

Л.Г.Тубольцев, В.П.Корченко, С.И.Семькин, Н.И.Падун,
Я.А.Полякова

ВЛИЯНИЕ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИИ КИСЛОРОДНО- КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ НА СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОМ РАСПЛАВЕ

Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины

Исследовано влияние вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней и комбинированной продувкой на содержание кислорода в расплаве. Выдвинута и обоснована гипотеза о структурном составе жидкого металла. Показана возможность уточнения зависимости содержания кислорода от содержания углерода в железоуглеродистом расплаве с использованием методики приведения экспериментальных данных к сопоставимым показателям. Отмечено, что уменьшению содержания кислорода в жидкой стали в процессе кислородно-конвертерной плавки способствует: комбинированная продувка (дополнительное перемешивание реагирующих фаз, гомогенизация расплава), использование двухъярусных фурм, применение внешних электрических воздействий.

Ключевые слова: кислородно-конвертерная плавка, вариант технологии, расплав, содержание кислорода, экспериментальные данные

Современное состояние вопроса. Согласно прогнозам развития металлургической промышленности конвертерный передел будет, по крайней мере, в среднесрочной перспективе, оставаться основным способом производства стали в целом ряде промышленно развитых стран, в т.ч. в Украине. Это требует усиления внимания к совершенствованию технологии конвертерной плавки, улучшению ее показателей и повышению качества выплавляемого металла, что, в свою очередь, требует более глубокого анализа природы, строения и свойств перерабатываемых в конвертере железоуглеродистых расплавов.

На формирование структуры готового металла и содержание газов в стали оказывают влияние условия его выплавки в кислородном конвертере, для которых характерно наличие большого количества газов как в полости конвертера при продувке кислородом, так и внутри металлической ванны вследствие интенсивного барботажа расплава. Основными газами, содержащимися в жидком железоуглеродистом расплаве, являются кислород, азот и водород. Материалы данной статьи посвящены изучению поведения кислорода в железоуглеродистой ванне при выплавке металла в конвертерах.

Основные положения о механизме растворимости газов в железоуглеродистом расплаве.

Общепринятым [1] является, что кислород в жидкой стали находится в виде раствора и в виде оксидных неметаллических включений. В расплаве атом кислорода, в результате захвата двух электронов, превращает-

ся в анион O^{2-} и внедряется на место вакансии, образующейся в структуре δ -Fe за счет отрыва катиона Fe^{2+} [2]. Даже при очень низких парциальных давлениях кислорода в газовой фазе, соприкасающейся с жидким железом, происходит окисление последнего с образованием вюститита [3].

Вместе с тем, отмечается, что количество кислорода зависит, прежде всего, от количества углерода в металле. По данным авторов монографии [4] присутствие углерода резко снижает способность железа растворять кислород вследствие протекания восстановительной реакции $[FeO] + C = CO + [Fe]$. Эти рассуждения базируются на предположении о нахождении в расплаве углерода в виде атомов или молекул Fe_3C . Вполне вероятно, что атомы углерода отдают свои электроны железу, трансформируясь в C^{4+} или C^{3+} . При этом также вполне вероятно, что атомы углерода не создают прочной химической связи с атомами железа и могут свободно перемещаться в кристаллической структуре железоуглеродистого расплава (рис.1).

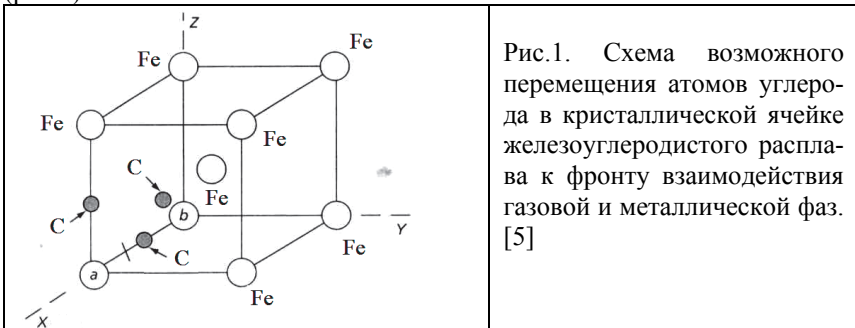


Рис.1. Схема возможного перемещения атомов углерода в кристаллической ячейке железоуглеродистого расплава к фронту взаимодействия газовой и металлической фаз. [5]

В металлургической литературе первая попытка определения связи механизмов процесса плавления и изменения химического состава с природой и строением расплавленного металла приводится в монографии В.И. Явойского [6]. Указывается, в частности, что по степени подвижности частиц и коллективности их движения расплавы металлов занимают промежуточное положение между твердыми и газообразными фазами. Поэтому свойство упорядоченности строения вещества в твердом состоянии и полное ее отсутствие для газообразном создает предпосылки для формирования представлений о структуре жидкости. Это свойство подтверждается незначительным увеличением объема твердых тел при плавлении, меньшей теплотой плавления и изменения энтальпии (по сравнению со скрытой теплотой испарения), незначительным изменением теплоемкости металла и т.д. Однако, единая теория для всех жидкостей пока не создана и имеются лишь попытки разработать термодинамические теории для отдельных конкретных жидкостей. В этой же монографии приводятся предположительные данные о форме нахождения углерода в растворе, при этом указывается, что скорость поступления углерода в

зону процесса и его диффузия в толще металла являются лимитирующим фактором скорости реакции только на заключительном этапе кислородно-конвертерного процесса. Определяющим является расход кислорода и интенсивность перемешивания ванны.

