологии внепечной обработки и условий непрерывной разливки необходим комплексный подход, основывающийся на анализе условий образования, поведения включений при производстве конкретных марок стали.

#### Термодинамический анализ процесса раскисления

Кислород в жидкой стали находится в виде раствора и в виде оксидных неметаллических включений. Температурная зависимость растворимости кислорода в чистом жидком железе [5, 6] выражается уравнением (1):

$$\log \% [O]_{\max} = -6380/T + 2,765. \quad (1)$$

При температуре плавления в чистом железе в двойной системе Fe-O растворяется 0,166% кислорода по массе (рис.1).

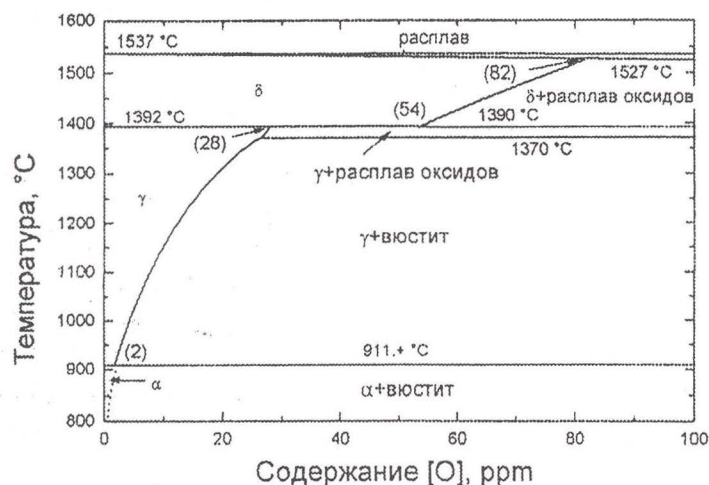


Рисунок 1 – Диаграмма состояния Fe-O [7]

Реакцию взаимодействия кислорода с элементом раскислителем в жидком железе в общем виде можно представить уравнением:



Соотношение между равновесным содержанием [O] и [R] определяется константой равновесия реакции (2), которая при отсутствии растворимости образующегося оксида в жидком железе определяется уравнением

$$K = a_R^y \cdot a_O^x = f_R^y \cdot [\%R]^y \cdot f_O^x \cdot [\%O]^x, \quad (3)$$

где  $f_R^y$  и  $f_O^x$  коэффициенты активности. При раскислении концентрации элемента-раскислителя [R] и кислорода [O] невелики. Можно принять  $a_R \sim [R]$  и  $a_O \sim [O]$ , а при образовании в результате реакции чистого оксида его активность равна 1. Значения произведения равновесных концентраций раскислителя и кислорода использованы для сравнения раскислительной способности углерода, кремния и марганца в чистом железе. При проведении термодинамических расчетов использованы выражения, приведенные в [5, 6, 7]. Результаты расчетов равновесного содержания кислорода в чистом железе приведены [8, 9]. Как показали результаты расчетов для бинарных систем, раскислительная способность углерода при его содержаниях 0,55-0,62% выше, чем кремния при содержаниях 0,25-0,45%. Марганец сравнительно слабый раскислитель и не обеспечивает снижения окисленности металла до требуемых пределов. Однако марганец используют при выплавке многих марок стали. Положительное действие марганца

на свойства стали связано с уменьшением содержания серы, улучшением удаления образовавшихся включений  $MnO$  из-за низкого межфазного натяжения на границе раздела металл-включение  $MnO$ . Раскислительный эффект марганца в присутствии углерода может выявляться при введении его в металл совместно с другими более сильными раскислителями – кремнием, алюминием.

Влияние марганца и кремния как более слабых раскислителей на раскислительную способность углерода для тройных систем учитывают через параметры взаимодействия, значения которых приведены в [10-12]. С учетом этого рассчитанное нами равновесное содержание кислорода в металле перед вакуумированием составило максимум 31,4 ppm (при содержании, %: углерода 0,55, кремния 0,25, марганца 0,56); минимум 27,0 ppm (при содержании, %: углерода 0,61, кремния 0,42, марганца 0,85). Сравнение полученных расчетных значений содержания кислорода с результатами прямого определения окисленности датчиками CELOX, показало их хорошее совпадение (минимум 28 ppm, максимум 43 ppm) при температуре 1610-1630°C.

