

8. Fontana M.G., Chipman J. // Trans. Amer. Soc. Metals, 1936. — V. 24. — P. 313–333.
9. Wagner C. Thermodynamics of Alloys // Cambridge, Mass. — Addison-Wesley Press, Inc, 1952. — P. 51.
10. Pelton A.D., Bale C.W. // Metallurgical Transactions A, 1986. — V. 17A. — №7. — P. 1211–1215.
11. Gaskell D.R. Introduction to Metallurgical Thermodynamics, 2nd Ed. // New York. — McGraw-Hill, 1981.
12. Харченко А.В., Пономаренко А.Г. О кинетике межфазного массопереноса в металлургических агрегатах // Металл и литье Украины, 2002. — № 12. — С. 41–42.

© Харченко А.В., Пономаренко А.Г., 2003

ХРАПКО С.А. (ДОННТУ)

КИНЕТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ

Рассмотрены основные положения математического моделирования взаимодействия фаз в металлургических агрегатах. Разработанная модель учитывает физико-химические, кинетические, тепломассообменные и гидродинамические особенности процессов, протекающих в сталеплавильной ванне, и предназначена для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами выплавки и обработки стали.

Наличие автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) становится нормой в современном сталеплавильном производстве. В то же время, круг задач, решаемых этими системами, часто ограничен автоматизацией элементарных технологических операций, информационным сопровождением процессов и статистической обработкой данных. Построение систем управления без решения этих задач, конечно, немыслимо, но возможности современной науки, аппаратных и программных средств позволяют создавать более эффективные системы.

Потребности современного производства и возможности металлургической науки определяют актуальность решения задачи оперативного (часто звучит — «в режиме реального времени») моделирования процессов выплавки и обработки стали и сталеплавильного производства в целом системами управления.

Одна из самых важных и сложных задач в сталеварении — расчет химического состава и температуры металла. Именно адекватный прогноз позволяет эффективно решать задачи непосредственного управления, а также весь круг сопутствующих задач, предназначенных для повышения эффективности работы металлургического агрегата, цеха и предприятия в целом. Построение такой системы управления вряд ли возможно без использования результатов теоретических исследований в области физической химии.

Термодинамика и кинетика взаимодействия металла и шлака в сталеплавильных агрегатах изучались многими исследователями [1]. Значительное количество работ посвящено анализу перехода химических элементов через межфазную границу и собственно, кинетике элементарного акта химической реакции. В настоящее время большинство исследователей пришли к выводу, что процессы взаимодействия в пограничном слое и на межфазной границе не являются лимитирующей стадией окисления примесей в промышленных агрегатах [2]. Считается, что основное «торможение» перехода системы из начального состояния в равновесное (при отсутствии внешних воздействий) связано с доставкой компонентов из циркуляционного объема на границу раздела металл-шлак.

Математическое описание обычно построено на классических уравнениях молекулярной диффузии [1,3]. Движущей силой потока компонента из одной фазы в другую принимается разность текущей и равновесной концентраций (или активностей). В качестве коэффициента пропорциональности коэффициент молекулярной диффузии заменяется «эффективным» коэффициентом диффузии (или коэффициент «турбулентной» диффузии). Получаемые в результате одно- и двумерные системы дифференциальных уравнений имеют высокую вычислительную сложность при попытках реализовать эти модели для описания реальных процессов. Применимость таких моделей для неспокойной жидкой ванны в реальных агрегатах очень сомнительна, поскольку весьма неправдоподобна «индивидуальность» коэффициентов диффузии и движущих сил по каждому элементу при мощных конвективных потоках, когда все элементы «едут вместе в одном трамвае».

Перспективным подходом при описании кинетики процессов взаимодействия фаз является использование равновесного термодинамического расчета в качестве основы. Стоит учесть, что стремление системы к равновесию — пожалуй, единственный известный строго доказанный факт. Для реализации этого подхода необходимо определить критерии равновесия и выбрать уравнения состояния фаз.

Для численного решения можно использовать критерии равновесия в виде [4]:

$$(\mu_i^j - \lambda_i) n_i^j = 0, \quad i = 1 \dots k, \quad j = 1 \dots f, \quad (1)$$

где k — число компонентов системы (элементов Периодической системы Менделеева); f — максимальное число рассматриваемых фаз; μ_i^j , n_i^j — химический потенциал и количество элемента i в фазе j ; λ_i — неопределенные множители Лагранжа.

Уравнение состояния ($\mu_i^j(\bar{n}^j)$) определяет индивидуальность любой фазы. Многолетний опыт решения практических задач позволил сделать следующий выбор. Термодинамическое состояние элемента в шлаке описывается с помощью теории регулярных ионных растворов В.А. Кожеурова [5] и теории субрегулярных ионных растворов Г.Г. Михайлова [6] с учетом дополнительного вклада энергии мезофазных переходов. Для расчета коэффициентов активности компонентов металла выбрана теория субрегулярных растворов [7]. В настоящее время это единственные надежные и широко доступные методы расчета активностей, обеспеченные численными значениями параметров.