И.И.Борнацкий [7] также указывает на то, что вблизи температуры плавления расплавленные металлы ближе к твердому состоянию, чем к газообразному. В пользу этого тезиса указывается, что при плавлении силы сцепления между частицами испытывают сравнительно небольшие изменения. При плавлении происходит нарушение дальнего порядка и уничтожение кристаллической решетки как жесткой системы центров колебания атомов. Однако, ближний порядок, выражающийся в стремлении каждого из атомов окружить себя закономерно расположенными соседними, остается.

В монографии [8] существенные указания относятся к степени перегрева над ликвидусом, при которой сохраняется близость жидкого состояния к твердому. Схожесть структур выявлена при перегреве в 30–40⁰С, приводятся данные зарубежных авторов, согласно которым величина такого перегрева может составлять 100⁰С.

В монографии [9] утверждается, что ожидаемая близость строения структуры относительно слабо перегретого выше точки плавления расплава и твердой его модификации послужила основанием для создания ряда моделей или теорий строения жидкостей, которые существенно отличаются как по принципу построения, так и по характеру объяснений. Констатируя, что окончательно вопрос о форме присутствия углерода в сплавах (и соответственно изменения их характеристик) не выяснен, авторы монографии указывают на возможное существование нескольких форм углерода в железе. При этом вероятнее всего углерод существует в форме группировок Fe–С частично с ионной связью, а при высоких концентрациях проявляются силы ковалентной связи между атомами или ионами углерода с образованием группировок, подобных микрочастичкам графита.

В.А. Кудрин [10], анализируя аспекты, связанные с понятием «кластер», уточняет, что кластер не может быть классифицирован как представитель другой фазы и не имеет физических границ, при переходе через которые параметры состояния свойств жидкости (расплава) изменялись бы скачкообразно. При этом важным соображением является отличающаяся от других источников ссылка на имеющиеся некоторые данные о том, что полное разупорядочение жидкого расплава наступает при очень высоких перегревах (800–900⁰С) над температурой плавления. В.А.Кудрин с полной определенностью утверждает, что изменения структуры жидкого металла должны учитываться при определении рациональной технологии плавки, поскольку лишь при перегреве около 250⁰С над температурой плавления осуществляется переход к структуре перегретых расплавов.

Обобщение результатов выполненного анализа позволяет сделать следующие заключения.

1. Приводимые разными авторами суждения носят, как правило, предположительный гипотетический характер. Тем не менее, изложенные в металлургической литературе соображения свидетельствуют в пользу целесообразности выполнения исследований, изучающих изменение характеристик железоуглеродистого расплава в процессе плавки, в т.ч. характеристик взаимодействия газовой и металлической фаз.

2. Отсутствуют конкретные сведения о форме нахождения углерода в расплаве, при этом, наряду с тезисом о том, что он находится в молекулярном виде в форме Fe_3C , высказывается предположение о преимущественной его форме в виде C^{4+} или C^{3+} .

3. Термодинамические представления об очередности выгорания углерода справедливы лишь для условий недостатка кислорода, что проявляется не во все периоды плавки. Дополнительное влияние на эти процессы оказывает перемешивание ванны, способствующее развитию диффузионных переходов.

4. Для рационализации кислородно-конвертерного передела следует считать оправданным использование новых подходов и гипотез к изучению взаимодействия газовой и металлической фаз.

Проведенный анализ показывает, что механизм поведения кислорода в процессе кислородно-конвертерной плавки до конца не изучен. Кроме того, недостаточно сведений о влиянии параметров различных вариантов кислородно-конвертерной плавки на содержание кислорода в металле, поэтому актуальным является аналитическое исследование по уточнению вышеуказанных параметров и показателей.

Цель исследования. Изучение влияния различных вариантов технологий конвертерной плавки на уровень содержания кислорода в металле, а также изыскание наиболее эффективных путей его снижения.

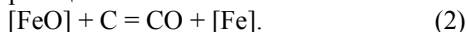
Задачи исследования Формирование банка данных опытных плавков, проведенных в ИЧМ на 1,5-т конвертере в сопоставимых шихтовых условиях. Анализ сведений по насыщению железоуглеродистого расплава кислородом путем проведения системной обработки экспериментальных данных.

