

05.16.02
3-996

На правах рукописи

Зырянов Сергей Владимирович

МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ АРГОНО-КИСЛОРОДНОМ РАФИНИРОВАНИИ СТАЛИ

Специальность 05.16.02 - металлургия черных металлов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
1995

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете и на Челябинском металлургическом комбинате.

Научный руководитель - лауреат Государственной премии,
заслуженный деятель науки и техники
России, доктор технических наук,
профессор Д.Я.Повоцкий

Официальные оппоненты - докт. техн. наук проф. Г.А.Хасин,
канд. техн. наук И.В.Малков

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский институт
металлургии, г. Челябинск

Защита состоится "___" 1995 г. в ____ часов на за-
седании диссертационного совета Д 053.13.04 по присуждению ученых
степеней при Челябинском государственном техническом университете
по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского
государственного технического университета.

Автореферат разослан "___" 1995 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
докт. физ.-мат. наук, проф.

Мирзаев Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

За последние десятилетия широкое применение получили особо-низкоуглеродистые нержавеющие стали. Наиболее жесткие требования предъявляются к стойкости нержавеющей стали против межкристаллитной коррозии, как наиболее опасному виду коррозионного разрушения. Аустенитные стали нечувствительны к межкристаллитной коррозии, если содержание углерода в стали меньше 0,02-0,03%.

Существует несколько способов получения особо-низкоуглеродистой нержавеющей стали. В настоящее время доминирующее положение занимает процесс аргоно-кислородного рафинирования (АКР), с использованием которого в промышленно развитых странах производится около 80% нержавеющей стали. Столь широкое применение процесса АКР и перспективы его использования в России вызывают необходимость изучения физических и физико-химических процессов при его протекании. Между тем, массообменные процессы и кинетика реакций между металлом и шлаком при АКР изучены очень мало.

Цель работы

1. Исследование гидродинамики, массопереноса и массообмена между металлом и шлаком в процессе АКР методом физического моделирования.
2. Сравнительная оценка эффективности перемешивания и массообмена при различных способах подвода дутья.
3. Исследование кинетики реакций между металлом и шлаком в процессе аргоно-кислородного рафинирования стали.

Научная новизна

В работе с соблюдением теории подобия выведены критерии для моделирования гидродинамики, массопереноса и массообменных процессов при аргоно-кислородном рафинировании стали.

Методом физического моделирования установлен характер движения жидкого металла при аргоно-кислородном рафинировании стали, определены скоростные характеристики перемещающихся потоков в ши-

роком интервале изменения интенсивности продувки при различных способах подвода дутья. Определены коэффициенты турбулентной диффузии в жидкой ванне.

Методом физического моделирования определены коэффициенты массопереноса в металлической ванне при продувке в агрегате АКР и влияние интенсивности продувки на диссипацию энергии. Выявлена зависимость коэффициента массопереноса от суммарной энергии диссипации. В пределах изученной интенсивности продувки найден коэффициент массообмена между металлом и шлаком. Определено влияние расхода газа и его давления на коэффициент массообмена.

На основе теоретического анализа предложены уравнения для определения кинетических параметров реакций между металлом и шлаком с учетом изменения термодинамических условий в процессе плавки стали.

Определены коэффициенты скорости массообмена ряда элементов между металлом и шлаком в процессе плавки нержавеющей стали в агрегате АКР и зависимость этих коэффициентов от параметров процесса при обычных для агрегата АКР режимах продувки.

Практическая ценность

Результаты исследования могут быть использованы при решении вопросов развития способов производства нержавеющей стали в России, где есть пока лишь один агрегат АКР. В частности, при выборе метода и режима подвода дутья.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на:

1. Всесоюзной конференции "Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов", Мариуполь, 1991 г.
2. Международной конференции "Современные проблемы электрометаллургии стали", Челябинск, 1992 г.
3. Первом конгрессе сталеплавильщиков, Москва, 1992 г.
4. Международном симпозиуме "Состояние и развитие кислородно-конвертерного производства стали", Магнитогорск, 1994 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, библиографического списка из 67 наименований и содержит 84 страницы машинописного текста, 25 рисунков и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННЫ

В характерных для плавки стали условиях протекания процесса в непрозрачной жидкости при высокой температуре и весьма агрессивном воздействии на вводимые датчики наиболее простым и доступным методом изучения гидродинамики, массопереноса и массообмена является физическое моделирование. Для описания подобных физических систем и анализа условий их подобия удобно пользоваться безразмерными величинами - критериями подобия.