К сожалению, пришлось отказаться от метода коллективизированных электронов (МКЭ) [8] из-за низкой точности расчета активностей, и от метода параметров взаимодействия Вагнера [9], которые дают принципиально неверный ход кривой активности в области повышенных концентраций, не согласуются с уравнением Гиббса-Дюгема и законом Рауля, особо опасны для экстраполяции [7].

Поскольку одной из основных задач является прогноз химического состава и температуры металла, то принято, что в сталеплавильных агрегатах основная масса всех поступающих веществ сосредотачивается в металле, шлаке и газовой фазе. Влияние других фаз (взаимодействие с футеровкой, выделение неметаллических включений (НВ), вынос пыли и т.д.) в открытых сталеплавильных агрегатах не оказывает существенного влияния на химический состав жидкого металла. Поэтому основным является расчет равновесия в системе металл-шлак-газ, а взаимодействие с другими фазами и их влияние учитывается дополнительным расчетом по результатам вычисления текущего состава металла и шлака.

Расчет траектории перехода системы из исходного состояния в конечное проводился с использованием следующих основных положений:

1. Из опыта известно, что при температурах сталеплавильных процессов собственно кинетические сопротивления (обусловленные скоростью акта химического взаимодействия частиц) отсутствуют.

2. Скорость диффузионной доставки компонентов в зону реакций пренебрежимо мала по сравнению с фактической скоростью реакций в сталеплавильной ванне.

3. Скорость взаимодействия фаз целиком определяется скоростью доставки компонентов на границу раздела фаз.

4. Основной массоперенос примесей происходит за счет конвективных потоков металла, при этом скорость доставки всех элементов практически не зависит от их индивидуальных свойств.

5. Скорость массопереноса определяется не градиентом химических потенциалов, а скоростью потоков металла и шлака, т.е. интенсивностью перемешивания, которая определяется величиной перемешивающих воздействий: струи кислорода (при продувке металла), пузырей CO (выделяющихся при кипении ванны), донной продувки инертным газом и др.

В этом случае расчет производится следующим образом [4]. Из общего объема металла и шлака условно выделяется «реакционная зона» (РЗ) и «циркуляционный объём» (ЦО). Принимается, что поверхностные слои металла и шлака (находящиеся в «реакционной зоне») приходят в равновесие. За счет конвективных потоков в объемах фаз через некоторое время эти поверхностные слои заменяются новыми порциями металла и шлака, между которыми снова устанавливается равновесие. Выводимые поверхностные слои поступают в циркуляционные объемы металла и шлака, где усредняются, после чего весь расчет повторяется.

Для численного моделирования задается шаг по времени $d\tau$, массы металла и шлака в РЗ ($M_{Me}^{PЗ}, M_{Шл}^{PЗ}$) и скорость смены РЗ ($V_{Me}, V_{Шл}$). Без особой погрешности можно принять, что РЗ полностью обновляется за рассматриваемый период времени $d\tau$, т.е. $M_{Me}^{PЗ} = M_{Me} V_{Me} d\tau$ и $M_{Шл}^{PЗ} = M_{Шл} V_{Шл} d\tau$, где M_{Me} и $M_{Шл}$ — общая масса металла и шлака.

В качестве примера вычисления траектории перехода системы в равновесное состояние рассмотрим закрытую систему металл-шлак (без газовой фазы, без продувки кислородом, кипения металла, поступления материалов, при постоянной температуре). Введем следующие обозначения: $m_{[j]}, m_{(j)}$ — текущая масса элемента j в металле и шлаке; $m_{[i]}^\infty = (m_{[i]})_{\tau=\infty}$, $m_{(i)}^\infty = (m_{(i)})_{\tau=\infty}$ — конечные (равновесные) массы элементов в металле и шлаке; $m_{[i]}^0 = (m_{[i]})_{\tau=0}$, $m_{(i)}^0 = (m_{(i)})_{\tau=0}$ — начальные массы элементов в металле и шлаке.

В этом случае для состава металла по прошествии интервала времени $d\tau$ получим следующее выражение:

$$m_{[i]}^{d\tau} = m_{[i]} - m_{[i]} V_{Me} d\tau + M_{[i]}^{равн}(\bar{m}_j), \quad i = 1...k, \quad (2)$$

где $M_{[i]}^{равн}(\bar{m}_j)$ — функция, вычисляющая массу элемента i в металле, если система, состоящая из \bar{m}_j масс элементов, придет в равновесие; $m_j = m_{[j]} V_{Me} d\tau + m_{(j)} V_{Шл} d\tau$ — текущая суммарная масса элемента j в РЗ.

