

УДК 669-147:539.219.1

МЕХАНИЗМ ОЧИСТКИ СТАЛИ ОТ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В РАСКИСЛЕННЫХ АЛЮМИНИЕМ СТАЛЯХ

Рассмотрены особенности процессов ковшевой обработки стали различных марок, в том числе низкоуглеродистых, десульфурированных и ресульфурированных, а также различные варианты минимизации содержания неметаллических включений в этих продуктах. Чистоту стали можно регулировать, совершенствуя технологию выпуска расплава из сталеразливочного ковша, изменяя временные режимы обработки расплава в ковше, добавляя в расплав различные легирующие присадки, а также путем мягкого барботирования и добавления в жидкую сталь кальция. Растворенный в расплаве кальций и модифицированные под его воздействием неметаллические включения способствуют предотвращению образования отложений. При этом во время ковшевой обработки стали ставится задача не минимизации, а именно оптимизации количества и химического состава неметаллических включений.

Ключевые слова: коррозионно-стойкая сталь CleanSteel, неметаллические включения, ковшевая обработка, отложения.

В ходе первичной плавки углерод, содержащийся в чугуном расплаве, из которого будет впоследствии получена сталь, выжигается путем продувки этого расплава кислородом. При этом содержание кислорода в жидком металле возрастает в соответствии с кривой Вахера — Гамильтона (рис. 1). Процесс поддерживается до тех пор, пока общее содержание углерода и кислорода в расплаве изменяется в соответствии с кривой, отмеченной красной стрелкой, на отрезке, расположенном выше равновесной линии. В конце процесса продувки содержание углерода в стали обычно составляет 0,03 %, а соответствующее содержание кислорода — приблизительно от 700 до 1000 ppm (миллионных долей). Во время кислородной продувки железо и ряд других химических элементов, таких как фосфор и марганец, которые

легко могут быть редуцированы, окисляются и переходят в шлак. Как правило, содержание оксидов железа ($\text{Fe}^{2+,3+}$) в конвертерной (BOF) или дуговой сталеплавильной печи (EAF) составляет от 15 до 30 % в зависимости от параметров процесса. При этом количество кислорода в сталеразливочном ковше зависит главным образом от содержания кислорода или активных кислородных соединений в стали после продувки, количества печного шлака, попавшего в ковш, и содержания оксида железа в печном шлаке.

Для того чтобы получилась сталь высшего качества, содержание кислорода в сталеразливочном ковше, а следовательно, и итоговое содержание неметаллических включений в выплавленной стали должны быть на низком уровне.

Неметаллические включения образуются прежде всего в ходе процесса раскисления (дезоксидации) расплавленной стали. Помимо этого, во время внепечной обработки (в особенности при обработке сталей, раскисленных алюминием) в расплаве формируются дополнительные неметаллические включения. Алюминий, содержащийся в расплавленной стали, вступает в реакцию с оксидами, выделяющимися из огнеупорной футеровки, а также с оксидами, содержащимися в поверхностных шлаках. В результате этих реакций возникают разнообразные неметаллические соединения. Осаждаясь в расплавленной стали, образовавшиеся в процессе раскисления неметаллические соединения, оказывают негативное влияние на весь процесс ковшевой обработки стали. Они создают так называемые отложения

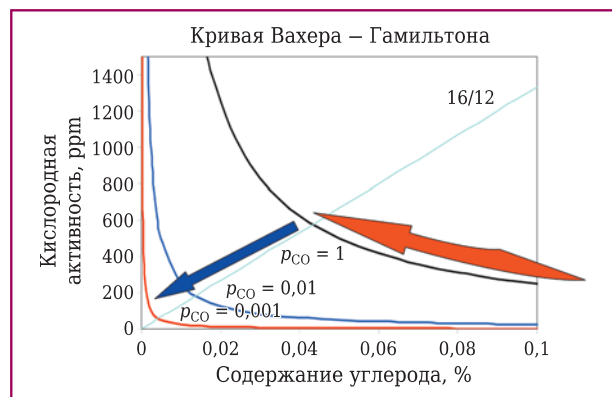


Рис. 1. Изменение содержания углерода и кислорода в расплаве стали в ходе его продувки кислородом, парциальное давление CO на кривых указано в барах

стальпроводки и в конечном итоге ухудшают качество получаемого продукта. Как показывает практика, при определенных условиях образовывать отложения может даже расплав коррозионно-стойкой стали марки CleanSteel.

Существуют разные способы предотвращения формирования дополнительных неметаллических включений в выплавляемой стали в зависимости от ее марки. Классификация марок стали, которые получают в ходе ковшевой обработки расплава, представлена на рис. 2. Прежде всего, марки стали подразделяются на обезуглероженные вакуумированием, как, например, особонизкоуглеродистые сорта ULC/IF, и необезуглероженные (не прошедшие процесса декарбонизации).