При обработке металла в агрегате АКР на гидродинамику основное воздействие оказывают следующие параметры:

ρ_m - плотность металла, кг/м³;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

t - импульс газовой струи, Н·с;

$l_1 \dots l_n$ - геометрические размеры, м.

Целью исследования гидродинамики является определение скорости перемещения потоков жидкости в агрегате АКР (W). После приведения величин, описывающих систему, к безразмерному виду, получена совокупность, состоящая из критериев подобия:

$$W^2/gl_1 = \Phi(t/\rho g l_1^3; l_1/l_n) \quad (1)$$

Эти критерии подобия позволяют рассчитать расходы газа на модели и произвести пересчет скорости движения жидкости с модели на оригинал.

Для исследования гидродинамики ванны в процессе АКР с моделированием реальных режимов продувки была создана из прозрачного оргстекла в масштабе 1:10 модель 100 т агрегата АКР фирмы "Крупп", установленного на Челябинском металлургическом комбинате. Кроме

пяти боковых придонных фурм, аналогичных имеющимся в промышленном агрегате, в модели установили пять донных фурм, что позволяло производить либо боковую, либо донную продувку.

Гидродинамика изучалась и использованием метода киносъемки. Жидкий металл моделировали водой, дутье - воздухом. В качестве

индикатора направления и скорости перемещения потоков жидкости в модели выбрана метиленовая синь, водный раствор которой шприцем вводили в разные области ванны. Режимы дутья полностью отражали режимы, применяемые в промышленности. Продувка производилась либо через боковые придонные, либо через донные фурмы. В обоих случаях, за исключением отдельных опытов, одновременно производили продувку сверху через однослойную форму. На основании результатов киносъемки строились векторные диаграммы движения индикатора в модели при различных режимах продувки.

Обработка векторных диаграмм позволила сделать вывод, что характер движения жидкости при двух исследованных способах комбинированной продувки через придонные фурмы сбоку и через донные фурмы снизу не зависит от интенсивности продувки. Однако скорость потоков возрастает с увеличением интенсивности дутья через боковые придонные и донные фурмы и при исследованных режимах изменяется соответственно от 28 до 167 и от 49 до 172 см/с.

Установлено, что продувка сверху практически не оказывает влияния на скорость массопотоков в металле.

При относительно больших абсолютных скоростях циркуляции жидкости в центральной части ванны при донной продувке распределение их по горизонтальному сечению значительно менее равномерное, чем в условиях боковой придонной продувки. К тому же при придонной продувке в нижних горизонтах ванны на уровне до ~400 мм в образце (до 40 мм в модели) имеется застойная зона, где жидкость практически не перемещивается.

Используя данные моделирования, вычислили коэффициенты турбулентной диффузии по уравнению Эйнштейна:

$$D_T = x^2/2t \quad (2)$$

В восходящих потоках коэффициент турбулентной диффузии в условиях донной продувки выше, чем при боковой, придонной продувке.

Однако, более высокие скорости циркуляции жидкости и большие коэффициенты турбулентной диффузии в восходящих потоках ванны агрегата АКР при донной продувке по сравнению с продувкой через боковые придонные фурмы не могут служить достаточным основанием для заключения о более быстром достижении химической и физической однородности ванны.

Преимущество боковой придонной продувки в более равномерном распределении скорости движения жидкости на всех горизонтах ванны и практически отсутствие характерной для донной продувки значительной застойной зоны могут иметь решающее значение в достижении достаточно полной гомогенизации ванны.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА

При обработке расплава в агрегате АКР на явления массопереноса основное воздействие оказывают следующие параметры:

α - коэффициент массопереноса, м/с;

D - коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

t - импульс газовой струи, $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$;

ρ - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g - ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$;

w - скорость, $\text{м}/\text{с}$;

τ - время, с;

σ - поверхностное натяжение, $\text{кг}/\text{с}^2$;

l, l_n - геометрические параметры, м.