Первое слагаемое в (2) соответствует текущей массе элемента в металле, второе — массе элемента, переходящей из ЦО в РЗ и третье — массе элемента, «возвращающейся» из РЗ в ЦО после перехода РЗ в равновесное состояние. Анализ показывает, что (2) имеет непосредственное аналитическое решение, только если скорости пе-

ремешивания металла и шлака (т.е. скорости смены РЗ) одинаковы ($V_{Me} = V_{Шл} = V$). В этом случае, учитывая условия задачи и однородность первого порядка функций $M_{[i]}^{равн}$, получим:

$$dm_{[i]} = m_{[i]}^{dt} - m_{[i]} = Vd\tau [M_{[i]}^{равн} (m_{[j]} + m_{(j)}) - m_{[i]}]. \quad (3)$$

Поскольку $m_{[j]} + m_{(j)} = m_{[j]}^0 + m_{(j)}^0 = const$ — исходный суммарный состав системы (неизменный в процессе перехода в равновесное состояние, поскольку считаем систему закрытой), то $M_{[i]}^{равн} (m_{[j]} + m_{(j)}) = m_{[i]}^\infty = const$ — конечный (равновесный) состав металла, откуда

$$\frac{dm_{[i]}}{d\tau} = V(m_{[i]}^\infty - m_{[i]}). \quad (4)$$

Если скорость перемешивания металла и шлака постоянна ($V=const$), то можно разделить переменные и проинтегрировать:

$$\int \frac{dm_{[i]}}{m_{[i]}^\infty - m_{[i]}} = \int Vd\tau, \quad (5)$$

откуда

$$\ln(m_{[i]}^\infty - m_{[i]}) = V\tau + const. \quad (6)$$

В результате получаем экспоненциальную зависимость состава металла от времени:

$$m_{[i]} = m_{[i]}^\infty - (m_{[i]}^\infty - m_{[i]}^0) \exp(-\tau / \tau^*), \quad (7)$$

где $\tau^* = 1/V$ — постоянная времени (по нашим оценкам в современных промышленных дуговых сталеплавильных печах порядок величины τ^* ориентировочно составляет 1÷10 минут, в зависимости от условий и периода плавки).

Для иллюстрации проведен расчет по рассмотренной модели при следующих условиях: в ковп с металлом (после раскисления и легирования) сливается окисленный печной шлак с достаточно высоким содержанием оксида марганца. Начальный состав металла — 0.4% С, 0.3% Si, 0.9% Mn, 0.05% S, 0.027% P, масса — 100 тонн; начальный состав шлака — 25% SiO₂, 23% FeO, 8% Al₂O₃, 28% CaO, 7% MgO, 8% MnO, 0.4% P₂O₅, 0.6% CaS, масса — 12 тонн; температура металла — 1600°C. Расчет равновесного состава дает следующие результаты: металл — 0.4% С, 0.003% Si, 0.47% Mn, 0.065% S, 0.036% P; содержание FeO в шлаке — 4.6%.

Численное интегрирование выражения (2) дает идентичные уравнению (7) зависимости (см. рис. 1). Аналогичный результат получается и для состава шлака.

Формула (7) хорошо вписывается в общепринятое описание процессов в теории автоматического регулирования, кроме того, похожий результат получается при классическом диффузионном рассмотрении указанного процесса перехода системы в равновесное состояние как диффузионного переноса компонентов под действием градиента концентраций (активностей) [1,3]. Строго говоря, используемые в кинетике коэффициенты «турбулентной диффузии» являются попыткой учесть реальный макроскопический массоперенос классическими диффузионными уравнениями, однако отличная от

диффузии природа рассматриваемых явлений приводит в некоторых случаях к совершенно иным зависимостям. Например, расчет дает экспоненциальное поведение состава металла и шлака только при одинаковых скоростях перемешивания этих фаз (рис. 1). В то же время, в условиях типичного сталеплавильного производства металл и шлак, как правило, имеют разную температуру, вязкость, и следовательно, разную скорость перемешивания, что существенно изменяет результаты расчета кинетики взаимодействия фаз. Например, в сталеразливочном ковше во время отстоя температура, вязкость и скорость перемешивания шлака ниже, чем аналогичные параметры металла. На рис. 2 приведены результаты расчета для таких условий (при $V_{Me} \gg V_{Шл}$).