Содержащийся растворенный кислород в жидкой стали, может вступать в реакцию с легирующими элементами в процессе охлаждения и кристаллизации с образованием оксидов. Продукты реакции могут значительно ухудшить эксплуатационные свойства стали, такие как пластичность, вязкость разрушения, обрабатываемость, износостойкость, сопротивление и восприимчивость к водороду.

Таким образом, содержание кислорода в стали должно быть снижено до желаемого низкого уровня. Эта базовая потребность в сталеплавильном производстве требует обязательного проведения операции раскисления. Тем не менее, неизбежным является наличие неметаллических включений в стали, по меньшей мере, в небольших количествах. Эти остаточные включения оказывают сильное влияние на свойства стали при ее эксплуатации. Особое внимание все больше посвящается контролю этих остаточных включений.

Большинство выпускаемых в настоящее время сталей являются полностью раскисленными. Как правило, раскисление производится во время выпуска плавки и рафинирования. С широким применением различных типов процессов рафинирования стали в последние годы, теперь это обычная практика для производства сталей с низким содержанием примесей и включений. Как упоминалось выше,  $Al$  широко используется в качестве окислителя в сталеплавильном производстве. Однако, большинство проблем стали можно отнести к окиси алюминия при образовании оксидных соединений с высоким содержанием оксида алюминия.

Для того, чтобы облегчить или устранить их вредное воздействие на свойства стали часто используют  $Ca$  для модифицирования сталей, раскисленных алюминием. Это позволяет избежать образования твердого оксида алюминия. Тем не менее, использование кальция не обеспечивает требований либо высокой усталостной прочности в эксплуатации готовых изделий или высокой холодной формовкости очень тонких калибров. Остаточные включения в стали, имеют важное значение для свойств стали. Несомненно, чистая технология раскисления становится актуальной темой для исследований, при которой разрабатываются меры предотвращения стали от загрязнения продуктами раскисления с помощью специальных средств, чтобы избежать их образования в расплаве стали. Однако, приближения содержания примесей и включений в стали может быть полностью достигнуто. Таким образом, состав, размер, распределение и количество

остаточных включений являются основными задачами для достижения более высоких эксплуатационных свойств стали.

### Практика раскисления стали алюминием

В зависимости от технологии принятой на конкретном заводе, процесс раскисления осуществляется путем добавления твердого кускового алюминия в расплавленную сталь в процессе выпуска. При этом происходит ряд реакций при вводе алюминия: Al окисляется печным шлаком, Al окисляется за счет захвата воздуха, алюминий реагирует с кислородом, растворенным в стали. Продуктом раскисления является  $Al_2O_3$ , который может как продукт реакции сохраняться в стали в виде включений, или часть его возможно всплывает в шлак. Согласно материального баланса, расход алюминия является суммой приведенных концентраций алюминия, затрачиваемых на его окисление.

Потеря алюминия из-за реакции с кислородом воздуха происходит через захват воздуха металлом. Эта потеря незначительна по сравнению с другими расходами алюминия, упомянутыми выше [11]. Как правило, процесс раскисления алюминием легко завершается, но продукты почти не всплывают в шлак и становятся включениями, унесенными в расплавленную сталь. Для улучшения чистоты стали, используют обработку с неокислительным синтетическим шлаком, который подвергается перемешиванию и дегазации.

В практике производства стали использование комплексных раскислителей имеет ряд преимуществ. При их применении существенно улучшаются термодинамические условия раскисления. Известно, что марганец повышает раскислительную способность кремния. Марганец и кремний отдельно и совместно повышают раскислительную способность алюминия. Это связано с уменьшением термодинамической активности образующегося оксида в сложных продуктах раскисления, которые отличаются от состава продуктов при отдельном раскислении.