Целью исследования массопереноса являлось определение коэффициента массопереноса (α). После приведения величин, описываемых систему, к безразмерному виду, получена совокупность, состоящая из критерiev подобия:

$$\frac{\alpha^2}{gl} = \Phi \left(\frac{l}{\rho gl^3} ; \frac{D^2}{gl^3} ; \frac{gt^2}{l} ; \frac{w^2}{gl} ; \frac{\sigma}{\rho gl^2} ; \frac{l_1}{l_n} \right) \quad (3)$$

Согласно теории приближенного моделирования подобие процессов массопереноса в модели и оригинале определяется условием постоянства критериев: $I = \text{idem}$, $Bo = \text{idem}$, $Fr = \text{idem}$, $Sh = \text{idem}$. Для проведения экспериментов использовалась модель агрегата АКР в масштабе 1:10.

Для определения времени выравнивания концентрации примеси в объеме ванны при проведении сравнительного моделирования использовали метод измерения электропроводности. Жидкий металл моделировали водой, а дутье - воздухом. Опыты проводили при интенсивности дутья (в пересчете на образец $\text{м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$): 0,5-1,4 при продувке

через пять придонных боковых форм; 0,5-1,32 при продувке через пять донных форм и 0,5-2,0 при продувке через односопловую верхнюю форму, расположенную на высоте 2 метра от уровня спокойной ванны. Эти режимы полностью охватывают принятые в промышленности для процесса АКР. В качестве индикатора в модели использовали серную кислоту, которую вводили через воронку на поверхность обрабатываемой жидкости в фиксированное во всех опытах место. Измерение pH проводили одновременно в трех точках: перед вводом индикатора и после его ввода до усреднения состава ванны.

Регистрацию осуществляли при помощи трех самопишущих потенциметров КСП-4.. Время полного перемешивания водяной ванны определяли по кривым на диаграммах измерения электропроводности во времени. Каждую серию опытов с одинаковым режимом продувки проводили три раза и при отклонении не более 8% брали среднее значение.

Установлено, что с увеличением интенсивности продувки время полного выравнивания концентрации вводимого индикатора существенно уменьшается как при продувке через донные, так и через боковые придонные формы во всех контрольных точках ванны. При продувке через донные формы нижних горизонтов ванны образуется застойная зона, где выравнивание состава происходит относительно медленно. Такую зону высотой около 400 мм наблюдали в предыдущем исследовании гидродинамики ванны. При продувке через боковые придонные формы такой застойной зоны не отмечено. Лишь при расходе дутья 50 м³/мин продолжительность выравнивания состава в нижнем горизонте ванны несколько больше, чем в более высоких горизонтах.

По экспериментальным данным рассчитали коэффициент массопереноса по известному уравнению:

$$a' = \frac{C \cdot V' \cdot t}{C_0 \cdot F' \cdot \tau'} ; \quad (4)$$

где: С и С₀-конечная и начальная концентрация ионов водорода, pH; V'-объем ванны, м³; F'-площадь поверхности ванны, м²; τ'-время выравнивания концентрации примеси, с; (символы со штрихом относятся к модели).

Выведенные критериальные зависимости позволили пересчитать коэффициент массопереноса с модели на оригинал по уравнению $a=0,1a'D/D'$, где D и D'-коэффициенты диффузии, соответственно, в образце и в модели.

Коэффициент массопереноса, характеризующий эффективность процессов перемешивания, является функцией диссипации энергии. В рассматриваемой гидродинамической системе эта энергия складывается из мощностей диссипации энергии всплыvания газовых пузырьков (ε_H), кинетической энергии струи газа (ε_K), и энергии, вводимой продувкой сверху (ε_B):

$$\varepsilon = \varepsilon_H + \varepsilon_K + \varepsilon_B \quad (5)$$

Результаты расчетов всех трех составляющих энергии диссипации показали, что основную часть этой энергии составляет рассеяние кинетической энергии, и совсем незначительную часть - рассеяние энергии, вводимой продувкой сверху.