Необезуглероженные марки стали могут быть условно подразделены на три подгруппы: низколегированные (низкоуглеродистые), десульфурованные легированные и резульфурированные.

Для различных марок стали, представленных на рис. 2, необходимо непосредственно после открытия летки и выпуска металла из печи применять разные технологии внепечной обработки (очистки), которая производится в сталеразливочных ковшах. Далее рассмотрим технологии ковшевой обработки различных сортов стали с точки зрения их раскисления (регулирования содержания в них кислорода).

СОРТА СТАЛИ ULC/IF

Расплавленную сталь, которая должна пройти процесс обезуглероживания, до ее обработки в вакууматоре не следует подвергать предварительной дезоксидации. Во время вакуумной обработки расплава без его предварительного раскисления происходит выгорание углерода. На рис. 1 видно, что при этом его содержание в жидкой стали приближается к прямой линии, представляющей стехиометрию CO в соотношении 12:16.

Даже без кислородной продувки во время вакуумного обезуглероживания стали в ней фактически происходит более плавный процесс изменения соотношения общего содержания углерода и кислорода, чем следовало бы ожидать от стехиометрии. Причина этого — печной шлак, попавший в ковш во время выпуска расплава [1]. Наряду с кислородом, растворенным в стали, оксид железа из попавшего в ковш печного шлака также выступает в качестве реагента процесса вакуумной декарбонизации, способствуя выгоранию углерода с образованием угарного газа (газообразного монооксида углерода).

Во время вакуумного обезуглероживания происходит частичное удаление из расплава раство-

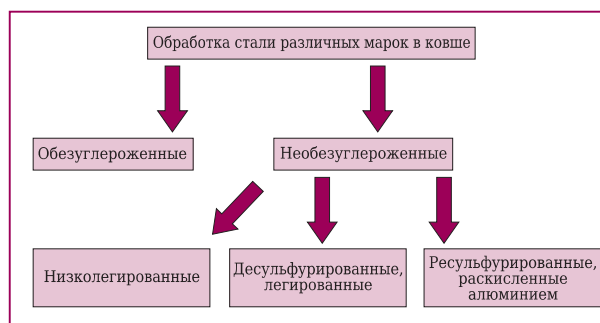


Рис. 2. Классификация марок стали

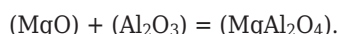
ренного в нем кислорода. Иными словами — в процессе обезуглероживания стали, одновременно происходит и ее дезоксидация. Таким образом, изначальная проблема удаления растворенного в расплавленной стали кислорода в какой-то степени решается автоматически уже во время ее ковшевой обработки. На следующем этапе (после вакуумного обезуглероживания) сталь должна быть раскислена, т. е. оставшийся в ней кислород должен быть удален путем его химического связывания такими веществами, как алюминий, кремний и марганец. При этом в стали образуются металлические оксидные включения.

Так как начальное содержание свободного кислорода в стали и связанного кислорода в виде оксида железа в шлаке в сталеразливочном ковше уже было редуцировано во время вакуумного обезуглероживания, количество реагентов, требующихся для раскисления, например алюминия, тоже снижается. Количество нежелательных неметаллических включений оксида алюминия в стали, которые осаждаются и удаляются в ходе ее раскисления алюминием, можно рассчитать по следующему уравнению реакции [2]:



При этом алюминий и кислород удаляются из расплава одновременно. Кроме того, объемы дополнительного выгорания алюминия при контакте с окружающей атмосферой могут быть уменьшены, если подавать его в ковш не в виде алюминиевых брусков, а в виде алюминиевой проволоки.

Оксид алюминия Al_2O_3 , образующийся в стали, может вступать в реакцию с MgO из огнеупорной футеровки или из шлака, находящегося в сталеразливочном ковше, с образованием шпинели $MgAl_2O_4$:



Степень значимости этой реакции зависит от базисных условий ковшевой обработки, например от ее продолжительности.

Неметаллические включения частично разлагаются и всплывают в поверхностный шлак, а частично остаются в жидкой стали. Остающиеся неметаллические включения, состоящие в основном из оксидов алюминия и магния, оказывают отрицательное влияние на чистоту произведенной стали. Более того, они затвердевают в погружаемых сталеразливочных стаканах и во время непрерывной разливки заготовок образуют отложения.