Изложение основных результатов исследования

Высокая окислительная способность кислорода при температуре плавления металла позволяет использовать упрощенную гипотезу, что кислород взаимодействует с железом по реакции:



образуя обособленную фазу – вюстит $[\text{FeO}]$, с последующим переходом $[\text{FeO}]$ из металла в шлак (FeO) . При этом одновременно происходит восстановительная реакция:



Эти два процесса и должны определять содержание кислорода в металлическом и шлаковом расплавах. Однако, как показывает практика, содержание кислорода в металлическом расплаве в процессе кислородно-конвертерной плавки определяется множеством факторов, основными из которых являются:

- химический состав и структурное состояние железуглеродистого расплава;
- условия протекания окислительно-восстановительных реакций в шлако-металлической ванне конвертера;
- коагуляция атомно-молекулярных форм $[\text{FeO}]$ в более крупные шлаковые образования (FeO) и образование газовых пузырей CO , которые имеют возможность удалиться из расплава за счет разницы удельного веса. Сложно удаляемые из расплава частицы $[\text{FeO}]$ и $[\text{CO}]$ остаются на границах зерен металла в виде неметаллических включений;
- условия перемешивания шлакометаллической ванны в процессе кислородно-конвертерной плавки, которые способствуют удалению частиц $[\text{FeO}]$ в шлаковую фазу и $[\text{CO}]$ в газовую. Условия перемешивания определяются технологическими параметрами кислородно-конвертерной плавки, т.е. напрямую зависят от варианта технологии.

В идеальном случае расплавленная сталь обычно рассматривается как гомогенная жидкость сложного химического состава. В реальных условиях жидкие расплавы занимают промежуточное положение между твердыми и газообразными телами и отличаются степенью подвижности частиц и коллективностью их движения.

Известные экспериментальные данные по растворимости кислорода в железе (рис.2) показывают, что при изменении структурного состояния растворимость кислорода в железе изменяется скачкообразно. К скачкообразному изменению растворимости кислорода следует обратить особое внимание, поскольку такое поведение кислорода наблюдается и в конвертерных технологиях. Это свидетельствует о влиянии структурного состояния на растворимость кислорода в расплаве. Для анализа поведения кислорода при конвертерной плавке в качестве рабочей прием гипотезу о сохранении ближнего порядка расположения атомов железа при небольших перегревах над линией ликвидуса [11]. При увеличении температуры расплава размер твердых частиц уменьшается, что увеличивает общую площадь энергетически ослабленных их границ и, следовательно, увеличивает возможность для растворения в расплаве большего количества газов (рис.3).

Для формирования модели поведения кислорода в расплаве используем также данные о структуре расплава, подвергнутого высокоскоростному охлаждению [11] (рис.4), на основании которой можно говорить о наличии в расплаве твердых группировок Fe-C металла. При взаимодействии этих твердых группировок металла с газообразным кислородом на их поверхности образуются твердые соединения вюстита (закиси железа –

FeO). Внутри этих группировок газы могут попасть только при последующем их распаде на более мелкие.

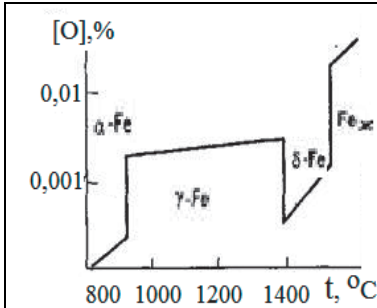


Рис. 2. Растворимость кислорода в железе.

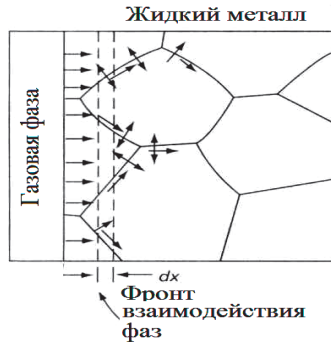
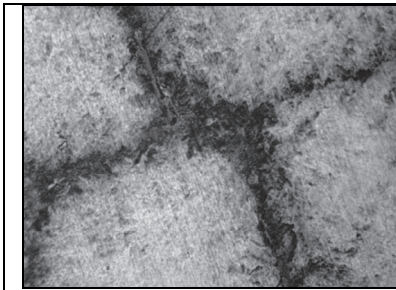
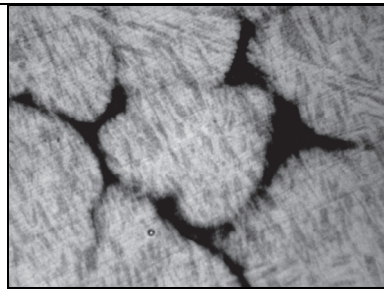


Рис.3. Схема взаимодействия газовой фазы с Fe-C расплавом



а

Рис.4, а. Виды блоков из δ -частиц в структуре жидкости массой 40 г до их коагуляции в процессе закалки стали от 1640–1650 $^{\circ}$ C. а – для стали с 0,8%С, 0,5%Mn, 0,55%Si, 0,042%P, 0,012%S. Травлено пикратом натрия.



б

Рис.4, б. Виды блоков из δ -частиц в структуре жидкости массой 40 г до их коагуляции в процессе закалки стали от 1640–1650 $^{\circ}$ C. б – для стали с 0,17%С; 0,25%Mn, 0,75%Si, 0,037%P, 0,014%S. Травлено пикратом натрия.

