

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ХОХЛОВ Анатолий Васильевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКИСЛЕНИЯ
КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКИСЛЕННОСТИ МЕТАЛЛА

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1982

Работа выполнена на кафедре металлургии стали Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола и в кислородно-конвертерном цехе Челябинского металлургического завода.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии СССР и премии Совета Министров СССР, доктор технических наук, профессор Д.Я.Поволоцкий.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент О.К.Токовой.


Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор А.М.Бигеев;
кандидат технических наук, доцент Г.Н.Еланский.

Ведущее предприятие - Череповецкий ордена Ленина металлургический завод.

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1983 г. на заседании специализированного совета К-053.13.03 Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола по адресу: 454044, г.Челябинск, проспект им.В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Автореферат разослан "_____" _____ 1983 г.

Ученый секретарь совета
кандидат технических наук,
доцент

 О.К.Токовой



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение эффективности использования оборудования в процессе производства стали и улучшение качества металла может быть достигнуто совершенствованием и развитием новых средств контроля металлургических процессов. Одним из таких средств является возникший сравнительно недавно способ определения активности кислорода методом э.д.с. непосредственно в металлургическом агрегате. Полученная с использованием этого способа информация об окисленности металла может быть полезной как средство настройки и отработки технологических процессов. Наиболее актуальным может быть применение его в текущем производстве в качестве инструмента контроля плавки при управлении такими металлургическими процессами, которые должны проводиться в течение короткого промежутка времени при непостоянной исходной окисленности металла, как это имеет место при кислородно-конвертерном процессе.

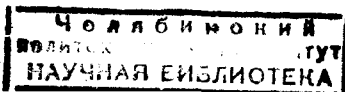
Цели работы.

1. Совершенствование технологии раскисления кипящей стали на основе информации об активности кислорода. Установление связи качества кипящего слитка с содержанием растворенного в ней кислорода.

2. Разработка способа управления процессом раскисления и легирования стали на основе данных об окисленности металла. Создание математической модели, а также проверка адекватности ее реальному процессу в лабораторных и промышленных условиях.

3. Исследование окисленности и условий раскисления низколегированной конвертерной стали. Изучение состава и свойств образующихся неметаллических включений, угара и распределения раскислителей и легирующих, вводимых в ковш.

Научная новизна. Исследована окисленность кипящей и низколегированной стали последовательно на разных этапах ее производства (в конвертере, сталеразливочном ковше и в изложнице). Изучены размер, форма, состав, а также распределение неметаллических включений и легирующих элементов по глубине ковша и по ходу разливки низколегированных сталей, легированных в ковше



твердыми ферросплавами и жидкими лигатурами. Установлена связь между качеством слитка и листа кипящей стали с активностью кислорода в металле. Предложена и экспериментально проверена математическая модель кристаллизации периферийной зоны кипящего слитка. Разработана и проверена в лабораторных и промышленных условиях математическая модель раскисления и легирования стали на основе информации об окисленности стали перед раскислением.

Практическая ценность. Показана возможность использования информации об активности кислорода в металле для настройки, отработки, а также управления процессом раскисления кислородно конвертерной стали.

На основании результатов исследований приняты дополнения к технологической инструкции в конвертерном цехе Челябинского металлургического завода (ЧМЗ). Внедрение полученных рекомендаций позволило получить экономический эффект свыше 116 тыс. руб. в год.

Публикации и апробация работ. По результатам исследований опубликовано 11 статей. Материалы диссертации доложены на II Всесоюзной конференции "Тепло- и массообмен в ваннах сталеплавильных агрегатов" (1976 г., г. Жданов), на VI Всесоюзной научно-технической конференции "Теория и практика кислородно-конвертерных процессов" (1981 г., г. Днепропетровск), на Всесоюзном симпозиуме "Твердые электролиты и их аналитическое применение" (1981 г., г. Ангарск), на III областной научно-технической конференции молодых специалистов и ученых предприятий и организаций черной металлургии (1976 г., г. Челябинск), на XXIX-XXXIII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1976-1980 г.г., г. Челябинск).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и приложений. Изложена на 241 странице машинописного текста, включая 62 рисунка, 10 таблиц, 18 приложений и содержит библиографию из 153 наименований.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ И УСЛОВИЙ РАСКИСЛЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