Обычно содержание кремния в сортах стали ULC/IF находится на минимальных уровнях. По этой причине эти стали нельзя обрабатывать силицидом кальция, что могло бы способствовать преобразованию твердых неметаллических включений в жидкости и этим предотвращать образование отложений. На практике в случае необходимости преобразования оксидов в жидкое состояние эта операция производится либо путем добавления в расплав чистого кальция, либо путем обработки жидкой стали соединением CaFe. Обычно на завершающем этапе ковшевой обработки стали производится ее «мягкое» барботирование, в ходе которого большая часть неметаллических включений выводится на поверхность жидкого металла и потом удаляется. При этом предотвращение образования отложений осуществляется путем продувки расплава аргоном.

СОРТА СТАЛИ, НЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННЫЕ В ВАКУУМАТОРАХ

Дезоксидация (раскисление) сортов стали, не прошедших обезуглероживания в вакууматорах, обычно производится во время выпуска расплава через леточное отверстие. В этих (не прошедших вакуумной обработки) сталях начальное содержание кислорода выше, чем в сталях, прошедших предварительную вакуумную обработку. Из-за этого для их дезоксидации требуются большие количества раскисляющих реагентов. Соответственно, во время раскисления таких сталей в них осаждаются большие количества неметаллических соединений. Вследствие этого при выпуске расплавов таких марок стали из печи в ковш необходимо уделять самое серьезное внимание предотвращению попадания в ковш вместе с расплавленной сталью печного шлака.

Итак, единственное, что объединяет технологии внепечной обработки трех вышеуказанных подгрупп сортов стали, — это общее для всех них требование минимизации попадания в ковш печных шлаков.

НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЕ СОРТА НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Из-за того что в эти сорта стали добавляют небольшие количества легирующих элементов, сам процесс легирования занимает относительно небольшой промежуток времени. Зачастую в ковш добавляется только алюминий, связывающая способность которого по отношению к кислороду и азоту весьма высока [3]. В случае если алюминий будет добавлен в расплав на ранней стадии его выпуска, то его концентрация в жидкой стали временно поднимется до очень высоких значений. При этом расплав будет стремиться вобрать в себя кислород и азот из окружающего воздуха. По этой причине рекомендуется добавлять в расплав алюминий на позднем этапе выпуска плавки. Шлакообразующие материалы, напротив, необходимо добавлять в расплав непосредственно после открытия летки. При этом сразу же начнется быстрое образование поверхностных расплавленных шлаков, которые уже на раннем этапе ковшевой обработки начнут абсорбировать растворенные в жидкой стали неметаллические включения.

Позднее добавление алюминия предполагает проведение предварительной дезоксидации стали, предпочтительно путем добавления в расплав углерода. В отличие от металлического раскисления, когда в ковш засыпают те или иные металлические реагенты, при добавлении углерода он выгорает с образованием угарного газа и улетучивается, не оставляя в стали даже следов. При этом, чтобы достичь эффективного предварительного раскисления углерод следует добавлять в расплав постоянно и равномерно. Однако перед началом засыпки в ковш алюминия, предварительное раскисление стали углеродом должно быть прекращено, чтобы предотвратить нежелательные реакции алюминия с углеродом.

Предварительная дезоксидация расплава углеродом позволяет снизить количество алюминия, добавляемого на следующем этапе ковшевой обработки для завершения процесса раскисления. При этом снижается количество образующихся в стали неметаллических включений. Как и при разливке особонизкоуглеродистых сортов стали (ULC/IF), образующиеся при ковшевом раскислении низколегированных низкоуглеродистых сталей неметаллические включения, содержащие алюминий, могут потом превращаться в шпинель.

Содержание кремния в низкоуглеродистых сталях, как и в сталях ULC/IF, зачастую может быть очень низким. По этой причине обработка расплава силицидом кальция становится невоз-

можной, а образование отложений может предотвращаться путем продувки жидкого металла аргоном.

Обычно печной шлак попадает в ковш в конце выпуска стали, после того как предварительное раскисление уже закончено. По этой причине повлиять на содержание в шлаке оксида железа (и тем более существенно его снизить) в ходе предварительного раскисления невозможно. В этой связи надо отметить, что попадание печного шлака в ковш во время разливки низкоуглеродистых сортов стали оказывает еще более негативное влияние на качество продукта, чем даже при разливке особонизкоуглеродистых сортов стали. И это — несмотря на предварительное раскисление низкоуглеродистой стали.