В пользу гипотезы о ячеистом строении расплава металла и его схожести с твердыми телами при небольшой температуре перегрева над ликвидусом, что характерно для кислородно-конвертерной плавки, свидетельствуют следующие факторы:

- незначительное изменение объема металла при плавлении;
- скрытая теплота плавления металла и изменение энтропии гораздо меньше скрытой теплоты и энтропии испарения;
- характер теплового движения в жидкости вблизи температуры плавления такой же, как и в твердом теле, о чем свидетельствуют практически одинаковые теплоемкости металлов;

- вблизи точки плавления жидкие металлы обладают упругостью на сдвиг, так же как и твердые;
- по данным рентгеноструктурного анализа расположение частиц в расплавах металлов не беспорядочное, а характерное для кристаллических тел.

Говоря о поведении кислорода в расплаве, следует отметить, что в чистом железе атомы кислорода, которые имеют малый размер, могут размещаться в пространствах между атомами железа и теоретически, без образования химического соединения FeO, могут относительно свободно перемещаться от одного атома железа к другому. Если в матрице железа присутствуют примеси, то на пути движения атомов кислорода оказываются атомы C, Si, Mn, которые образуют соответствующие элементарные соединения: C–O, O–Si–O, Mn–O, межатомные связи в которых значительно больше связи между железом и кислородом в соединении Fe–O. Поэтому атомы кислорода уже не кочуют от одного атома железа к другому, а выделяются из расплава в форме окислов CO, или в шлаковую фазу в виде включений SiO₂, MnO. Следовательно, при рассмотрении стали следует учитывать, что кислород в кристаллической решетке железа не растворяется, а присутствует в виде зерен оксидов железа FeO, Fe₂O₃ и других элементов. Это приводит к регулярности в расположении атомного окружения со средним межатомным расстоянием порядка атомного диаметра. Другими словами – каждый атом помещен в собственную ячейку. Из приведенных положений можно сделать вывод о необходимости достижения в процессе кислородно-конвертерной плавки однородного гомогенного состояния железоуглеродистого расплава для повышения качества стали.

Для оценки влияния различных вариантов и разновидностей способов производства конвертерной стали, применяемых в мировой практике, на газонасыщенность металла были проанализированы основные варианты кислородно-конвертерной плавки, в т.ч. с верхней и комбинированной продувкой (с продувкой кислородом сверху и нейтральным газом или кислородом через днище), а также способ конвертирования с использованием 100% металлолома, исследованные на 1,5-т конвертере ИЧМ. В пределах этих вариантов изучен целый ряд подвариантов, отличающихся использованием различных дутьевых устройств и способами повышения теплосодержания металла. В качестве сравнительного принимался классический вариант конвертерной плавки с продувкой кислородом только сверху в глухондонном конвертере, практически повсеместно применяемый на предприятиях Украины, (так называемый в международной практике LD-процесс) и его разновидности, отличающиеся использованием различных дутьевых устройств и теплоносителей.

Поскольку на поведение расплава в процессе кислородно-конвертерной плавки оказывают влияние много технологических и физико-химических параметров, исследование закономерностей процесса

осуществлялось как путем обработки общего массива плавов, так и путем исследования комплексных показателей каждой конкретной экспериментальной плавки. Поэтому при обработке экспериментальных данных использован метод корреляционного анализа (метод усреднения и метод наименьших квадратов), а также метод приведения показателей конкретной плавки к сопоставимым значениям. В работе использован принцип сравнения текущих концентраций содержания газов в расплаве с равновесными концентрациями. Это позволяет определить направление процесса удаления или растворения газов. Если текущие содержания газов в расплаве выше равновесных, то в принципе могут развиваться процессы, приводящие к удалению газов из расплава. Однако, вопрос о скорости протекания процесса удаления газов из расплава достаточно сложен. Можно лишь констатировать, что скорости удаления газов возрастают при дополнительном перемешивании расплавов, при возрастании величин контактных поверхностей, при снижении вязкости расплава и т.д.

Следует отметить, что для сталеплавильных процессов, отличающихся протеканием процессов далеко от равновесия, понятие равновесное состояние, используемое нами в последующем, следует понимать как установившееся равенство поступления и удаления газов из расплава.

Ранжирование (определение эффективности) технологий определяли исходя из уровня достижения минимального содержания кислорода относительно базового варианта, в качестве которого использовали технологию с верхней продувкой.

В качестве примера на рис.5 представлена зависимость содержания кислорода в металле, полученная при исследовании процесса плавки с верхней продувкой в 1,5-т конвертере лабораторной базы ИЧМ, в т.ч. по вариантам плавки с подводом к фурме и сталеплавильной ванне внешних электрических потенциалов. Из рис.5 следует, что применение электрических потенциалов при продувке кислородом конвертерной ванны способствует уменьшению содержания кислорода в расплаве по ходу продувки и особенно перед выпуском из конвертера, преимущественно в варианте с отрицательной полярностью подводимого потенциала. Это можно пояснить тем, что под влиянием электрического поля, создаваемого между фурмой и расплавом, происходит ускоренное перемещение атомов углерода, обладающих избыточным зарядом (C^{3+} или C^{4+}), к фронту взаимодействия кислорода с матрицей железа (в подфурменную зону), что способствует перераспределению использования кислорода идущего на окисление углерода. Ускорение процесса обезуглероживания металлической ванны приводит к увеличению объема газообразного CO , что усиливает интенсивность перемешивания сталеплавильной ванны с соответствующим снижением ее газонасыщенности.