I. I. Совершенствование конструкции датчика определения активности кислорода в жидкой стали

При выполнении работы основным инструментом исследования окисленности металла на разных этапах сталеплавильного периода был малоинерционный активометр. В комплексе работ, выполняемых кафедрой металлургии стали ЧПИ совместно с ВНИИЧерМет, УкрНИИО и ВостИО по созданию малоинерционного датчика для дискретных измерений активности кислорода одна из главных задач заключалась в подборе твердого электролита. В работе представлены результаты изучения керамических и электрических свойств корундовых электролитов разного состава, выполненных в форме колпачков наружным диаметром 10 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 100 мм. Исследования показали относительно высокую термостойкость корундовых электролитов в отличие от изделий из диоксида циркония и оксида магния. В тоже время, основным требованием к твердому электролиту наряду с термостойкостью является максимальная и стабильная доля ионной проводимости при температурах сталеплавильных процессов. Лабораторные и промышленные испытания на термостойкость и воспроизводимость показаний позволяли заключить, что даже лучшие партии изделий на основе Al_2O_3 не удовлетворяют требованиям из-за довольно высокой погрешности измерений, связанной с различной долей ионной проводимости электролитов.

В основу усовершенствованной конструкции активометра был положен широко используемый термоэлектрический термометр со сменным блоком типа ТТСБ (в дальнейшем ТТР-2075). В качестве твердого электролита применяли стабилизированный диоксид циркония в виде цилиндра диаметром 3 и высотой 7 мм производства УкрНИИО. Электродом сравнения служила смесь, состоящая из металлического хрома и его оксида. Чувствительные элементы активометра защищали металлическим колпачком, предохранявшим их от механических повреждений и налипания шлака. Для увеличения стойкости картонного блока, в который закрепляли датчик, разрабатывали и изготовили керамические оболочки. Опробование данной

конструкции в промышленных условиях показало возможность ее использования при контроле окисленности металла в широком интервале концентраций кислорода.

1.2. Исследование производства сталей 16ГС, 35ГС, 16Г2САФ, 12Г2АВФ и 06Г2НАБ

Продувку металла в конвертере осуществляли по принятой в цехе технологии. Изучали сталь марок 16ГС и 35ГС, раскисленную и легированную в ковше твердыми ферросплавами, и 16Г2САФ, 12Г2АВФ и 06Г2НАБ – жидкими лигатурами, которые выплавляли в индукционной печи, и азотированным марганцем в твердом виде. На опытных плавках проводили отбор проб из конвертера на повалке, перед выпуском плавки в ковш, из сталеразливочного ковша с трех горизонтов и по ходу разливки. На повалке конвертера и в ковше измеряли температуру и окисленность жидкой стали.

Раскисление и легирование стали марок 16ГС и 35ГС проводили по двум вариантам:

1. Все ферросплавы и алюминий присаживали под струю при сливе металла из конвертера в ковш.

2. Все ферросплавы, кроме алюминия, присаживали под струю при сливе металла из конвертера в ковш, а затем, после выпуска плавки, на штанге вводили алюминий. В этом случае, через 2-3 мин после выпуска плавки в ковш погружали активометр и измеряли активность кислорода, отбирали пробн. Затем, не извлекая из металла активометра, сталь раскисляли алюминием, фиксировали изменение активности кислорода во времени и отбирали пробы металла.

По ходу разливки, из-под струи, после наполнения первого, пятого и последнего слитка наливали пробы металла.

Исследование окисленности сталей 16ГС и 35ГС методом в.д.с. показало, что для металла, находящегося в конвертере, характерна повышенная, по сравнению с равновесной, активность кислорода. Средняя величина произведения $[\% \text{C}] \cdot a_{\text{O}}$ составила 0,0042 и изменялась для разных плавков от 0,0024 до 0,0066. При раскислении сталей 35ГС и 16ГС кремнием и марганцем активность кислорода в металле уменьшалась с 0,011-0,060 в конвертере до

0,0016-0,0055 в ковше. После присадки алюминия происходило дальнейшее понижение активности кислорода. Раскисление алюминием завершалось через 20-30 с и активность кислорода понижалась до 0,0007-0,0010.