Остающиеся в ковшевом шлаке оксиды железа и марганца являются постоянным источником окислительной активности, ведущей к реоксидации уже раскисленной стали. В результате в ходе ковшевой обработки может потребоваться дополнительное добавление в расплав алюминия. Это, в свою очередь, ведет к формированию дополнительных включений в виде соединений алюминия. Шансы того, что эти включения всплывут на поверхность невелики. В результате может происходить серьезное зарастание стакана. Зачастую процесс разливки удается поддерживать путем увеличения интенсивности продувки жидкого металла аргоном, осуществляемой через стержень стопора. При этом неметаллические отложения, осевшие в погружаемом сталеразливочном стакане (SEN), выдуваются из него и затвердевают в кристаллизирующемся слябе. Кроме того, при возрастании скорости аргонового потока в кристаллизаторе активизируются турбулентные процессы, которые могут способствовать тому, что частицы порошковой шлакообразующей смеси (ШОС), находящейся в кристаллизаторе, могут быть захвачены турбулентными потоками и в результате остаться внутри расплава в дополнение к неметаллическим включениям соединений алюминия и шпинели, образовавшимся в ходе ковшевой обработки.

ЛЕГИРОВАННЫЕ И ДЕСУЛЬФУРИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Десульфурация раскисленных алюминием сталей в ковше обычно происходит в соответствии со следующими уравнениями реакций между сталью и шлаком [4]:

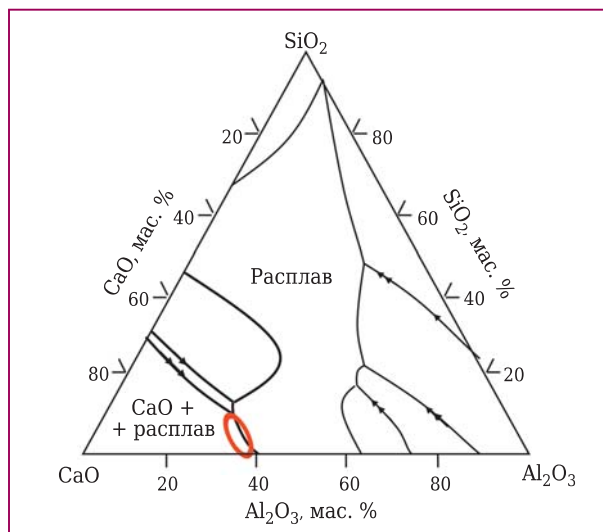
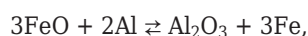
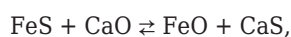
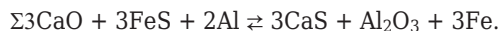


Рис. 3. Насыщение стали CaO в троичном исчислении в системе CaO–Al₂O₃–SiO₂



Из этих уравнений можно сделать вывод, что для эффективной десульфурации должны быть выполнены два предварительных условия:

1. Активность содержащегося в шлаке CaO должна быть настолько высокой, насколько это возможно, т. е. шлак сталеразливочного ковша должен быть насыщен CaO, как это показано на рис. 3.

2. Содержание оксида железа и активность кислорода в расплавленной стали должны быть настолько низкими, насколько это возможно, и, соответственно, содержание в ней алюминия должно быть максимально возможным.

Помимо этого в расплаве должно происходить турбулентное перемешивание стали и шлака, без чего невозможно нормальное развитие реакции. Для того чтобы добиться формирования в ходе выпуска расплава в сталеразливочный ковш турбулентных потоков, на начальном этапе ковшевой обработки в расплав необходимо добавить синтетический шлак и легирующие присадки, включая алюминий. При раннем добавлении алюминия его содержание в жидкой стали изначально окажется довольно высоким. Этим уже в самом начале ковшевой обработки будут созданы идеальные начальные условия для эффективной десульфурации расплавленной стали. Кроме того, даже при разливке стали в крупные заготовки уже на этапе выпуска расплава в сталеразливочный ковш будут обеспечены условия, гарантирующие быстрое и полное растворение легирующих присадок.

В ходе химической реакции между сталью и шлаком первоначальная часть оксида алюминия