По полученным данным произвели графические построения зависимости коэффициента массопереноса от суммарной диссипации энергии. Оказалось, что для случая донной продувки эта зависимость линейная; она может быть описана уравнением:

$$\alpha = 1,4 \cdot 10^{-2} + 3,889 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon \quad (6)$$

при линейном коэффициенте корреляции $r=0,99$.

Линейная зависимость коэффициента массопереноса от суммарной энергии диссипации ($r=0,97$) при боковой придонной продувке была выявлена при построении в логарифмических координатах:

$$\alpha = 3,48 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon^{0,365} \quad (7)$$

При одинаковых режимах продувки в проведенных опытах отношение коэффициентов массопереноса при донной (α_D) и боковой придонной (α_B) продувках:

$$\frac{\alpha_D}{\alpha_B} = \frac{1,4 \cdot 10^{-2} + 3,889 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon}{3,48 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon^{0,365}} = 0,94-1,04 \quad (8)$$

Следовательно, при донной продувке коэффициент массопереноса в ванне агрегата АКР примерно такой же, как и при боковой придон-

ной продувке. Однако, боковая придонная продувка устраниет образование застойной зоны в нижней части ванны, характерной для донной продувки. Это согласуется с гидродинамической картиной ванны с застойной зоной высотой примерно 400 мм при донной продувке и отсутствием ее при боковой придонной продувке.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССООБМЕНА МЕЖДУ МЕТАЛЛОМ И ШЛАКОМ В ВАННЕ АКР

Массообменные процессы между металлом и шлаком в процессе АКР определяются совокупностью величин:

K - коэффициент массообмена, м/с;

t - импульс газовой струи, кг·м/с²;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

D - коэффициент молекулярной диффузии, м²/с;

τ - время, с;

w - скорость перемещения потоков, м/с;

F - сила воздействия газа на жидкость, Н;

m - масса, кг;

$\rho_{ст}, \rho_{шл.}$ - плотность стали и шлака, кг/м³;

l_1, l_n - геометрические размеры, м.

Целью исследования массообмена являлось определение коэффициента массообмена (K) и его зависимости от параметров продувки.

Методом масштабных преобразований совокупность величин привели к безразмерному виду:

$$\frac{k^2}{gl} = \left(\frac{t}{pgl^3} ; \frac{D^2}{gl^3} ; \frac{gt^2}{l} ; \frac{w^2}{gl} ; \frac{F}{pgl^3} ; \frac{\rho_{шл.}}{\rho_{ст}} ; \frac{m}{\rho l^3} ; \frac{l_1}{l_n} \right) \quad (9)$$

Полученные безразмерные величины преобразованы в известные критерии:

$$Sh = \phi(I, Ne, Ho, \rho_{шл.}, l_n) \quad (10)$$

Таким образом, подобие процессов массообмена в модели и оригинале определяется условием постоянства критериев: $I = idem$, $Ho = idem$, $Ne = idem$, $Sh = idem$, $l_n = 1/10$.

Для проведения экспериментов использовалась модель агрегата

АКР описанная выше. Расходы газа для продувки жидкости в модели при продувке через боковые придонные фурмы или донные фурмы изменились в диапазоне от 20 до 120 м³/мин.

Для изучения массообмена между металлом и шлаком при обработке расплава методом АКР использована модель агрегата АКР, в которой кроме пяти боковых придонных фурм, аналогичных имеющимся в промышленном агрегате АКР, установлены пять донных фурм. Это позволяло производить либо боковую, либо донную продувку.

При проведении экспериментов жидкую сталь моделировали водой, а жидкий шлак олифой. Такой выбор был обусловлен определенным соответствием их физических свойств. Вода при температуре 20°C и сталь при температуре 1600°C имеют одинаковую вязкость - 0,001 Па·с. Олифа и жидкий шлак, соответственно при этих же температурах, имеют вязкость 0,08 и 0,003...0,200 Па·с. Следовательно, величина симплекса вязкости олифы и воды ($\eta_0/\eta_B=80$) находится в пределах величины симплекса вязкости шлака и стали ($\eta_{ш}/\eta_{ст}=3...200$). Величина симплекса плотностей ($\rho_0/\rho_B=0,91$) отличается от этой величины для шлака и стали ($\rho_{ш}/\rho_{ст}=0,50...0,57$), но все же одного порядка. Как и жидкые сталь и шлак, вода и олифа взаимно не растворимы.