После введения алюминия уменьшалась не только активность, но и концентрация кислорода, определенная методом вакуум-плавления (с 0,011-0,040 до 0,005-0,020%), что связано с удалением из стали продуктов раскисления.

Изучение распределения основных элементов в сталях 35ГС и 16ГС по глубине ковша и по ходу разливки позволяет заключить, что эти элементы довольно равномерно распределены в ковше, хотя различие в содержании кислорода перед раскислением не могло не оказать влияния на равномерность распределения и угар легирующих элементов (в частности кремния) и состав продуктов раскисления. На передутых плавках, имеющих повышенную окисленность металла и шлака, угар кремния возрастал с 14,0-19,2% до 23,6-24,4%; на таких плавках наблюдали некоторое уменьшение концентрации кремния в последних по порядку наполнения слитков.

Введение одинакового количества алюминия (0,25 кг/т для стали 35ГС) без учета фактической окисленности приводит к повышенному угару кремния, недостаточно глубокому раскислению и формированию в металле с высокой исходной окисленностью, главным образом, силикатных глобулей. В тоже время, на плавках с нормальной исходной окисленностью, оксидные неметаллические включения представлены, в основном, корундом. Использование экспрессной информации об активности кислорода перед раскислением позволяет прогнозировать угар легирующих и получать сталь с узкими пределами их содержания.

Данные опытных плавков показали, что распределение основных элементов в ковше и по ходу разливки сталей 16Г2САФ, 12Г2АВФ и 06Г2НАБ довольно равномерное, находится в пределах погрешности химического анализа, за исключением марганца, разница в содержании которого достигала 0,2-0,3%. Это обстоятельство, вероятно, связано с большим количеством (15-17 кг/т) азотированного марганца, присаживаемого в твердом виде, недостаточным перемешиванием и усреднением состава металла. В работе выполнено ис-

следование неметаллической фазы, образующейся при раскислении конвертерной легированной стали. Методами металлографии и петрографии изучен состав и свойства образующихся неметаллических включений, а также изменение их количества, состава и размеров в процессе выдержки стали в ковше и разливки по изложницам.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКИСЛЕНИЯ КИПЯЩЕЙ СТАЛИ

Исследовали производство кипящей стали марок I-Зкп, выплаваемой в кислородных конвертерах. Выплавку металла производили по принятой в цехе технологии с раскислением ферромарганцем в ковше. Разливку осуществляли в уширенные книзу изложницы на слитки массой 13,2 т, которые закупоривали ферросилицием.

На цовалке конвертера, перед выпуском, отбирали пробу металла, определяли температуру и активность кислорода в стали. Дальнейшее изучение металла проводили в ковше, в котором измеряли температуру и активность кислорода и отбирали пробу. Аналогичные измерения и отбор проб осуществляли в изложнице, сразу же после отливки пятого или шестого слитков. Слитки, при отливке которых определяли активность кислорода, выделяли и вырезали угловые темплеты, на которых определяли толщину плотной наружной корочки.

Определение окисленности кипящей стали методом э.д.с. показало тесную связь между содержанием углерода и активностью кислорода. Она характеризуется следующими уравнениями, коэффициентами корреляции (r) и надежности связи (μ):

$$\alpha_o = -0,0029 + \frac{0,0033}{[\%C]} ; \quad r = 0,84; \quad \mu = 7,86$$

в сталеразливочном ковше, при раскислении ферромарганцем:

$$\alpha_o = -0,0028 + \frac{0,0023}{[\%C]} ; \quad r = 0,095; \quad \mu = 11,8$$

в изложнице, при раскислении ферромарганцем

$$\alpha_o = -0,0014 + \frac{0,0019}{[\%C]} ; \quad r = 0,83; \quad \mu = 5,85.$$

Однако, при сохранении постоянства производства содержания углерода на активность кислорода, в процессе производства ва-

личина его существенно изменяется по отношению к равновесной, рассчитанной для металла в конвертере, ковше и изложнице, соответственно, при температурах 1600, 1550 и 1510°C и $P_{Co} = 1,013 \cdot 10^5$ Па. Для металла, находящегося в конвертере, произведение $[\%C] \cdot a_o$ выше равновесного, а в изложнице и ковше - несколько ниже.