При использовании силикокальция [13, 6] для модифицирования стали кремний, входящий в состав силикокальция, может оказать раскислительное действие при условии образования окислительной фазы (силикатов кальция), в которой активность  $SiO_2$  будет меньше единицы. При уменьшении активности кремнезема действие кремния в составе силикокальция увеличивается. Согласно литературным данным минимальная активность  $SiO_2$  равна 0,024 в двухкальциевом силикате. Поэтому, расчеты выполнены для образования  $2CaO \cdot SiO_2$ . Результаты расчета [8] равновесного содержания кислорода при различной концентрации элементов раскислителей и температурах (продуктами раскисления приняты  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  и  $2CaO \cdot SiO_2$ ) показывают, что в диапазоне концентраций, которые соответствует марочному составу стали, наибольшую раскислительную способность имеет алюминий. Однако, при образовании двухкальциевого силиката кремний силикокальция способен оказывать раскисляющее действие, образуя силикатные неметаллические включения. Во избежание образования силикатов кальция необходимо иметь содержание активного кислорода ниже 2,5 ppm, что обеспечивается остаточным содержанием растворенного алюминия в стали 0,025-0,027% (определяется датчиком CELOX). В дополнение к образованию жидких алюминатов кальция, еще одним важным аспектом использования Ca является изменение морфологии включений. Образующиеся мелкие шаровидные включения способны сталкиваться, укрупняться и всплывать, что уменьшает негативное воздействие на литейные и эксплуатационные свойства стали.

Оксид алюминия в стали находится в виде кластерных образований. Кластеры включений, таких как  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3 \cdot MgO$  и  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$  трудно удаляются из жидкой стали, и, как правило, вызывают зарастание стакана дозатора, в

В результате чего происходит снижение скорости разливки или даже полностью прекращается. Эти включения оказывают сильное влияние на ухудшение свойств литой стали. Кальций вводится для улучшения свойств сталей, раскисленных алюминием. Его ввод предотвращает образование твердой окиси алюминия и превращает твердый глинозем в жидкие алюминаты кальция, уменьшая склонность стакана дозатора к зарастанию. На рис. 2 приведена зависимость содержания  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  в неметаллических включениях и литейных свойств непрерывнолитой стали от содержания  $[\text{O}]$  в металле [7].

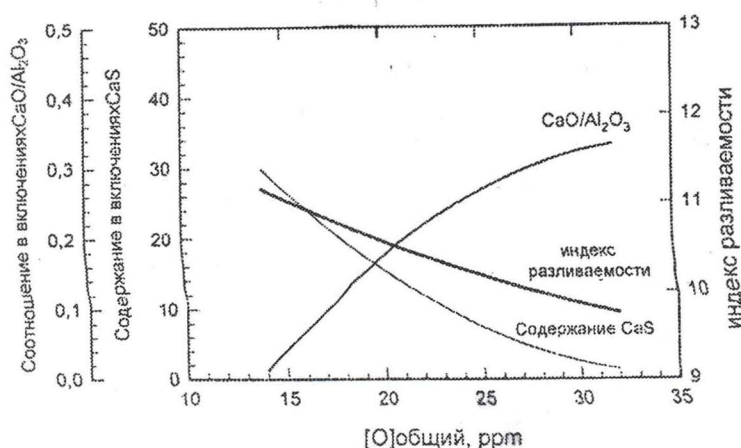


Рисунок 2 – Влияние остаточного содержания кислорода на разливкость стали [7]

Глиноземные включения встречаются в виде продуктов раскисления в алюминиевой основе при раскислении стали. Чистый оксид алюминия имеет температуру плавления выше  $2000^\circ\text{C}$ , то есть, эти глиноземные включения присутствуют в твердом состоянии в жидкой стали. Добавление кальция в сталь, которая содержит такие включения, изменяет состав этих включений из чистого оксида алюминия до  $\text{CaO}$ -содержащих алюминатов кальция, как это можно наблюдать на двойной диаграмме  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ . Температура плавления алюминатов кальция будет уменьшаться по мере увеличения содержания  $\text{CaO}$ , пока из оксидных фаз не появится жидкий расплав при температуре около содержания 22%  $\text{CaO}$ , то есть, когда соединение  $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  появляется при превышении температуры в  $1600^\circ\text{C}$ . Содержание жидкой фазы продолжает увеличиваться по мере роста содержания  $\text{CaO}$  и достигает 100% при 35%  $\text{CaO}$ . Минимальная температура плавления для жидкого алюмината кальция составляет около  $1400^\circ\text{C}$ , то есть, такие жидкие алюминаты кальция могут присутствовать в жидкой форме до тех пор, или даже после того, как сталь затвердевает.