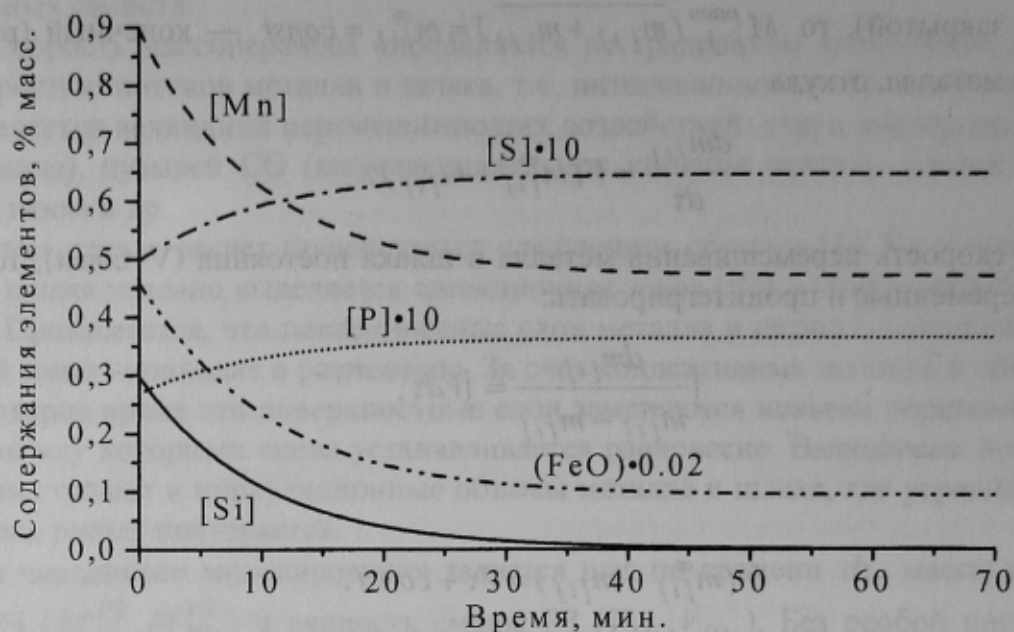


Рис. 1. Расчет состава металла и шлака при $V_{Me} = V_{Шл} = 0.1 \text{ мин}^{-1}$.

Интересно, что в начальный период времени (первые 7 минут) содержание марганца в металле увеличивается, несмотря на то, что равновесное содержание марганца в металле ниже исходного содержания, т.е. изменяется в сторону, противоположную конечному равновесному состоянию! В то же время в диффузионных уравнениях невозможен переход через равновесное состояние, т.к. у химических элементов нет «инерции» — при достижении равновесной концентрации происходит исчезновение движущей силы. Кроме того, при индивидуальной диффузии каждого компонента не может быть взаимного влияния компонентов и их потоков друг на друга.

Несмотря на кажущееся противоречие, такое «антиравновесное» поведение марганца легко объясняется высоким («сверхравновесным») содержанием кремния в металле в этом же интервале времени: пока содержание кремния не снизилось до равновесных значений, идет восстановление марганца и фосфора из шлака кремнием, растворенным в металле. После «выгорания» кремния направление процесса перехода марганца и фосфора изменяется на обратное — происходит их снижение до равновесных значений. Возможно, этот эффект и называется в термодинамике необратимых процессов взаимодействием потоков.

Для иллюстрации этого положения был проведен расчет траектории перехода системы в равновесное состояние при импульсном воздействии, т.е. в рассмотренном количественном примере системы металл-шлак, пришедшей в равновесие, из шлака в металл мгновенно перенесена некоторая часть кремния. Эти металл и шлак приняты в качестве начального состояния системы. Полученные результаты расчетов при различ-

ных скоростях перемешивания представлены на рис. 3 (одинаковые скорости перемешивания фаз) и рис. 4–5 (отличающиеся скорости перемешивания).