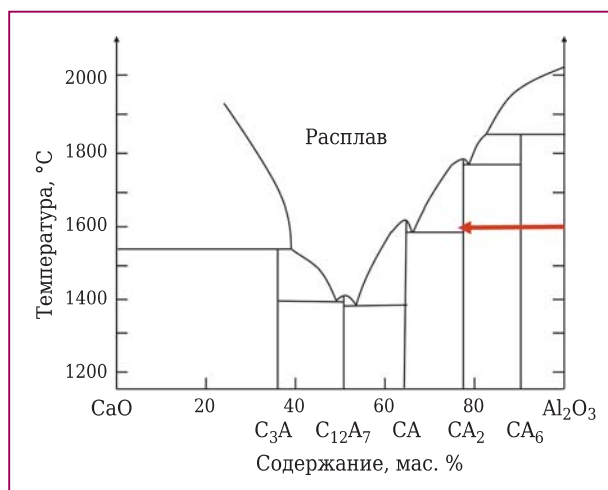


Рис. 4. Двухфазная диаграмма CaO–Al₂O₃

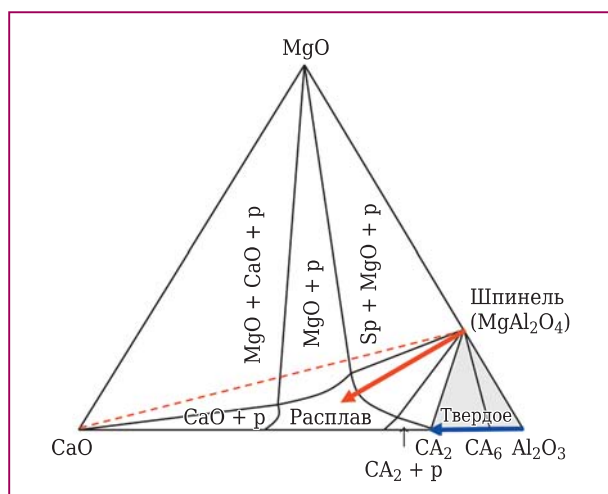
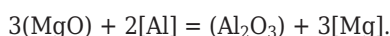


Рис. 5. Модификация оксидов в системе CaO–Al₂O₃–SiO₂: Sp — шпинель; p — расплав

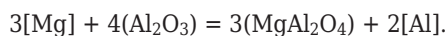
сформировалась в расплаве при его дезоксидации. Далее, в процессе десульфурации жидкой стали, в ней образовалось еще дополнительное количество оксида алюминия.

Ковшовая обработка десульфурованных марок стали проходит более интенсивно, чем низкоуглеродистых. За счет этого возрастает количество неметаллических включений, возникших на основе соединений алюминия, превратившихся в шпинель. Особенно значительное количество этих включений формируется при вакуумной очистке раскисленных алюминием сталей в соответствии со следующим уравнением:



Содержание в расплаве MgO из огнеупорной футеровки и (или) поверхностного шлака снижается во время добавления в него алюминия. При этом образуются оксид алюминия и металличе-

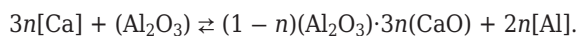
ский магний [5], который частично испаряется, а частично вступает в реакцию с оксидом алюминия, содержащимся в расплавленной стали. В результате образуется шпинель:



Таким образом, именно сорта стали с наиболее жесткими требованиями по чистоте, такие как, например, десульфурованная и прошедшая вакуумную дегазацию сталь для изготовления труб, предназначенных для транспортировки высокосернистого газа, оказываются в наибольшей степени загрязненными неметаллическими включениями, образовавшимися в результате разнообразных химических реакций.

Температура плавления включений, состоящих из соединений Al₂O₃ и (или) MgAl₂O₄, превышает 2000 °С. При прохождении этих твердых включений через погружаемый сталеразливочный стакан, образуются значительные тугоплавкие отложения. Как правило, указываемые в спецификациях данные по содержанию кремния в легированных и десульфурованных марках стали не имеют нижних ограничений. Это дает возможность применять для очистки стали силицид кальция.

При обработке стали кальцием содержащий в ней твердый глинозем превращается в жидкий оксид алюминия [6]:



В соответствии с двухфазной диаграммой CaO–Al₂O₃ (рис. 4) глиноземистые включения начинают переходить в жидкую фазу тогда, когда содержание в них CaO, входящего в композицию CA₂ (2CaO·Al₂O₃), превышает 21 %.

Процессы формирования шпинельных включений могут быть графически отображены с помощью троичной диаграммы CaO – Al₂O₃ – MgO, изображенной на рис. 5 [4]. Пунктирная линия между MgAl₂O₄ и CaO показывает теоретическую тенденцию образования чистой шпинели под действием кальция при изменении его содержания в сторону насыщения расплава оксидом кальция. При обработке кальцием процесс образования в жидкой стали шпинели протекает в соответствии с тенденцией, отмеченной красной линией, берущей свое начало от MgAl₂O₄ и развивающейся по направлению к области жидкого состояния.

Бинарная область шпинели и жидкости достигается немедленно. В противодействие этому голубая стрелка, представляющая динамику процесса модификации Al₂O₃ в ходе обработки кальцием, остается в области твердого состояния до

тех пор, пока не будет достигнута композиция CA_2 , содержащая 21 % Al_2O_3 . Для предотвращения отложений не обязательно, чтобы все неметаллические включения полностью перешли из жидкой фазы в твердую. Как было сообщено, образования отложений удастся избежать, если доля включений, находящихся в жидком состоянии, превысит 50 %, поскольку композиции включений расположены либо в центре бинарной области CA_2 + расплав, либо в центре бинарной области шпинель + расплав. При этом предполагается, что модификация шпинели осуществляется легче, чем модификация оксида алюминия [4].