Так как кислород, вдуваемый в ванну АКР в смеси с аргоном, усваивается ванной, при моделировании в качестве дутья использовали диоксид углерода, который частично усваивается водой.

В качестве индикатора, моделирующего массообмен между металлом и шлаком, приняли растворимый в воде и в олифе иод.

Для определения времени, необходимого для завершения процесса, т.е. достижения равновесного распределения иода между двумя фазами, производили отбор проб воды для титрования из зоны, где согласно проведенным ранее исследованиям наблюдаются наименее развитые потоки и массоперенос. В условиях опытов равновесные концентрации иода в олифе составили $1534,5 \cdot 10^{-3}$ г/л и в воде - $1,34 \cdot 10^{-3}$ г/л.

Для каждого режима при каждом из двух методов продувки опыты проводили дважды. Наблюдаемая ошибка определения времени достижения равновесия не превышала 2%.

Результаты экспериментов показали, что интенсивность продувки оказывает существенное влияние на время достижения равновесия. При этом метод продувки, боковой придонной или донной, не влияет

на время достижения равновесия. Такой результат согласуется с результатами проведенных ранее на модели исследований гидродинамики ванны и массопереноса в ней.

Обработка экспериментальных данных показала, что коэффициент массообмена находится в экспоненциальной зависимости от расхода газа (Q) при продувке через боковые придонные или донные форны и эта зависимость соответствует уравнению $k = 6,24 \exp(0,0324 \cdot Q)$. Коэффициент линейной корреляции этой зависимости, выраженной уравнением $\ln k = 0,0324 \cdot Q - 7,379$, равен 0,99, а дисперсия случайности равна $3.28 \cdot 10^{-4}$. Это свидетельствует о наличии тесной связи и надежности полученных результатов.

Конечно, справедливость полученной зависимости коэффициента массообмена от режима продувки можно утверждать лишь в пределах изученных расходов газа. Но, как отмечалось, эти пределы соответствуют принятым в промышленных условиях продувки ванны в агрегате АКР, что определяет значение полученных результатов.

При выходе из сопла газ расширяется, совершая работу, величина которой зависит от давления. Так как эта работа расходуется, в частности, на перемешивание, давление поступающего в жидкую ванну газа влияет на коэффициент массообмена. Влияние это проявляется в линейной зависимости массообмена от произведения давления газа на его расход. Выражается она уравнением $k = \gamma PQ$, где в условиях описываемых опытов $\gamma = 0,196$. Коэффициент корреляции равен 0,99, а дисперсия случайности $3,31 \cdot 10^{-4}$, что свидетельствует о достаточной тесноте и надежности связи.

На основе полученных результатов выполнены расчеты коэффициентов массообмена ряда элементов между металлом и шлаком в процессе аргоно-кислородного рафинирования стали. В исследованном диапазоне интенсивности дутья эти значения для боковой придонной и донной продувки равны, соответственно:

$$S (4,3 \dots 134,6) \cdot 10^{-3} \text{ и } (4,7 \dots 134,6) \cdot 10^{-3} \text{ м/с;}$$

$$S_1 (3,6 \dots 113,7) \cdot 10^{-3} \text{ и } (3,9 \dots 113,7) \cdot 10^{-3} \text{ м/с;}$$

$$Mn (0,6 \dots 18,3) \cdot 10^{-3} \text{ и } (0,6 \dots 18,3) \cdot 10^{-3} \text{ м/с;}$$

$$P (4,6 \dots 142,1) \cdot 10^{-3} \text{ и } (4,9 \dots 142,1) \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

КИНЕТИКА РЕАКЦИИ МЕЖДУ МЕТАЛЛОМ И ШЛАКОМ В ПРОЦЕССЕ АКР

Согласно результатам ряда исследований лимитирующей стадией процессов обмена ионов в системе металл-шлак является диффузия. Поэтому скорость перехода элементов между металлом и шлаком можно описать уравнениями первого закона Фика, которое после преобразования имеет вид:

$$k = - \frac{d[(F/V) \ln(C - C^*)]}{dt} \quad (11)$$

где: С-концентрация элемента в металле; τ-время; k-коэффициент скорости массообмена; F и V-поверхность и объем металла; знаком * обозначено состояние равновесия.