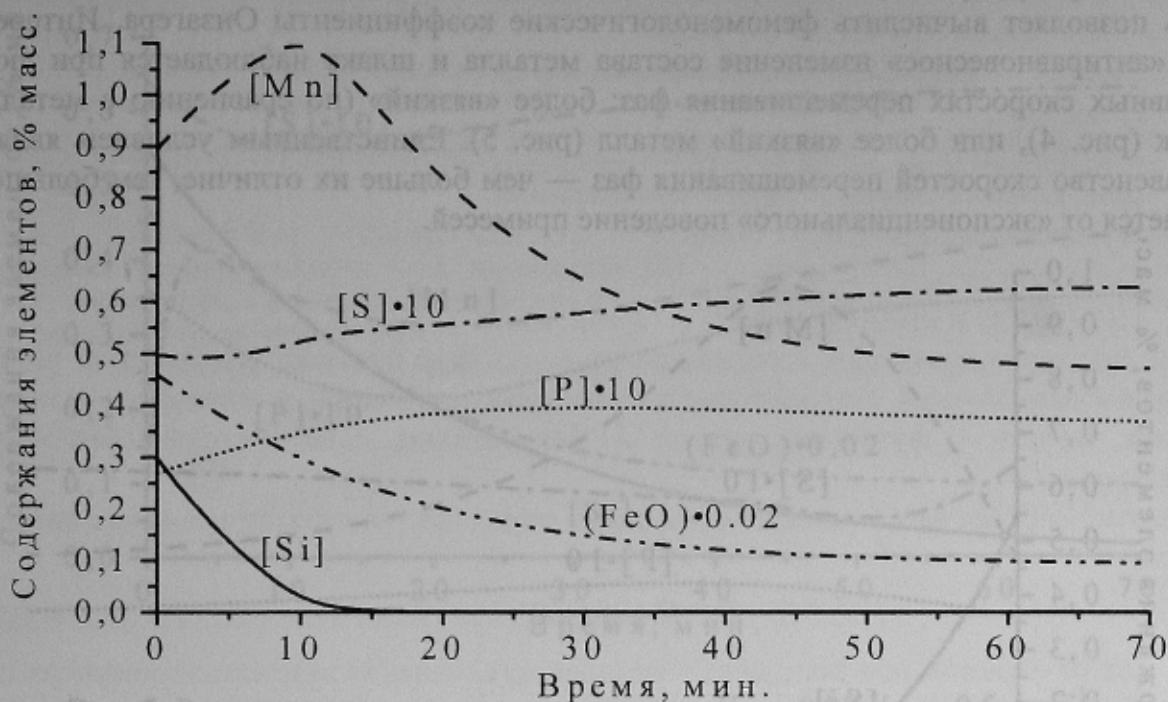


Рис. 2. Расчет состава металла и шлага при $V_{Me} = 0.5, V_{Шл} = 0.05 \text{ мин}^{-1}$

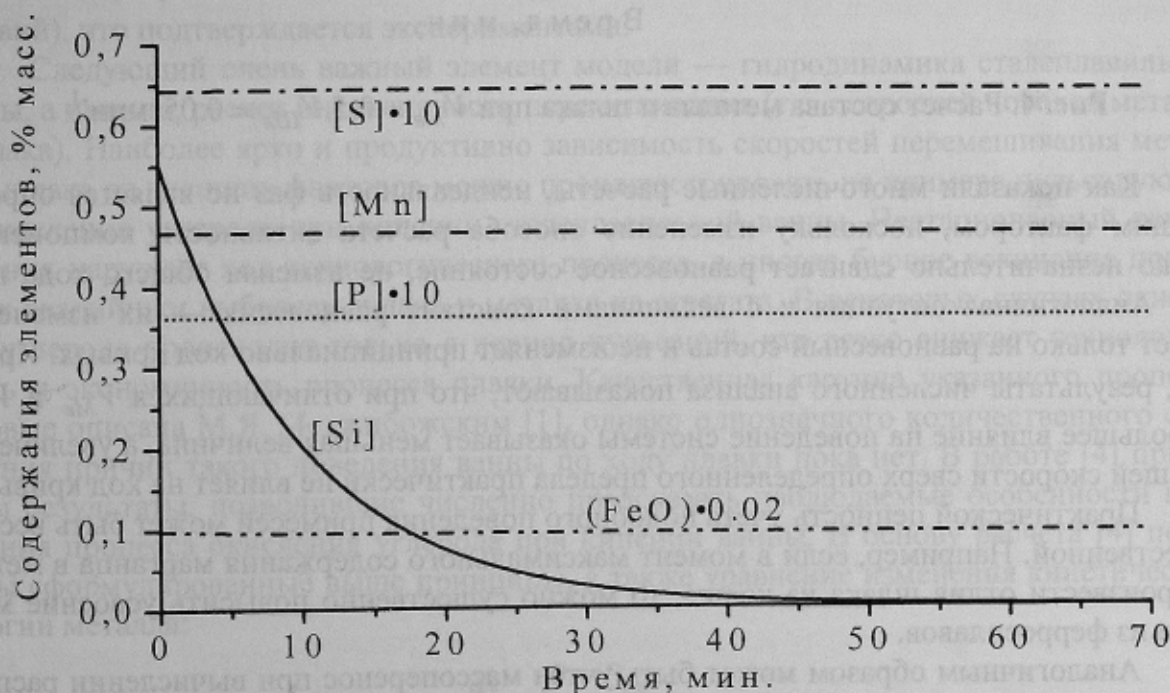


Рис. 3. Расчет состава металла и шлага при $V_{Me} = V_{Шл} = 0.1 \text{ мин}^{-1}$

Несмотря на то, что исходный состав металла практически совпадает с конечным по всем элементам (за исключением кремния), из рисунков видно, что в процессе перехода системы в равновесное состояние под действием «потока» кремния происходит возникновение «потоков» всех остальных элементов, составляющих систему (при отличающихся скоростях перемешивания взаимодействующих фаз).

При этом в начальной части всех графиков содержание всех элементов изменяется в сторону, противоположную равновесному состоянию. Возможно, подобная модель позволяет вычислить феноменологические коэффициенты Онзагера. Интересно, что «антиравновесное» изменение состава металла и шлака наблюдается при любых неравных скоростях перемешивания фаз: более «вязкий» (по сравнению с металлом) шлак (рис. 4), или более «вязкий» металл (рис. 5). Единственным условием является неравенство скоростей перемешивания фаз — чем больше их отличие, тем больше отличается от «экспоненциального» поведение примесей.