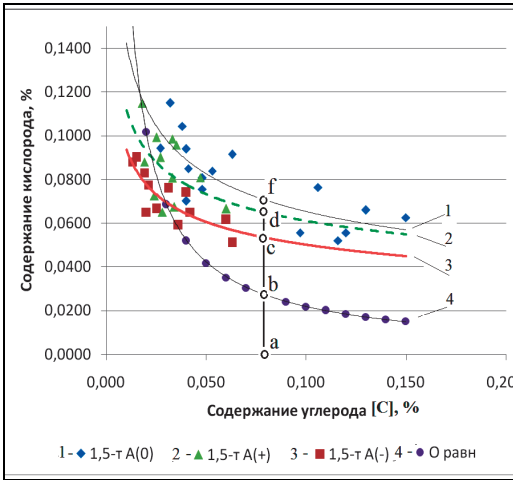


Рис.5. Содержание кислорода в металле (окисленность металла) при кислородно-конвертерном процессе (1,5-тонный конвертер ИЧМ). 1 – верхняя продувка кислородом; 2 – верхняя продувка кислородом с наложением электрических потенциалов положительной полярности; 3 – верхняя продувка кислородом с наложением электрических потенциалов отрицательной полярности; 4 – равновесная кривая Вечера-Гамильтона.

В качестве основного критерия оценки эффективности рассматриваемой технологии по уровню окисленности расплава в работе предложено использовать коэффициент K_p^O приближения к равновесному состоянию по кислороду, равный отношению фактического содержания кислорода в расплаве $[O]_ф$ к равновесному содержанию кислорода $[O]_р$ при одинаковом содержании углерода $[C]$:

$$K_p^O = [O]_ф / [O]_р \quad (\text{при одинаковом } [C]) \quad (3)$$

Коэффициент, определяющий эффективность роассматриваемой технологии по кислороду (K_T^O) рассчитывается как отношение фактического содержания кислорода в расплаве $[O]_ф$ к содержанию кислорода $[O]_Б$ при технологии, принятой в качестве базовой для сравнения.

$$K_T^O = [O]_ф / [O]_Б \quad (\text{при одинаковом } [C]) \quad (4)$$

Исходя из рис.5 коэффициент равновесности по кислороду K_p^O , при концентрации углерода в точке «а» определяется следующим образом:

- для технологии 1, как отношение фактического содержания кислорода (линия «af») к равновесному содержанию кислорода (линия «ab»), т.е. $K_p^O 1 = [O]_af / [O]_ab$; аналогично:
- для технологии 2 – $K_p^O 2 = [O]_ad / [O]_ab$;
- для технологии 3 – $K_p^O 3 = [O]_ac / [O]_ab$;

Расчет коэффициента эффективности технологии по кислороду (K_T)

для технологии 2 – $K_T^O 2 = [O]_ad / [O]_af$;

для технологии 3 – $K_T^O 3 = [O]_ac / [O]_af$;

Реакция окисления углерода, растворенного в металле, без учета целого ряда промежуточных звеньев) описывается уравнением:



Эта реакция остается ведущей до достижения остаточного содержания углерода около 0,05%. Вместе с тем, при концентрации углерода менее 0,2-0,3% быстро увеличивается доля кислорода, который расходуется на окисление железа.

Константа равновесия реакции $[C] + [O] = \{CO\}$ в общем случае определяется выражением $K_{CO} = P_{CO}/(a[C] b[O])$. При концентрациях углерода до 1%, а кислорода до 0,08% коэффициенты их активности примерно равны единице, поэтому $K_{CO} = P_{CO}/([C] \cdot [O])$. Поскольку значение теплового эффекта реакции мало, им можно пренебречь. Тогда для любой температуры:

$$K_{CO} = P_{CO}/([C] [O]) = \text{const.} \quad (6)$$

В конце сталеплавильного процесса при температуре 1600°C для открытых агрегатов ($P_{CO} = 1 \text{ кг/см}^2$) величина константы равновесия $K_{CO} = 402$, и тогда: $[C] \cdot [O] = P_{CO}/K_{CO} = P_{CO}/402 = 0,0025P_{CO} = 0,0025$. Это выражение известно как константа равновесия Вечера-Гамильтона.

В.И.Явойский [5] на основании обобщения многочисленных лабораторных и промышленных исследований равновесного состояния кислорода представил произведение $[O] \cdot [C]$ в виде выражения:

$[O] \cdot [C] = a + b[C]$, а зависимость равновесного количества растворенного кислорода в расплаве в виде выражения:

$[O]_p = 0,0029/[C]_p + 0,0031$. Проведенный нами анализ показал (рис.6), что предложенные зависимости имеют схожий характер, несколько различаясь по уровню конкретных значений содержания кислорода, причем равновесные значения по уравнению В.И. Явойского выше, чем по уравнению Вечера-Гамельтона.