Следовательно, можно считать, что величина $(V/F) \ln(C - C^*)$ имеет самостоятельное значение и k является скоростью убыли этой величины.

В условиях опытов функцию k изучали при фиксации дискретных изменений значений равновесных концентраций элемента в металле. Поэтому произвели аппроксимацию производной (11) конечными разностями и получили:

$$k = \frac{V \cdot \ln(C_{\tau} - C_{\tau}^*) - \ln(C_0 - C_0^*)}{F \cdot \tau - \tau_0} \quad (12)$$

или при $\tau_0 = 0$

$$k = \frac{V}{F\tau} \ln \frac{C_0 - C_0^*}{C_{\tau} - C_{\tau}^*} \quad (13)$$

Уравнение (13) использовали для расчета коэффициента массообмена элементов между металлом и шлаком в процессе аргонокислородного рафинирования стали опытных плавок.

Опытные плавки проводили в агрегате АКР емкостью 100 т электросталеплавильного цеха Челябинского металлургического ком-

бината (АО "Мечел"). Плавки нержавеющей стали вели по принятой в цехе технологии с отбором на повалках проб металла и шлака в строго контролируемое время и лишь в те периоды, когда никаких присадок в ванну не делали. Одновременно термопарой контролировали температуру.

В качестве объекта для непосредственного изучения был выбран марганец, термодинамические данные окисления (восстановления) которого надежно известны.

Для определения равновесных концентраций марганца в металле использовали уравнение (14) константы равновесия.

$$\lg K_{Mn} = \lg \frac{(MnO)}{(FeO)[Mn]} = \frac{6440}{T} - 2,95 \quad (14)$$

Обработка экспериментальных данных с использованием уравнений (13) и (14) показала, что коэффициент скорости массообмена марганца между металлом и шлаком при продувке металлической ванны в 100-т агрегате АКР при обычных ее режимах ($30\dots70\text{ м}^3\text{ аргона и кислорода в мин.}$) изменяется в пределах $(0,25\dots25)\cdot10^{-4}\text{ м/с}$ и находится в экспоненциальной зависимости от расхода газа Q . Коэффициент линейной корреляции этой зависимости, выраженной уравнением $\ln k=0,0934-13,69$ равен 0,76, а величина отношения коэффициента корреляции к его дисперсии $r/s=14,3$. Это свидетельствует о наличии связи и ее надежности.

Вычисленные по опытным плавкам значения коэффициента скорости массообмена марганца k_{Mn} и его зависимость от расхода газа получены лишь для периодов продувки после окисления кремния. При наличии кремния, даже порядка 0,1%, k_{Mn} имел весьма низкие ($<0,6\cdot10^{-4}\text{ м/с}$) и даже отрицательные значения несмотря на очень большие расходы газа в эти периоды – до $70\text{ м}^3/\text{мин}$ и более.

Следует отметить, что эти результаты, полученные при изучении в промышленном агрегате, как по порядку величины, так и по характеру зависимости коэффициента массообмена между металлом и шлаком от расхода дутья вполне согласуются с результатами физического моделирования, где было практически исключено влияние побочных эффектов (и $r=93,5$).

Полученные результаты определения коэффициента массообмена марганца можно использовать для расчета коэффициента массообмена

других элементов с использованием ранее полученного уравнения $k=k' D/D'$, где D - коэффициент диффузии элемента. Приняв коэффициенты диффузии в металле $D_{Mn}=0,61 \cdot 10^{-9}$, $D_{S1}=3,8 \cdot 10^{-9}$, $D_S=4,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, получили коэффициенты массообмена $k_{S1}=(1,5 \dots 150) \cdot 10^{-4}$, $k_S=(1,8 \dots 180) \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ при изменении расхода газа (O_2+Ar) в 100-т агрегате АКР от 30 до $70 \text{ м}^3/\text{мин.}$, соответственно.