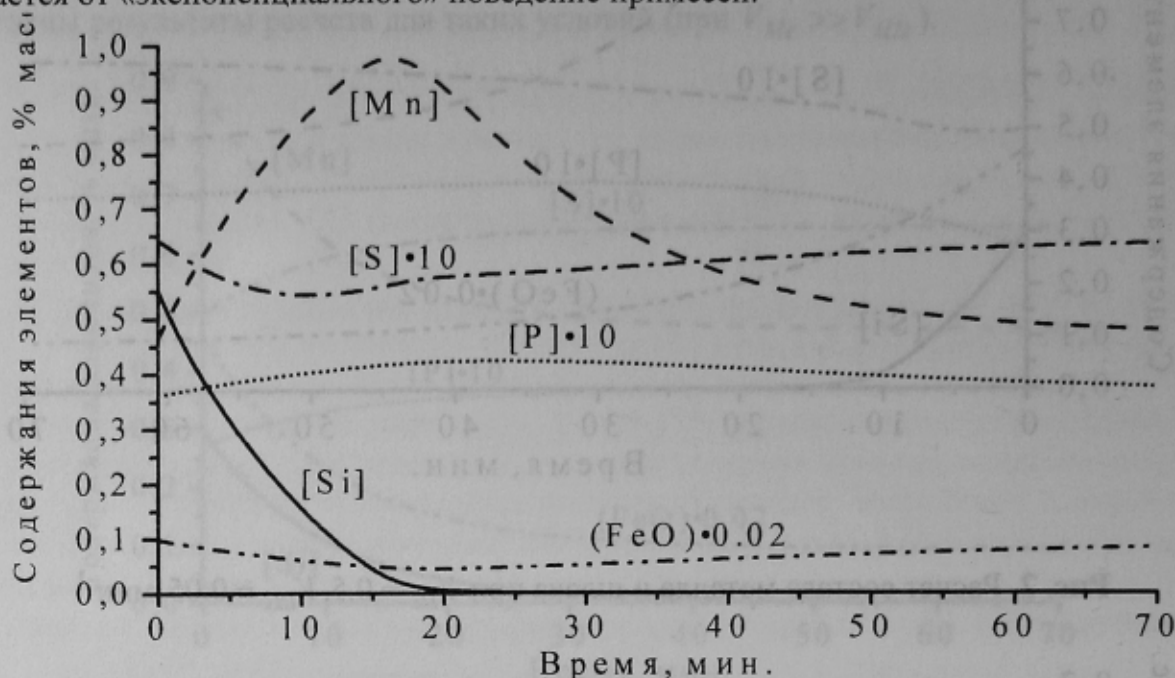


Рис. 4. Расчет состава металла и шлака при $V_{Me} = 0.5, V_{Шл} = 0.05 \text{ мин}^{-1}$

Как показали многочисленные расчеты, неидеальность фаз не является определяющим фактором, поскольку изменение способа расчета активности компонентов только незначительно сдвигает равновесное состояние, не изменяя общего хода кривых. Аналогичная ситуация и с величинами констант равновесия — их изменение влияет только на равновесный состав и не изменяет принципиально ход кривых. Кроме того, результаты численного анализа показывают, что при отличающихся V_{Me} и $V_{Шл}$ наибольшее влияние на поведение системы оказывает меньшая величина, а увеличение большей скорости сверх определенного предела практически не влияет на ход кривых.

Практической ценностью учета подобного поведения примесей может быть весьма существенной. Например, если в момент максимального содержания марганца в металле произвести отлив шлака из ковша, то можно существенно повысить усвоение марганца из ферросплавов.

Аналогичным образом может быть учтен массоперенос при вычислении распределения температуры по глубине ванны. Аналитическое решение при постоянной скорости перемешивания металла дает для $\Delta T_{12} = T_1 - T_2$ (перегрев поверхности ванны над температурой металла на подине) и для $\Delta T_1 = T_1 - T_{cp}$ (перегрев поверхности ванны над средней температурой металла) зависимости вида:

$$\Delta T_{12} = C(1 - \exp(-\tau / \tau^*)), \quad (8)$$

$$\Delta T_1 = D(1 - \exp(-\tau / \tau^*)). \quad (9)$$

где C, D, τ^* — параметры, определяемые из геометрии ванны и интенсивности перемешивания.