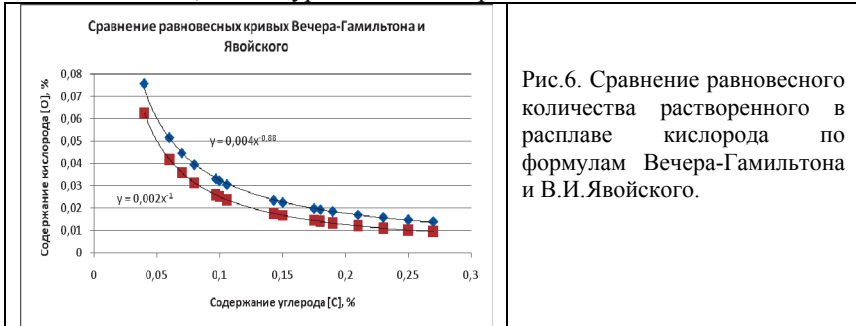


Рис.6. Сравнение равновесного количества растворенного в расплаве кислорода по формулам Вечера-Гамильтона и В.И.Явойского.

Произведение $[O] \cdot [C]$ несмотря на достаточно широкое применение для теоретического анализа, пока не имеет сформулированного физического смысла. Попытаемся придать этому произведению физический смысл, исходя из ячеистой модели жидкого Fe-C расплава. Предложенная модель представляет жидкость как совокупность отдельных энергетически не связанных между собой группировок атомов и молекул железа (объединенных в кластеры), в составе которых находится углерод. Взаи-

модействие кислорода дутья с железом и углеродом может происходить только по поверхности таких группировок (поверхность кластера F_k). На границе которых происходит контакт кислорода с железо-углеродистым расплавом. Тогда количество кислорода, растворенного в расплаве, определится как $[O]*F_k$, а объем кластера можно определить как $[O]*F_k*[C]$. Иными словами, произведение $[O]*[C]$ представляет элементарную группировку Fe-C расплава, в которой содержится определенное количество углерода [C]. Таким образом, это произведение характеризует удельную величину степени насыщения кислородом отдельной группировки или всего объема Fe-C расплава, следовательно, уместно построить график зависимости этого произведения $[O]*[C]$ от содержания углерода (рис.7).

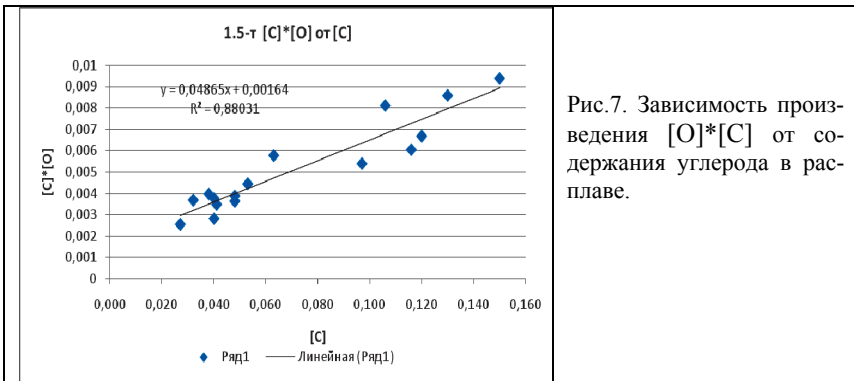


Рис.7. Зависимость произведения $[O]*[C]$ от содержания углерода в расплаве.

Практически для всех сталеплавильных процессов зависимость произведения $[O]*[C]$ от содержания углерода в расплаве представляет собой прямую линию, которую удобно использовать для оценки эффективности той или иной технологии сталеплавильного производства.

При проведении анализа установлено, что подобные зависимости (рис.8) для различных технологий кислородно-конвертерной плавки в интервале содержаний углерода 0,02–1,5% имеют прямолинейный характер, а выше 1,5% окисленность расплава не зависит от содержания углерода в расплаве. Объяснить наличие прямолинейной зависимости произведения $[O]*[C]$ от [C] можно, исходя из анализа подобия соотношений объема тела и его поверхности. В этом случае произведение $[O]*[C]$ отражает как бы объем локальной группировки молекул железа в жидкости, причем величина содержания кислорода в металле [O] в этом произведении характеризует площадь поверхности группировки, по которой происходит контакт реагирующих фаз, являясь отражением поверхностно-активных свойств атомов кислорода.