Механизм окисления углерода, протекающего с образованием газовой фазы CO преимущественно на поверхности футеровки и готовых газовых пузырей, отличается от механизма окисления других элементов. Равновесное содержание углерода в высокочромистом расплаве зависит от содержания хрома и парциального давления CO, которое в условиях АКР определяется отношением O_2/Ar . Для обработки экспериментальных данных равновесные содержания углерода, при содержащих хрома 14,5...17,7% определяли по уравнению:

$$\lg K_{Cr} = \lg \frac{[\%Cr]^{3/4} \cdot P_{CO}}{[\%C] \cdot f_C} = - \frac{11520}{T} + 7,64 \quad (15)$$

По результатам расчетов по 14 периодам (9 плавок), по которым отношение O_2/Ar изменялось от 4/1 до 1/3, коэффициент скорости окисления углерода $k_C=(1,1 \dots 21) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Не выявлено никакой связи величины k_C с отношением O_2/Ar , исходным для данного периода содержанием углерода (0,80...0,14%) и хрома, расходом газовой смеси (40...76 $\text{м}^3/\text{мин.}$). По-видимому, это объясняется тем, что в процессе АКР при указанных исходных содержаниях углерода лимитирующей стадией процесса является массоперенос кислорода, а не углерода.

Общие выводы

1. Разработана методика физического моделирования и с ее применением исследованы гидродинамика, массоперенос, явления массообмена между металлом и шлаком в агрегате аргонокислородного рафинирования стали. Найдены коэффициенты турбулентной диффузии и массопереноса в металлической ванне при продувке в агрегате АКР.

2. Определено влияние интенсивности продувки на диссипацию

энергии в ванне агрегата АКР. Выявлена зависимость коэффициента массопереноса от суммарной энергии диссипации при продувке через боковые придонные фурмы и сверху и при продувке через донные фурмы и сверху.

3. Установлено, что боковая придонная продувка устраниет образование застойной зоны в нижней части ванны ближе к стенкам агрегата, характерной для донной продувки.

4. В пределах изученной интенсивности продувки найден коэффициент массообмена между металлом и шлаком. Определено влияние расхода газа и его давления на коэффициент массообмена.

5. На основе теоретического анализа предложены уравнения для изучения кинетических реакций между металлом и шлаком с учетом изменения термодинамических условий в процессе плавки.

6. По данным контроля серии плавок нержавеющей стали в агрегате АКР емкостью 100 т определены коэффициенты скорости массообмена ряда элементов между металлом и шлаком и зависимость этих коэффициентов от параметров процесса.

7. Результаты, полученные при изучении в промышленном агрегате, как по порядку величин, так и по характеру зависимости коэффициента массообмена между металлом и шлаком от расхода дутья согласуются с результатами физического моделирования.

8. Результаты исследования могут быть использованы при решении вопросов развития способов производства нержавеющей стали в России, где есть пока лишь один агрегат АКР. В частности, при выборе метода и режима подвода дутья.

Основное содержание работы освещено
в следующих публикациях:

1. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Зирянов С.В. Гидродинамика сталеплавильной ванны при продувке металла в агрегате аргоно-кислородного рафинирования // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции "Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов", ч.1. - Мариуполь, 1991, - с. 36-37.
2. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Зирянов С.В. Гидродинамика ванны при аргоно-кислородном рафинировании стали: физическое моделирование // Металлы. 1993. №1. с. 26.

- Повоцкий Д.Я., Токовой О.К., Зырянов С.В. Физическое моделирование массопереноса в ванне при аргоно-кислородном рафинировании стали // Металлы. 1993. №4. с. 5.
- Повоцкий Д.Я., Токовой О.К., Зырянов С.В. Физическое моделирование массообмена между металлом и шлаком при аргоно-кислородном рафинировании стали // Металлы. 1995. №3. с. 15.
- Повоцкий Д.Я., Зырянов С.В., Взаимодействие между металлом и шлаком при аргоно-кислородном рафинировании стали // Металлы. 1995. №4. с.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Зырянов".

**Издательство Челябинского
государственного технического университета**

ЛРМО20364 от 20.01.92. Подписано в печать 18.09.95. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 0,93. Уч.-изд.л. 0,91.
Тираж 100 экз. Заказ 274/407.

ЮП издательства. 454080, г. Челябинск, пр.им. В.И. Ленина, 76.