Полученные результаты отличаются от данных других исследователей, согласно которым содержание кислорода в металле, находящемся в ковше или в изложнице близко к равновесному или превышает его. Такое отличие можно объяснить различными методиками определения кислорода в стали, так как большинство исследователей определяли суммарное содержание кислорода, как растворенное, так и связанное во включения.

Присадки алюминия в ковш даже в небольших количествах (35-105 г/т) приводят к резкому уменьшению величины активности кислорода и величина $[\%C] \cdot a_o$ снижается до 0,0015 - менее 0,0010. Аналогичное явление наблюдали при раскислении кипящей стали алюминием в изложнице.

Так как качество слитка кипящей стали во многом определяется толщиной плотной наружной корочки, предохраняющей сотовые пузыри от вскрытия при нагреве слитка перед прокаткой и во время прокатки, то в работе исследовали природу и трансформацию дефектов кипящей стали СтЗкп при прокатке слитка массой 13,2 т на слябы, размерами 5600x1050x170 мм, а в дальнейшем на лист толщиной 20 и 2 мм.

В макроструктуре сляб изученного металла наблюдали незаварившиеся поры - остатки сотовых пузырей. Наряду с порами, не имеющими сообщения с поверхностью, на глубине 2-3 мм встречали пузыри, выходящие на поверхность сляба.

В листе толщиной 20 мм дефекты поверхности представляли собой раскрывшиеся сотовые пузыри, залегающие на глубине 0,35-0,45 мм и расположенные под углом к поверхности. В зоне дефекта наблюдали обезуглероживание и окисление металла. Изучение под микроскопом дефектом листа, толщиной 2 мм показало, что они представляют собой округлые лунки глубиной 0,2-0,3 мм со следами окалина. Есть основания полагать, что эти дефекты - остатки не-

заварившихся сотовых пузырей, вышедших на поверхность металла. Таким образом, исследование макроструктуры металла стали СтЗкп показало наследственную связь между вышедшими на поверхность и незаварившимися сотовыми пузырями и дефектами поверхности листа.

Сопоставление толщины плотной наружной корочки кипящих слитков с величиной произведения концентрации углерода на активность кислорода в металле, залитом в изложницу, позволило установить, что избыток или недостаток кислорода в кипящей стали определяет интенсивность ее кипения и, следовательно, толщину коркового слоя.

Как было установлено в настоящем исследовании, активность кислорода в кипящей стали, залитой в изложницу, ниже равновесной с углеродом. Это обстоятельство не позволяет описать формирование плотной наружной корочки слитка на основе объемных концентраций этих элементов. Очевидно, что для этого необходимо учитывать ликвационные процессы, имеющие место при формировании периферийной зоны кипящего слитка. Полагая, что образование и рост пузырей CO происходит на фронте кристаллизации в ликвационном слое, обогащенном кремнием ($[Si]'$), марганцем ($[Mn]'$), кислородом ($[O]'$) и углеродом ($[C]'$). Содержание этих элементов в обогащенном слое превышает их объемные концентрации в расплаве ($[Si], [Mn], [O]$ и $[C]$). Содержание примесей в ликвационном слое может быть рассчитано по уравнению

$$C_L = \frac{C_p}{k + (1-k) \exp\left(-\frac{Wd^2}{D}\right)} \quad (1)$$

Образование и рост пузырей CO происходит за счет взаимодействия углерода и кислорода в диффузионном пограничном слое, при этом содержание марганца и кремния в стали оказывает влияние на этот процесс, так как содержание растворенного кислорода не может быть больше равновесного с этими элементами.