С термодинамической точки зрения, если сера или кислород растворяется в стали при умеренных температурах, или если включения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  присутствуют в стали, кальций реагирует с ними. Согласно [14] с соавторами, кальций будет реагировать с кислородом или серой, пока содержание реагентов не станут очень низкими ( $<2\text{ppm}$ ). Образование сульфида кальция может произойти, если содержание кальция и серы достаточно высоки. Так как кальций имеет более высокое сродство к кислороду, чем у серы, добавление кальция первоначально приводит к более или менее выраженной конверсии окиси алюминия в алюминаты кальция до образования сульфидов кальция. Добавление кальция приводит к образованию твердых сульфидов кальция при температурах сталеплавильных, что может привести к засорению стакана дозатора, как и при наличии чистых включений глинозема. Как известно из [9], превращение глинозема в алюминаты кальция происходит до тех пор, все включения в стали не будут присутствовать только в жидкой форме. Образование твердых сульфидов

кальция происходит при дальнейшем вводе кальция. Диапазон, в котором все оксиды находятся в жидком состоянии и отсутствуют твердые сульфиды можно рассматривать как “оптимальный диапазон концентраций” при раскислении кальцием. Достижение этого диапазона является мишенью в целью при раскислении кальцием. Его точные границы определяются соотношением концентраций серы и кислорода в металле.

В стали, содержащей Mn, активность CaS не обязательно равна единице, так как CaS обычно находится в растворе с MnS при пониженной активности. Количество включений будет зависеть от содержания Mn в стали: чем выше Mn, тем ниже содержание CaS и его активность. Тем не менее, изменение активности CaS с содержанием Mn в стали имеет относительно незначительный эффект. Как отмечается в [7], над C12A7 линия равновесие оксидной фазы CA. Таким образом, чтобы получить жидкий алюминат кальция, состав стали должен быть ниже линии C12A7. Если Ca вводят в сталь с содержанием Al и S над C12A7 линии, включений оксида алюминия будут преобразованы в CA. Кальция должен затем вступать в реакцию с серой, пока содержание серы не опускается ниже линии, где образуют жидкие оксидные включения.

Ввод кальция эффективно модифицирует глиноземные включения не только в составе, но и в морфологии, что способствует улучшению эксплуатационных свойств стали. Эти свойства могут быть получены без требований достижения ультрачистой стали, если максимальный размер частиц ниже критического уровня. Мелкодисперсные включения не склонны к зарастанию стакана. Использование алюминия для раскисления, а также использование Ca для модифицирования раскисленных алюминием сталей вряд ли может привести к образованию мелких включений, потому что их соответствующие включения как правило, от нескольких до десятков микрометров в диаметре. Тем не менее, Ti, Zr и / или PЗМ обеспечивают перспективный способ получения тонких оксидных включений с диаметром менее 1-2 мкм. После регулирования и контроля, образовавшиеся соответствующие тонкие оксидные включения могут быть равномерно распределены как в расплавленной стали в процессе охлаждения и затвердевания, и в матрице твердого стального продукта после затвердевания. Эти тонкие окисные включения гарантируют макрочистоту и служат в качестве центров кристаллизации для осаждения и преобразования для достижения измельчения зерна и модификации включений. Проведенные исследования показывают, что высокая ударная вязкость по литом нержавеющей, низкоуглеродистых и низколегированных стали получается путем управления и использования включений.

#### Неметаллические включения и непрерывная разливка

Значительное расширение использования непрерывной разливки стали связано с преимуществами этого метода перед обычной разливкой в слитки. К ним относятся производительность, выход годного и стоимость. Проблемы, возникающие при непрерывном литье заготовок, связаны главным образом с качеством их поверхности и чистотой по неметаллическим включениям. При использовании сильных раскислителей возникают трудности, связанные с затягиванием разливочных стаканов и склонностью стали к вторичному окислению. Качество сталеплавильной продукции в значительной мере зависит от содержания, формы, размера и распределения в стали неметаллических включений. В течение ряда лет наблюдается повышенный интерес к производству “чистых” сталей путем удаления образующихся при их раскислении неметаллических, включений. В силу своего происхождения указанные включения имеют размер ~1 мкм и характеризуются плотностью

насыщения расплава  $\sim 10^{15}$  частиц/м<sup>3</sup>. Механизм раздельного раскисления жидкой стали такими элементами, как алюминий, кремний и марганец, хорошо известен. Дело обстоит иначе, когда введение этих элементов в металл производится одновременно или последовательно, как это часто встречается в промышленной практике. Такой термодинамический анализ выполнен в работе [15], в которой рассмотрены вопросы раскисления при последовательном введении кремния и алюминия. Продукты раскисления описываются фазовой диаграммой  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO}$  при низком содержании FeO. При 1600°C термодинамически стабильные оксидные фазы представляют собой чистые соединения глинозема, кремнезема и муллита. Автор указывает, что при определенных соотношениях значений активности алюминия и кремния в металле существуют области стабильности каждой из этих оксидных фаз, что описывается приведенной в статье диаграммой (рис.3).