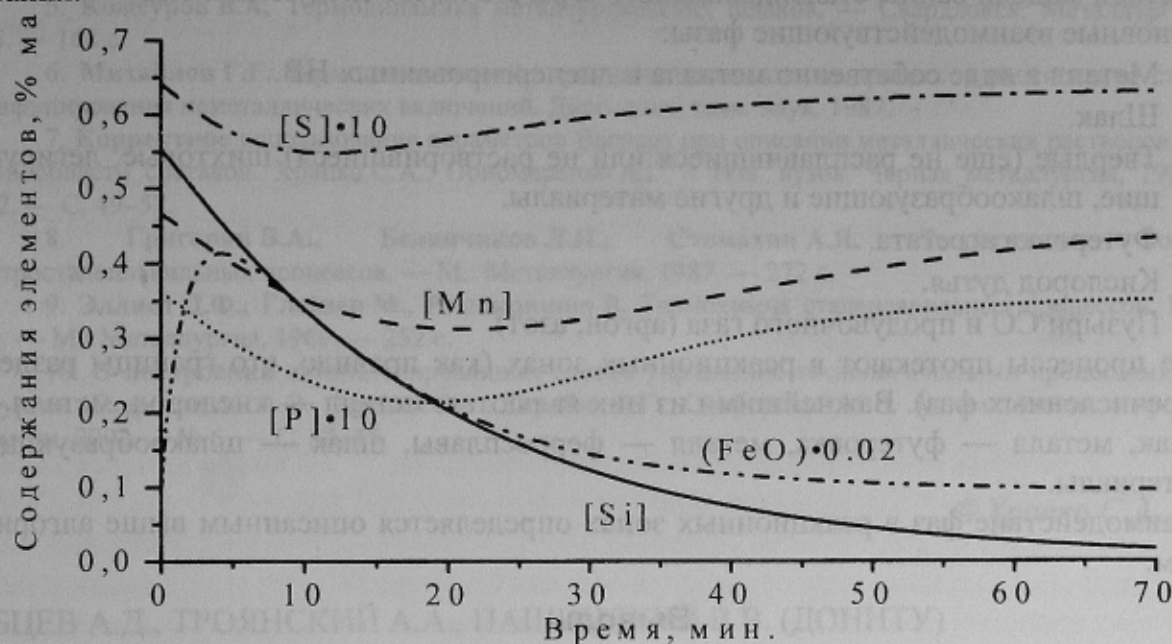


Рис. 5. Расчет состава металла и шлака при $V_{Me} = 0.05, V_{Шл} = 0.5 \text{ мин}^{-1}$

Например, расчетом получено, что в условиях дуговой сталеплавильной печи ДСП-100 перегрев может достигать $\Delta T_{12} = 70^{\circ}$, $\Delta T_1 = 56^{\circ}$ и более (в зависимости от условий), что подтверждается экспериментами.

Следующий очень важный элемент модели — гидродинамика сталеплавильной ванны, а именно, расчет интенсивности перемешивания (т.е. скоростей потоков металла и шлака). Наиболее ярко и продуктивно зависимость скоростей перемешивания металла и шлака от внешних факторов можно проиллюстрировать на примере пульсирующего окисления углерода при кипении сталеплавильной ванны. Нестационарный режим кипения нарушает ход технологического процесса, а иногда бурное вскипание приводит к аварийным выбросам шлака и металла из агрегата. В некоторых случаях окисление углерода происходит только в период пульсаций, что резко снижает технологичность и экономичность процесса плавки. Качественная картина указанного процесса впервые описана М.Я. Меджибожским [1], однако однозначного количественного объяснения причин такого поведения ванны по ходу плавки пока нет. В работе [4] приведены результаты, позволившие численно предсказать наблюдаемые особенности протекания процесса окисления углерода при кипении ванны. В основу расчета [4] положены сформулированные выше принципы, а также уравнение изменения кинетической энергии металла:

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{P - P_{mp}}{mv}, \quad (10)$$

где τ — время, с; v — скорость потоков металла, м/с; m — масса металла, кг; P_{mp} , P — мощность сил трения и перемешивающих сил (пузыри оксидов углерода; струя вдуваемого кислорода, инертный газ, вдуваемый через донные фурмы и т.д.), Вт.

Рассмотренный подход позволяет описать изменение химического состава металла и шлака практически в любом металлургическом агрегате (ДСП, конвертер, сталеразливочный ковш, установка «печь-ковш», вакууматор, промежуточный ковш и т.д.)

на основе декомпозиции протекающих в ванне процессов. Примерная структура математической модели ванны сталеплавильного агрегата имеет следующий вид:

1. Основные взаимодействующие фазы:

- Металл в виде собственно металла и диспергированных НВ.
- Шлак.
- Твердые (еще не расплавившиеся или не растворившиеся) шихтовые, легирующие, шлакообразующие и другие материалы.
- Футеровка агрегата.
- Кислород дутья.
- Пузыри СО и продувочного газа (аргон, азот).

2. Все процессы протекают в реакционных зонах (как правило, это границы раздела перечисленных фаз). Важнейшими из них являются: металл — кислород, металл — шлак, металл — футеровка, металл — ферросплавы, шлак — шлакообразующие материалы.

3. Взаимодействие фаз в реакционных зонах определяется описанным выше алгоритмом.

Выводы

Таким образом, при построении моделей для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами в металлургических агрегатах необходимо выбрать адекватные критерии равновесия и уравнения состояния металла и шлака, а также корректно учесть кинетические сдвиги от термодинамического равновесия и гидродинамику ванны. Перспективным подходом является термодинамический расчет равновесного состава в качестве основы системы прогнозирования и учёт кинетических отклонений от равновесия с использованием понятия «реакционных зон», в которых протекают все процессы.