Трехкомпонентная система $Ca-Fe-Si$, изображенная на рис. 6, и соответствующее парциальное давление кальция способствуют лучшему пониманию процесса очистки стали силицидом кальция. В этой трехкомпонентной системе существует расширенная область несмешиваемости, которая начинается с двухкомпонентной системы $Ca-Fe$ [7]. После подачи в жидкую сталь силицида кальция, содержащего, например, 40 % кальция, он переходит в жидкое состояние. Жидкие капли растворяются в расплаве железа до тех пор, пока его химический состав не достигнет области несмешиваемости в точке *B*. Далее жидкие капли силицида кальция распадаются на фазы, богатые железом и кальцием. Как показано на верхней диаграмме рис. 6, при достижении точки *D* фаза, богатая кальцием, испаряется, так как содержание в ней кальция превышает 80 %. Для того чтобы подавить испарение кальция ферростатическим давлением, силицид кальция должен подаваться глубоко в жидкую сталь. Это можно осуществить с помощью инжекционной фурмы или установки для подачи в расплав проволоки. Композиция фазы, соответствующей точке *D*, представлена точкой *E*, находящейся недалеко от угла фазы, богатой железом (см. рис. 6, нижняя диаграмма). Таким образом, растворяющая способность железа или стали для кальция экстремально низка.

Испарение кальция вызывает турбулентный поток в ковше. По этой причине для гомогенизации стали не требуется дополнительного перемешивания расплава аргонном. После проведения обработки стали кальцием даже не рекомендуется проводить мягкое барботирование расплава. Пузырьки аргона захватывают частицы кальция, растворенные в жидкой стали. Таким образом, кальций удаляется из расплава внутри всплывающих пузырьков аргона. В самом деле, пузырьки аргона захватывают модифицированные включения и выводят их на поверхность расплава. Благо-

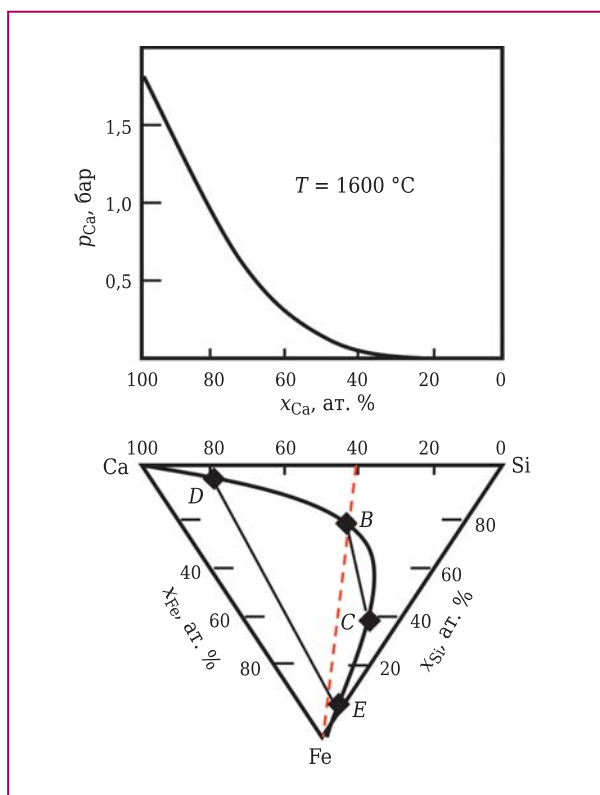


Рис. 6. Диссолюция, фазовое разделение и парообразование (вапоризация) кальция

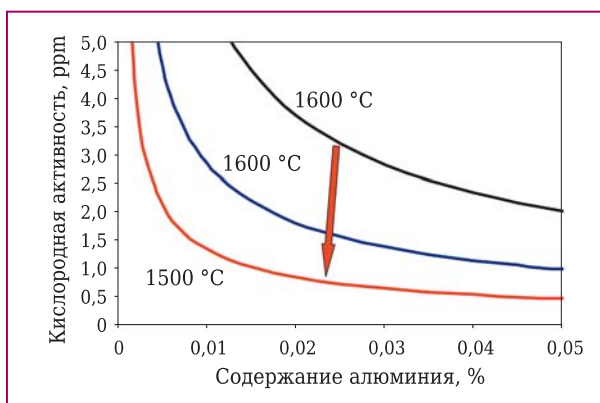


Рис. 7. Растворяемость алюминия и кислорода в жидкой стали при различной температуре, указанной на кривых

даря этому количество неметаллических включений к концу процесса ковшевой обработки стали оказывается низким. Однако несмотря на это могут образовываться отложения, в особенности если содержание кальция в расплаве невелико.