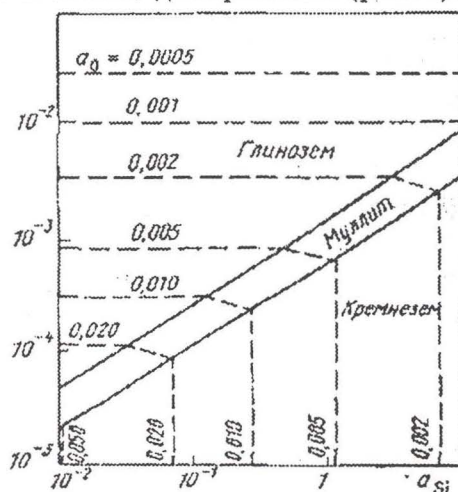


Рисунок 3 – Равновесная диаграмма Al-Si-O в расплаве железа при 1600°C:  
— граница оксидной фазы; ---- линии изокислородности  
(стандартное состояние: гипотетический 1%-ный раствор по массе)

Линии изокислородности кислорода, выраженные через активности алюминия и кремния в металле, также приведены на этом рисунке. Принимая во внимание сильное различие в сродстве к кислороду у кремния и алюминия, можно полагать, что именно количество вводимого алюминия определяет природу конечных продуктов раскисления. Например, если количество вводимого алюминия достаточно для связывания общего кислорода, содержащегося в расплаве, то образуются включения  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В противном случае в металле образуется муллит или кремнезем. Эти термодинамические расчеты удовлетворительно подтверждаются экспериментальными исследованиями по раскислению стали, в которых наблюдали присутствие только глинозема, когда количество добавляемого алюминия превышало некоторое критическое значение. В данном исследовании анализ оксидов и металлической фазы в образцах после введения раскислителей также показал, что состав оксидной фазы определяется отношением введенного алюминия к начальному содержанию кислорода [9].

Как известно гидродинамическое состояние расплава оказывает большое влияние на укрупнение и удаление включений. Перемешивание расплава обеспечивает два процесса. Оно обеспечивает перенос включений к поверхностям раздела расплава (к свободной поверхности, а также к стенкам и подине тигля), где возможно их выделение. Кроме того, частицы в потоке жидкости, где существует градиент скоростей, сталкиваются между собой именно благодаря существованию такого градиента. Иначе говоря, перемешивание благоприятствует укрупнению включений. Сравнительно недавно были предприняты попытки

количественно оценить явления укрупнения и удаления включений [14], описанное уравнением в интегральной форме. Представленное уравнение включает в себя количество включений на единицу объема, частота актов укрупнения включений, объем включений, скорость удаления включений. Первый интеграл представляет собой образование включений данного размера за счет укрупнения включений меньшего размера (“интеграл зарождений”). Второй интеграл характеризует рост включений вне вышеуказанных размерных пределов за счет укрупнения (“интеграл исчезновений”). Наконец, третий член описывает удаление включений через поверхности раздела расплава (“осаждения”).

В условиях ковшовой металлургии расплав обычно перемешивается достаточно энергично, так что распределение включений по количеству и размеру частиц может быть принято однородным во всем объеме. Исключение составляют области вблизи границ раздела, где расплав относительно спокоен. Перенос включений через эти спокойные зоны, по-видимому, является стадией, контролирующей общую скорость, и определяет значение “осаждения”. Предполагается, что не все включения, достигающие стенок, будут “захвачены” ими, т.е. следует принимать во внимание крайне трудную для предсказания “эффективность захвата” включений, достигающих стенок. Таким образом, математическое моделирование процесса удаления включений из стальных расплавов не в состоянии обеспечить получение надежных количественных результатов. Естественно, может быть найдена качественная оценка,

Для качественной оценки зарастания стакана дозатора при непрерывном разливке стали принимаем, что скорость зарастания канала пропорциональна толщине пограничного слоя

$$\frac{dx}{dt} = k\delta,$$

где  $x$  – толщина слоя зарастания, мм,  $\delta$  – толщина пограничного слоя, мм;  $t$  – время розливки стали (время зарастания), секунды.