Всплывание пузырей CO может происходить, если скорость их роста превышает скорость кристаллизации слитка (W)

$$v\left(\frac{dr}{dt}\right) > W. \quad (2)$$

Массу продиффундировавших кислорода и углерода можно определить из уравнений массопереноса:

$$dM_o = \frac{D_o}{\delta} ([O]' - [O]_p) F dt, \quad (3)$$

$$dM_c = \frac{D_c}{\delta} ([C]' - [C]_p) F dt, \quad (4)$$

полагая, при этом, что на поверхности раздела пузырьки окиси углерода - металл между углеродом и кислородом устанавливается термодинамическое равновесие.

Сумма продиффундировавшего вещества в соответствии с реакцией $[C] + [O] = CO_r$ и учетом атомных весов компонентов:

$$dM_{\Sigma} = dM_o + dM_c = dM_o + \frac{12}{16} dM_o = \frac{7}{4} dM_o = \frac{7 D_o}{4 \delta} ([O]' - [O]_p) F dt \quad (5)$$

или в молях:

$$dn = \frac{dM_{\Sigma}}{\mu} = \frac{7 D_o}{4 \mu \delta} ([O]' - [O]_p) F dt. \quad (6)$$

Используя уравнение Клайперова-Менделеева и переходя от объемных единиц к линейным,

$$\frac{dz}{dt} = \frac{7 RT D_o F}{4 \rho S \delta \mu} ([O]' - [O]_p) \quad (7)$$

получим условия всплывания газового пузыря:

$$2 \frac{dz}{dt} = 2 \frac{7 RT D_o F}{4 \rho S \delta \mu} ([O]' - [O]_p) \geq W, \quad (8)$$

С учетом $[O]_p = \frac{m_c \rho_{CO}}{[C]'}$ и $\rho_{CO} = 1 + \rho g h + 2 \frac{\sigma}{r}$. ур.8
примет вид:

$$2 \frac{dz}{dt} = \frac{7 RT F D_o}{2 (1 + \rho g h + \frac{2\sigma}{r}) S \delta \mu} \left[[O]' - \frac{m_c (1 + \rho g h + \frac{2\sigma}{r})}{[C]'} \right] \geq W. \quad (9)$$

Из ур. (9) вытекает, что скорость роста пузырей CO определяется содержанием растворенного кислорода в диффузионном слое и величиной гидростатического давления.

Решим ур. (9) относительно h :

$$h \leq \frac{1}{\rho g} \left(\frac{A [O]'}{W + \frac{A \cdot m_c}{[C]'}} - B \right), \quad (10)$$

где $A = \frac{7}{2} \frac{RT D_o F}{S \delta \mu}$; $B = 1 + \frac{2\sigma}{r}$;

Ур. (10) показывает максимальную высоту столба металла над каким-нибудь из горизонтов слитка, на котором возможен рост и удаление пузырей окиси углерода, причем эта величина зависит от содержания кислорода в диффузионном слое. Содержание кислорода в диффузионном слое, в свою очередь, можно рассчитать из объемной концентрации, определенной, например, методом э.д.с.

Величина столба металла (h) зависит от скорости наполнения изложницы (v) и времени (τ):

$$h = v\tau, \quad (11)$$

Толщина закристаллизовавшегося слоя слитка (Δ):

$$\Delta = W\tau. \quad (12)$$

Решив совместно ур. (10), (11) и (12), получим уравнение для расчета толщины плотной наружной корочки кипящего слитка:

$$\Delta \leq \frac{hW}{v} \leq \frac{W}{v\rho g} \left(\frac{A [O]'}{W + \frac{A \cdot m_c}{[C]'}} - B \right). \quad (13)$$

В ур. (1-13) приняты следующие обозначения: C_L и C_P - содержание элементов, соответственно, в диффузионном слое и в слитке; K - коэффициент распределения; D_o и D_c - коэффициенты диффузии, соответственно, кислорода и углерода; δ - толщина диффузионного слоя; F - поверхность раздела; μ - молекулярный вес окиси углерода; S - площадь шара; T - температура; R - универсальная газовая постоянная; P - давление выделения окиси углерода; ρ - плотность стали.

Данные 28 опытных плавов, проведенных с определением толщины плотной наружной корочки на угловых темплетях подставляли в ур. (13) и полученные расчетные величины сравнивали с фактическими. Установлено, что разработанная модель, несмотря на определенные допущения, удовлетворительно описывает процесс (среднее относительное отклонение расчетных значений от определенных экспериментально составило 14,6%) и может служить основой для создания алгоритма управления процессом кристаллизации кипящей стали с целью получения достаточной толщины плотной наружной корочки).