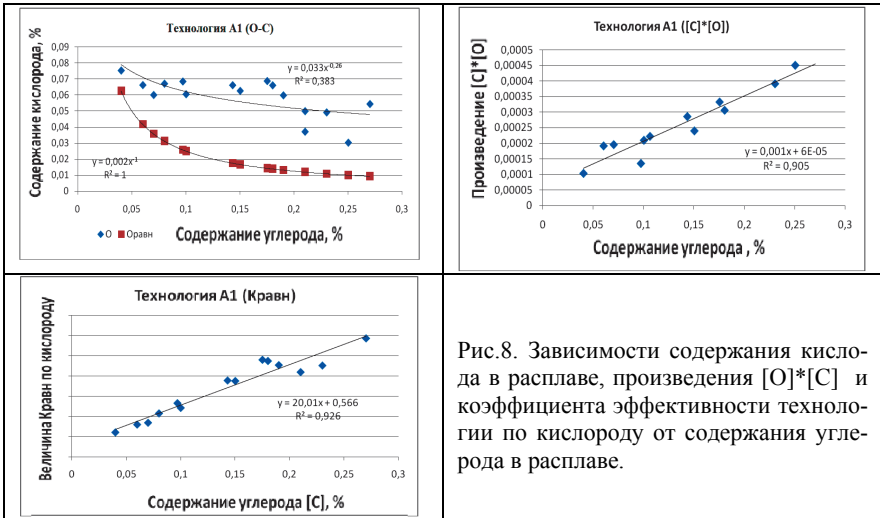


Рис.8. Зависимости содержания кислорода в расплаве, произведения $[O]*[C]$ и коэффициента эффективности технологии по кислороду от содержания углерода в расплаве.

Использование такого подхода позволяет провести ранжирование различных вариантов технологии с точки зрения получения минимального содержания кислорода в расплаве. На рис.9 в качестве примера приведены значения коэффициента равновесности по кислороду для технологий, предусматривающих верхнюю продувку кислородом.



Рис.9. Эффективность технологий различных вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней продувкой по коэффициенту $K_{\text{O}_P}^{\text{O}}$ (достижение минимально возможных содержаний кислорода в расплаве). Расшифровка вариантов технологии приведена в табл.1.

Приведенные на рис.9 данные свидетельствуют о том, что из числа представленных технологических вариантов наиболее близкое к равновесному состоянию расплава по содержанию кислорода достигается при верхней продувке с использованием двухъярусных фурм. На рис.10 приведены значения коэффициента равновесности по кислороду для ряда

технологий с комбинированной продувкой, основанных на подаче кислорода сверху и снизу по вариантам В11–В17.

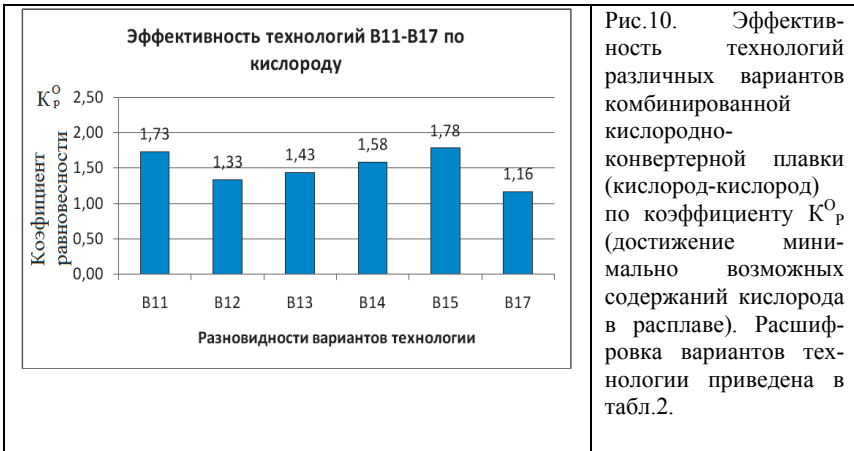


Рис.10. Эффективность различных вариантов комбинированной кислородно-конвертерной плавки (кислород-кислород) по коэффициенту $K_p^{O_2}$ (достижение минимально возможных содержаний кислорода в расплаве). Расшифровка вариантов технологии приведена в табл.2.

Таблица 1. Характеристика вариантов исследованных технологий с верхней продувкой

Шифр	Наименование
A1	Продувка кислородом сверху
A1a01	Продувка кислородом сверху через двухъярусную фурму при высоте второго яруса 200 мм
A1a02	То же с расположением второго яруса на высоте 380-400 мм
A2г	Продувка кислородом сверху с вводом в завалку кускового угля
A3	Продувка кислородом сверху с вдуванием через верхнюю фурму угольного порошка
A4г	То же с вдуванием через верхнюю фурму пыли УСТК
A5г	То же с вдуванием через верхнюю фурму полукокса
A6г	То же с вдуванием через верхнюю фурму термоугля
A7г	То же с вдуванием через верхнюю фурму тощего угля (марки Т)

Таблица 2. Характеристика вариантов исследованных технологий комбинированной продувки (кислород-кислород)

Шифр	Наименование
В11	Комбинированная продувка с подачей кислорода сверху и через днище
В12	То же с вводом в завалку конвертера кускового угля
В13г	Комбинированная продувка кислородом сверху и снизу с подачей через донные кислородные фурмы угольного порошка
В14г	Комбинированная продувка кислородом сверху и подогревом лома кусковым углем

В15т	Комбинированная продувка кислородом сверху и снизу с подогревом лома угольным порошком, вдуваемым через донные кислородные фурмы
В17т	Комбинированная продувка с использованием в шихте 100% металлолома (без жидкого чугуна) с подачей кислорода сверху и снизу и подогревом лома угольным порошком, вдуваемым через донные кислородные фурмы и последующим его вдуванием через фурмы в жидкую ванну

Заключение.