Для цилиндрического канала из курса гидравлики известно

$$\delta = \frac{d}{\sqrt{\lambda} \cdot Re}$$

где  $d$  – диаметр канала, мм;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения в канале;  $Re$  – число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

$v$  – скорость вытекания (разливки) стали, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость разливаемой стали, м<sup>2</sup>/с. Принимаем  $v = \mu \sqrt{2gH}$  (формула Торричелли), скорость при вытекании из малых отверстий в тонкой стенке при постоянном напоре;  $H$  – уровень металла в промковше в определенный период времени, мм

$$Re = \frac{d\mu \sqrt{2gH}}{\nu}$$

$\mu$  – коэффициент вытекания стали из канала, среднее значение принимается  $\mu = 0,62$ ;  $H$  – уровень металла в промковше в определенный период времени, мм, Тогда

$$\sqrt{H} = \sqrt{H_0} - \mu \frac{d^2}{2D^2} \sqrt{2gt}$$

$H_0$  – начальный уровень металла в промковше, мм;  $D$  – эквивалентный диаметр промковша, мм.

После преобразования получим зависимость скорости нарастания корочки из отложений неметаллических включений на стенках дозатора.:

$$\frac{dx}{dt} = k \frac{v}{\mu \sqrt{2\lambda g} \cdot \left( \sqrt{H_0} - \mu \frac{d^2}{2D^2} \sqrt{2gt} \right)}$$

Как показывает анализ уравнения скорость оседания неметаллических включений зависит от характера поверхности стакана дозатора, что определяется материалом из которого он изготовлен, и кинематической вязкости разливаемой стали, а также определяется поддержанием относительно постоянного уровня металла в ковше. Анализ производственных данных показал, что нарушения в стабильности разлижки зависят от материала стакана и состава разливаемой стали, в первую очередь от содержания серы при вводе кальция. Появление твердых включений сульфида кальция в стали снижает ее жидкотекучесть, как и наличие твердых включений глинозема. Отмечается также влияние на зарастание стакана дозатора прироста общего кислорода в ковшевых пробах с МНЛЗ из-за подсоса воздуха или через открытую поверхность металла.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. – М.: Теплотехник, 2007. – 529 с.
2. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Инокулирование железоуглеродистых расплавов. М., 1993, 416 с.
3. Аксельрод Л.М., Паршин В.М., Мазуров Е.Ф. Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали. Сталь. – 2011 – 2007. – №4. – С. 30-33.
4. В.П. Турбар, Д.М. Гаркаленко, Л.В. Таболаева, Т.С., Литвинова и др. Влияние модифицирования кальцием на качество колесной стали. Металлы и литье Украины, 2009. - № 4-5. – С. 55 – 58.
5. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. М.: Металлургия. 1967. 791 с. с ил.
6. E. T. Turkdogan: Fundamentals of Steelmaking, The University Press, Cambridge, 1996
7. L. Zhang, B.G. Thomas, Inclusions in Continous Casting of Steel, in: Proceedings of the XXIV National Steelmaking Symposium, Morelia, Mich, Mexico, 26–28, November 2003, pp. 138–183
8. Термодинамічний аналіз процесів розкислення високовуглецевої електросталі. Безшкуренко О.Г., Грищенко Ю.М., Камкін В.Ю. Теорія і практика металургії, №3-6, 2015. С. 10-12
9. Безшкуренко А.Г., Грищенко Ю.Н., Мешалкин А.П. Влияние ввода кальция на образование и трансформацию Неметаллических включений//теория и практика металлургии. №1-2, 2014. С. 18-22
10. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавиельных процессов, М.: Металлургия, 1987. - 272 с.
11. Ashok K., Mandal G.K., Bandyopadhyay D. Theoretical Investigation on Deoxidation of Liquid Steel for Fe-Al-Si-O System. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015, Volume 68, Supplement 1, p. 9-18.  
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12666-015-0574-0#page-2>