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РАСКИСЛЕНИЯ СТАЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЕГО ОПТИМИЗАЦИИ

Задача управления процессом раскисления сводится к правильному учету потерь присаживаемых в сталь раскислителей и легирующих элементов с целью получения в металле этих компонентов в достаточно узких пределах.

В основу расчета количества присаживаемых в металл элементов-раскислителей положена информация об окисленности металла перед раскислением. Общее количество элемента-раскислителя на плавку (Q_{Σ}) можно разделить на необходимое для связывания кислорода ($Q_{\text{угар}}$) и растворившегося в металле (Q):

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{угар}} + Q. \quad (14)$$

Взаимодействие раскислителя (R) с кислородом протекает по реакции:



где n и m — стехиометрические коэффициенты реакции.

В предлагаемой модели принято, что в результате реакции образуется чистый оксид ($R_n O_m$) в виде отдельной фазы и его активность равна 1, а концентрация кислорода в стали близка к равновесной с растворенным в металле элементом-раскислителем. Такое допущение может быть оправдано в случае раскисления металла одним элементом.

Константа равновесия реакции (15) определяется:

$$\lg K = \lg \frac{a_{R_n O_m}}{a_R^n \cdot a_O^m} = \lg \frac{a_{R_n O_m}}{([R]f_R)^n ([O]f_O)^m} = \frac{A}{T} + B, \quad (16)$$

где f_R и f_O - коэффициенты активности.

Содержание кислорода, равновесное с содержанием элемента-раскислителя:

$$[O] = \frac{a_O}{f_O} = \frac{\sqrt[m]{\frac{a_{R_n O_m}}{([R]f_R)^n \cdot 10^{\frac{A}{T} + B}}}}{f_O}. \quad (17)$$

Масса кислорода, израсходованного на взаимодействие с элементом-раскислителем:

$$M_0 = \frac{M}{100\%} \left(\frac{a_O^*}{f_O^*} - [O] + C_0 \right). \quad (18)$$

Учитывая атомные массы участвующих в реакции (14) компонентов (A_R и A_O), с учетом ур. (17) можно определить количество окислившегося раскислителя:

$$\theta_{\text{угар}} = \frac{M \cdot n A_R}{100\% \cdot m A_O} \left(\frac{a_O^*}{f_O^*} - \frac{\sqrt[m]{\frac{a_{R_n O_m}}{([R]f_R)^n \cdot 10^{\frac{A}{T} + B}}}}{f_O} + C_0 \right). \quad (19)$$

Количество раскислителя, необходимое для доведения металла до заданного химического состава:

$$Q = M \frac{[R] - [R_0]}{100\%}. \quad (20)$$

Подставив ур. (19) и ур. (20) в ур. (14) и учитывая концентрацию элемента-раскислителя в ферросплаве $[R^*]$ окончательно получим:

$$Q_{\Sigma} = \frac{M}{[R^*]} \left[\frac{n A_R}{m A_O} \left(\frac{a_O^*}{f_O^*} - \frac{\sqrt[m]{\frac{a_{R_n O_m}}{([R]f_R)^n \cdot 10^{\frac{A}{T} + B}}}}{f_O} + C_0 \right) + [R] - [R_0] \right]. \quad (21)$$

Таким образом, измерив перед раскислением температуру металла, активность кислорода в металле методом э.д.с., учитывая содержание элемента-раскислителя в нем перед раскислением и концентрацию раскислителя в ферросплаве, предварительно рассчитав или экспериментально определив некоторые постоянные величины и задавшись в соответствии с выплавляемой маркой стали требуемой концентрацией вводимого в металл элемента-раскислителя, можно определить оптимальный расход ферросплава на плавку.

Оценку точности предложенной модели производили методом замены приращения функции ее дифференциалом. Для этого ур. (21), решенное относительно заданного элемента-раскислителя в стали, продифференцировали по всем переменным. Расчет показал, что максимальное абсолютное отклонение от заданного содержания марганца (0,36%) в кипящей стали и кремния (3,05%) в электротехнической не превышает, соответственно, 0,06% (абс.) и 0,08% (абс.).