В результате проведенного исследования:

1. Выявлено влияние различных вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней и комбинированной продувкой на показатели окисленности металла, что позволяет определять эффективные области их возможного применения.

2. Предложена гипотеза о структурном составе жидкого металла, основанная на химическом составе и температуре расплава. Показана необходимость учета структурного состава расплава при анализе влияния технологических параметров кислородно-конвертерной плавки.

3. Показана возможность использования методики приведения экспериментальных данных к сопоставимым показателям при анализе зависимости фактического содержания кислорода от содержания углерода.

4. Выполнено сопоставление эффективности различных технологий и вариантов кислородно-конвертерной плавки по уровню достижения минимального содержания кислорода в стали.

5. Отмечено, что уменьшению содержания кислорода в жидкой стали в процессе кислородно-конвертерной плавки способствуют: комбинированная продувка (дополнительное перемешивание реагирующих фаз, гомогенизация расплава), использование двухъярусных фурм, применение внешних электрических воздействий.

1. *Akihiko K., Koin I., Kokichis S.* The stability of oxygen in δ -iron. / Trans Iron and steel inst. Jap. – 1970–10, №2. *Ziegler M.A.* / Trans. ASST-1932-v.20 – p.73-83.
2. *Григорович В.К.* Электронное строение и термодинамика сплавов железа. – Наука – М. – 1971 – 292с.
3. *Явойский В.И.* Газы и включения в стальном слитке // М.-Металлургиздат, 1955. – 247с.
4. *Металлургия стали* /В.И.Явойский, С.Л.Левин, В.И.Бабтизманский и др. – М.:Металлургия, 1973. – 816.с (с.46).
5. *Abbaschian R., Abbaschian L., Robert E. Reed-Hill.* Physical Metallurgy Principles, Fourth Edition. – Printed in the United States of America. – Cengage Learning, 2009. –750 с.
6. *В.И.Явойский.* Теория процессов производства стали. – М.:Госнаучтехиздат, 1963. – 820 с.

7. *Борнацкий И.И.* Физико-химические основы сталеплавильных процессов – М.:Металлургия, 1974. – 320 с.
8. *Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх, И.Л.* Теория продувки сталеплавильной ванны.– М.:Металлургия, 1974. – 496 с.
9. *Металлургия стали.* / В.И.Явойский, Ю.В.Кряковский, В.П.Григорьев и др. – М.:Металлургия, 1983. – 584 с.
10. *Кудрин В.А.* Металлургия стали. – М.:Металлургия, 1989. – 560 с.
11. *Лучкин В.С., Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Квазикристаллическая ячеечная модель жидкого расплава и диаграмма Fe-C состояния. // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.23. – 2011. – С.259-266.
12. *Лучкин В.С., Поляков В.Ф., Семькин С.И., Борисенко А.Ю., Тубольцев Л.Г.* Исследование структуры жидкой стали закалочно-микроструктурным методом //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.24. – 2011. – С.145-156.

*Статья рекомендована к печати
профес., докт.техн.наук Д.Н.Тогобицкой*

Л.Г.Тубольцев, В.П.Корченко, С.І.Семикін, Н.І.Падун, Я.А.Полякова

Вплив варіантів технології киснево-конвертерного плавки на вміст кисню в залізовуглецевому розплаві

Вивчено вміст кисню в розплаві при киснево-конвертерної плавки з верхньої і комбінованою продувкою .. Висунуто і обгрунтовано гіпотезу щодо структурного складу рідкого металу. Показано можливість уточнення залежності вмісту кисню від вмісту вуглецю в залізовуглецевих розплаві шляхом використання методики приведення експериментальних-тальних даних до порівнянних показників. Відзначено, що зменшенню вмісту кисню в рідкій сталі в процесі киснево-конвертерної плавки сприяють: комбіноване продування (додаткове перемішування реагуючих фаз, гомогенізація розплаву), використання двоярусних фурм, застосування зовнішнього електричного впливу.

Ключові слова: киснево-конвертерна плавка, варіант технології, розплав, вміст кисню, експериментальні дані

L. G. Tuboltsev, V. P. Korchenko, S. I. Semykin, N. I. Padun, Ya. A. Polyakova

Influence of technology options of smelting oxygen content in the iron-carbon melt

Studied the oxygen content of the melt at BOF melting from the top and combined blowing .. proposed and substantiated the hypothesis about the structural composition of the molten metal. The possibility of more accurate depending on the oxygen content of the carbon content in the iron-carbon melt in the case method to bring experiments, the experimental data for comparable indicators. It is noted that the reduction of the oxygen content in the molten steel in the BOF promotes fusion: combined purge (additional mixing of the reacting phases, homogenization of the melt) using tuyeres bunk applying external electrical influences.

Keywords: BOF melting, technology option, the melt, the oxygen content, the experimental data