На пути от сталеразливочного ковша через промежуточный ковш к кристаллизатору жидкая сталь существенно остывает, ее температура приближается к точке разжижения. Как показано на рис. 7, общая растворяющая способность жидкой стали для алюминия и кислорода снижается с по-

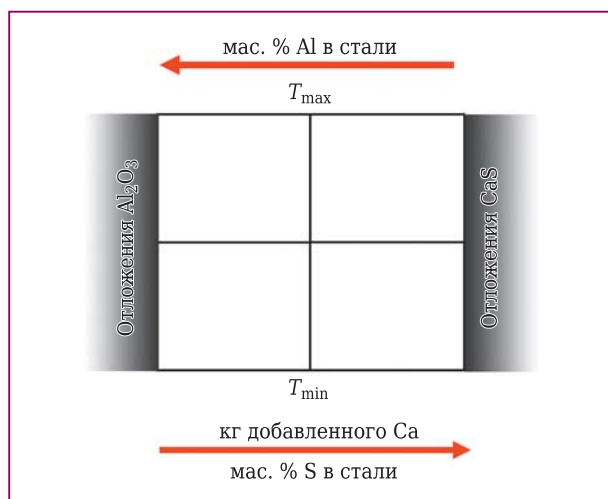


Рис. 8. Условия для возникновения отложений из Al_2O_3 и CaS

нижением температуры. Неметаллические включения, образовавшиеся в ходе вторичного раскисления, состоят из чистого оксида алюминия.

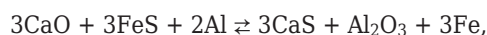
Дополнительные неметаллические включения, образовавшиеся под воздействием воздуха, проникающего через шиберный затвор и соединение между внутренним и погружаемым сталеразливочными стаканами, также состоят из оксида алюминия. Так как количество неметаллических включений, модифицированных в фазу растворенных в расплавленной стали жидких алюминатов кальция, а также содержание в расплаве кальция к концу процесса ковшевой обработки стали невелико, то не существует потенциальных возможностей для модификации включений из оксида алюминия, образующихся в результате вторичной деоксидации и реоксидации. Иными словами, и модифицированные включения, и небольшие количества металлического кальция в стали предотвращают образование отложений, вызываемых вторичным раскислением и повторным окислением стального расплава. Исходя из этого, стратегия очистки стали должна быть следующей: неметаллические включения должны быть в максимально возможной степени выведены на поверхность расплава и удалены оттуда до того, как будет производиться очистка стали кальцием при мягком барботировании. После завершения обработки стали кальцием производить дальнейшее мягкое барботирование не рекомендуется.

После завершения обработки стали кальцием в нее следует ввести необходимое количество титана. Это гарантирует, что сталь полностью раскислена и количество оксида титана, образовавшегося после его добавления, минимально. Иначе TiO_2 , осевший в жидкой стали, во время обработ-

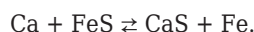
ки ее кальцием может преобразоваться в перовскит CaTiO_3 . Так как его точка плавления 1970°C , перовскит, смешиваясь в кристаллизаторе с порошковым шлаком, может привести к аварийной ситуации.

РЕСУЛЬФУРИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Как правило, стали с регулируемым содержанием серы предварительно проходят раскисление алюминием в соответствии с реакцией



в ходе десульфурации образуется оксид алюминия. Для того чтобы держать количество включений оксида алюминия на низком уровне, не рекомендуется проводить десульфурацию. С другой стороны, следует подчеркнуть, что во время последующей модификации оксида кальция одновременно может происходить и десульфурация. Уравнение этой реакции выглядит следующим образом:



Изначально повышенное содержание серы наряду с подачей в расплавленную сталь увеличенного количества кальция стимулируют протекание реакции. Существует опасность возникновения наряду с отложениями оксида алюминия отложений CaS . Первые образуются, как правило, когда перед обработкой расплава кальцием производится его предварительная десульфурация. Вторые возникают, когда перед кальцинированием десульфурация не производится. Как показано на рис. 8, для того чтобы разливка стали происходила без образования отложений, важно не только поддерживать необходимые химический состав и температуру расплава, но и отыскать правильное «окошко» (режим) для формирования неметаллических включений. Второе особенно важно при разливах стали ресульфурированных сортов. В любом случае регулирование содержания в расплаве серы должно проводиться после его обработки кальцием. Тогда содержание алюминия в жидкой стали приближается к нижней границе, указанной в спецификации области допустимых значений, и для предотвращения образования отложений на основе алюминия в расплаве нужно добавлять небольшие количества кальция. При этих условиях формирование отложений CaS протекает в умеренном темпе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе раскисления стали алюминием в сталеразливочном ковше происходят процессы формиро-