Проверку модели проводили в лабораторных и промышленных условиях в два этапа. На первом этапе - в режиме прогнозирования содержания элемента-раскислителя, на втором - в режиме управления процессом раскисления.

Результаты лабораторных и промышленных испытаний модели показали, что прогнозируемое содержание раскислителя в стали достаточно хорошо соответствует фактической концентрации. В промышленной серии плавов максимальная величина отклонений фактической концентрации марганца в кипящей стали от расчетной в 90% опытных плавов не превышала 0,03% (абс.) или 8% (отн.), а средняя величина отклонения от расчетных составила 0,014% (абс.) или 4% (отн.). Максимальная величина отклонений фактической концентрации кремния в электротехнической стали в 80% случаев не превышала 0,05% (абс.) или 1,5% (отн.), а средняя величина отклонений от расчетных составила 0,031% (абс.) или 1,0% (отн.).

Для реализации модели в режиме управления процессом раскисления был разработан алгоритм и создана программа расчета для ЭВМ М-6000. Результаты опытов с расчетом количества раскислителя на ЭВМ показали, что 85% плавов кипящей стали укладывается в интервал по содержанию марганца $0,36 \pm 0,04\%$. Среднее содержание марганца в кипящей стали составило 0,37% при расчете на

0399637

0,36%. Доверительный интервал для надежности 0,90 и 0,99, соответственно, $\pm 0,01\%$ и 0,016%. При раскислении и легировании электротехнической стали кремнием, среднее фактическое содержание кремния при заданном, равном 3,05% составило $3,02 \pm 0,011\%$ и $3,02 \pm 0,018\%$ для надежности, соответственно, 0,90 и 0,99.

Опробование разработанной модели в производственных условиях показало, что она удовлетворительно описывает процесс и может быть использована для оптимизации процесса раскисления кипящей стали марганцем и легирования электротехнической стали кремнием.

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствована конструкция малоинерционного активометра для кратковременного разового определения активности кислорода в стали методом э.д.с.

2. Изучено изменение активности и общего содержания кислорода в процессе раскисления и легирования кислородно-конвертерных сталей 16ГС и 35ГС. Показано, что в процессе раскисления и легирования кремнием и марганцем, раскисления алюминием происходит интенсивное понижение активности кислорода в стали, которое завершается в течение до 20-30 с. Понижение общего содержания кислорода происходит в меньшей степени и значительно медленнее вследствие постепенного удаления оксидных включений; оно продолжается во время разлива и кристаллизации слитка.

3. Исследовано распределение легирующих элементов, а также состав и характер распределения неметаллических включений по глубине ковша и по порядку наполнения слитков в сталях марок 16ГС и 35ГС, раскисленных и легированных твердыми ферросплавами в ковше. Установлено, что легирующие элементы, за исключением кремния, достаточно равномерно распределяются по объему ковша. Распределение кремния в металле также как и состав неметаллических включений зависит от содержания растворенного кислорода перед раскислением. Введение одинакового количества алюминия (0,25 кг/т) для раскисления, без учета фактической окисленности приводит к повышенному угару кремния, недостаточно глубокому раскислению и формированию, главным образом, силикатных глобул.

4. Методами металлографии и петрографии изучен состав, свойства, а также распределение неметаллических включений в сталях марок 16ГС, 35ГС, 16Г2САФ, 12Г2АВФ и 06Г2НАБ по глубине сталеразливочного ковша и по ходу разливки.

5. Методом э.д.с. исследована окисленность кипящей стали на разных стадиях ее производства - в конвертере, сталеразливочном ковше и в изложнице. Установлена связь между активностью кислорода в металле и качеством кипящей стали. Изучена природа и трансформация дефектов в стали СтЗкп при прокатке на лист толщиной 20 и 2 мм, и показано, что наличие этого дефекта связано с недостаточной толщиной плотной наружной корочки слитка.