вания отложений, образующихся на основе оксида алюминия. Эти неметаллические включения на последующих этапах ковшевой обработки могут преобразовываться в шпинель. Количество алюминия, которое необходимо добавить в жидкую сталь для ее раскисления, зависит прежде всего от количества растворенного в расплаве кислорода и от содержания оксида железа в печном шлаке, попадающем в сталеразливочный ковш в процессе выпуска плавки. Вплоть до завершения ковшевой обработки оксид железа представляет собой потенциальный источник опасности реоксидации очищенной стали, а значит, и источник опасности образования в ней дополнительных неметаллических включений.

Существуют разные технологии предотвращения формирования дополнительных неметаллических включений. Их выбор зависит прежде всего от марки разливаемой стали. Для получения качественного продукта необходимо обеспечить вывод неизбежно образующихся в расплаве неметаллических включений на его поверхность, откуда они будут удалены вместе с поверхностным шлаком. При этом снижается степень опасности формирования зарастания погружаемого сталеразливочного стакана. Остаточные неметаллические включения должны быть преобразованы и удалены в процессе обработки жидкой стали кальцием. Это позволит обеспечить непрерывность процесса разлива стали в заготовки.

В ходе перемещения в промежуточном ковше к кристаллизатору сталь естественным образом остывает. При этом в уже очищенном расплаве активизируются процессы образования дополнительных неметаллических включений, возникающих в результате вторичной дезоксидации жидкой стали. Растворенный в ней в небольших количествах кальций, а также находящиеся в жидком состоянии неметаллические образования способствуют предотвращению зарастания погружаемого сталеразливочного стакана отложениями оксида алюминия. Поэтому количество неметаллических включений в стали должно удерживаться на минимальном уровне. Для этого до начала очистки расплава кальцием должно быть произведе-

но его мягкое (медленное) барботирование, в ходе которого осуществляется вывод неметаллических веществ на поверхность жидкой стали.

Кроме того, чтобы избежать дальнейшего образования вредных неметаллических включений, после обработки расплава кальцием в него необходимо ввести определенные легирующие присадки, такие, например, как титан.

Библиографический список

1. **Bannenberg, N.** Secondary metallurgy for clean steel production by tank degassing / *N. Bannenberg, H. Lachmund, B. Prothmann* // *Proceedings 77th Steelmaking Conference, 1994, Chicago / Illinois*. — P. 135–143.
2. **Jahnke, D.** Improvement of castability and quality of continuously cast steel / *D. Jahnke, M. A. Zhongting, P. Valentin, A. Heinen* // *ISI International*. — 2000. — Vol. 40, № 1. — P. 31–39.
3. **Knüppel, H.** Desoxidation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen / *H. Knüppel*. — Düsseldorf: Verlag Stahleisen.
4. **Bergmann, B.** Schlackenführung und Schlackenoptimierung in der Sekundärmetallurgie / *B. Bergmann, N. Bannenberg* // *Stahl und Eisen*. — 1991. — № 111. — P. 125–132.
5. **Pretorius, E.** The effective modification of spinel inclusions by Ca treatment in LCAK steel / *E. Pretorius, H. Oltmann, T. Cash* // *Iron and Steel Technology*. — July 2010. — P. 31–44.
6. **Bannenberg, N.** Einstellen tiefer bzw. definierter Gehalte an Schwefel, Calcium, Sauerstoff Stickstoff Wasserstoff und Phosphor sowie deren Eigenschaften auf die Stahleigenschaften / *N. Bannenberg, H. Lachmund, V. Schwinn, A. Streisselberger* // *Vortrag auf dem XLVII. Berg- und Hüttenmännischem Tag am 26.06.1996 in Freiberg Veröffentlichung im Tagungsband, Kolloquium 7, Hochleistungswerkstoffe*. — S. 11–25.
7. **Schürmann, E.** Lösungs-, Entmischungs- und Verdampfungsverhalten von Calcium sowie von calciumreichen, silizium- und aluminiumhaltigen Legierungen bei der Behandlung von Eisenschmelzen / *E. Schürmann, H. Litterscheidt, P. Fünders* // *Arch. Eisenhüttenwesen*. — 1975. — Bd 46, № 10. — S. 619–622. ■

Получено 20.03.13
© Г.-Д. Экхардт, 2013 г.