6. Предложена и экспериментально проверена математическая модель кристаллизации периферийной зоны слитка кипящей стали, учитывающая влияние содержания марганца, кремния, углерода, а также растворенного в металле кислорода на величину плотной наружной корочки. Модель доведена до количественного расчета. Показано хорошее соответствие расчетных и фактических величин.

7. Разработан способ управления процессом раскисления и легирования стали в ковше на основе информации об окисленности металла перед раскислением. Разработана математическая модель процесса раскисления. Методом замены приращения функции ее дифференциалом произведена оценка погрешности этой модели.

8. Проверку модели в промышленных условиях при раскислении одним элементом осуществляли в КИЦ ЧМЗ. Проведена серия из 40 опытных плавов в режиме прогнозирования содержания марганца в кипящей и кремния в электротехнической стали по разработанной модели. Создана программа для расчета количества раскислителей на ЭВМ М-6000 и проведена серия из 50 опытных плавов в режиме управления процессом раскисления кипящей стали марганцем и электротехнической кремнием. Показано, что использование предложенного способа позволяет получать содержание раскислителей в узких пределах.

Основное содержание работы опубликовано в следующих работах.

1. Золотаревский Б.М., Токовой О.К., Вяткин Г.П., Галлямов Р.Н., Хохлов А.В., Семкина Н.В. Исследование твердых электролитов

тов на основе глинозема. -В сб. Вопросы производства и обработки стали. Челябинск, 1976, №177, с.72-76.

2. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Галлямов Р.Н., Речкалова А.В., Шулькин М.Л., Хохлов А.В. Определение окисленности и условия раскисления кислородно-конвертерной стали. -Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1976, №3, с.32-35.

3. Хохлов А.В., Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К. и др. Исследование производства кислородно-конвертерной стали 35ГС. -В сб. Вопросы производства и обработки стали. Челябинск, 1976, №177, с.77-80.

4. Токовой О.К., Галлямов Р.Н., Хохлов А.В., Эпов А.А. Активометр для определения активности кислорода в жидкой стали. -Металлург, 1976, №6, с.23-24.

5. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Галлямов Р.Н., Эпов А.А., Хохлов А.В. Измерение активности кислорода в стали. -Металлург, 1977, №3, с.20-21.

6. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Хохлов А.В. и др. Раскисление и легирование кислородно-конвертерной стали жидкими и твердыми ферросплавами. -Сталь, 1977, №11, с.990-993.

7. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Хохлов А.В. и др. Улучшение качества слитка кипящей конвертерной стали. -Сталь, 1980, №9, с.763-764.

8. Токовой О.К., Поволоцкий Д.Я., Хохлов А.В. и др. Тепловой баланс раскисления и легирования конвертерной стали в ковше. - В кн. II Всесоюзная научная конференция по тепло-массообменным процессам в ваннах сталеплавильных агрегатов. Тезисы докладов. Жданов, 1976, с.106-107.

9. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Хохлов А.В. Модель оптимизации процесса раскисления конвертерной стали. -В кн. Теория и практика кислородно-конвертерных процессов. VI Всесоюзная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Днепропетровск, 1981, с.101-102.

10. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Хохлов А.В. и др. Применение кислородного концентрационного элемента с твердым электролитом для управления процессом выплавки стали. - В кн. Всесоюзный симпозиум "Твердые электролиты и их аналитическое применение". Тезисы докладов. Ангарск, 1981, с.70.

II. Токовой О.К., Вяткин Г.П., Золотаревский Б.М., Семкина Н.В., Мамаева Г.А., Галлямов Р.Н., Шулькин М.Л., Хохлов А.В. К методике определения окисленности кислородно-конвертерной стали в конвертере и в ковше методом э.д.с. - В сб. Вопросы производства и обработки стали. Челябинск, 1974, №133, с.86-92.

Хохлов Анатолий Васильевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКИСЛЕНИЯ
КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКИСЛЕННОСТИ МЕТАЛЛА

Специальность 05.16.02. -
"Металлургия черных металлов"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ФБ 00502. Подписано к печати 7/1-83 г.
Формат 60x90 1/16. Объем 1,25 п.л., 1 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 2.

УМП ЧПИ. 454044, г. Челябинск, пр.им. В.И.Ленина,76.