Проведенные расчеты траектории перехода системы в равновесное состояние показывают принципиальную возможность временного изменения содержания элементов в сторону, противоположную конечному равновесному состоянию под действием потока другого элемента, что можно назвать взаимодействием потоков.

Модельный анализ гидродинамики сталеплавильной ванны позволил впервые численно предсказать некоторые наблюдаемые особенности протекания процессов, например, пульсирующее окисление углерода при кипении ванны.

На основе проведенных исследований построена компьютерная система моделирования «АСУТП – ОРАКУЛ» для автоматического проектирования и управления технологическими процессами выплавки и внепечной обработки стали [10]. Система реализована на Молдавском (г. Рыбница) и Белорусском (г. Жлобин) металлургических заводах, прошла промышленное опробование, внедрена и дала существенный экономический эффект, выражающийся в стабилизации режима, снижении продолжительности плавки, расхода электроэнергии и металлолома на тонну годного.

Список литературы

1. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. — Киев; Донецк: Вища школа, 1986. — 280 с.

2. Развитие теории и математической модели кислородно-конвертерной плавки. Капустин Е.А., Сущенко А.В. Вопросы теории и практики сталеплавильного производства: Науч. тр. / ММИ. — М.: Металлургия, 1991. — С. 57–73.

3. Математическое моделирование влияния процессов массообмена на критическую концентрацию углерода при его окислении в сталеплавильной ванне. Яковлев Ю.Н., Величко А.Г., Камкина Л.В. Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах. Материалы VI Международной научно-технической конференции. Мариуполь, ПГТУ, 2000. — С. 41–44.

4. **Термодинамика** и кинетика взаимодействия фаз при внепечной обработке. Храпко С.А. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2002. — № 10. — С. 121–123.
5. **Кожеуров В.А.** Термодинамика металлургических шлаков. — Свердловск: Metallurgizdat, 1955. — 164 с.
6. **Михайлов Г.Г.** Термодинамические принципы оптимизации процессов раскисления стали и модифицирования неметаллических включений. Дисс. докт. техн. наук. 1987.
7. **Корректное** использование параметров Вагнера при описании металлических растворов в широкой области составов. Храпко С.А., Пономаренко А.Г. // *Изв. вузов. Черная металлургия*, 1991. — № 12. — С. 49–52.
8. **Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я.** Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1987. — 272 с.
9. **Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В.** Термохимия сталеплавильных процессов: Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1969. — 252 с.
10. **О построении** автоматизированных систем управления технологическими процессами в металлургии. Старососцкий А.В., Храпко С.А., Скрыбин В.Г., Самборский М.В. *Автоматизация в промышленности*, 2003. — № 6. — С. 32–35.

© Храпко С.А., 2003

РЯБЦЕВ А.Д., ТРОЯНСКИЙ А.А., ПАШИНСКИЙ В.В. (ДОННТУ)

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ НЕОДИМ-ЖЕЛЕЗО-БОР В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ЭШП

Показана принципиальная возможность получения сплавов неодим-железо-бор в камерных печах ЭШП при использовании флюсов системы $\text{CaF}_2 - \text{Ca}$, Установлена возможность осуществлять одновременное плавление сплава необходимого состава и легирование его редкоземельными металлами (РЗМ) путем восстановления их из оксидов.

В XIX веке сделаны открытия о связи между электричеством и магнетизмом. Эти открытия положили начало веку электричества и вызвали применение постоянных магнитов для создания стабильных магнитных полей в электроизмерительных приборах. Важность использования постоянных магнитов в настоящее время очевидна. Их применение охватывает все области современной науки, промышленности и быта [1].

За последние годы появилось большое количество коммерчески доступных соединений РЗМ с заданной степенью чистоты. Наличие лантаноидов увеличивает количество элементов, которые можно использовать при получении магнитных материалов. Исследования магнитных свойств соединений лантаноидов развивается ускоренными темпами и еще трудно оценить потенциальные возможности использования этих материалов.

РЗМ и элементы группы железа обладают ограниченной взаимной растворимостью. Двойные диаграммы их изобилуют интерметаллидными соединениями, количество которых увеличивается по мере возрастания атомного числа компонентов. Эти диаграммы состояния достаточно сложны. Большинство из них построено по данным ряда параллельно проведенных работ разных авторов. Приведенные в литературе данные, относящиеся к характеристикам соединений, обладающих высокими магнетическими свойствами, носят не всегда определенный характер. Однако предварительно можно рассмотреть свойства соединений пригодных для постоянных магнитов. Сплавы для постоянных магнитов должны быть ферро- или ферримагнитными с относительно высокой точкой Кюри (больше 400°C), анизотропны, обладать кристаллической текстурой, которая определяет высокую кристаллографическую анизотропию в сочетании с высокой магнитной анизотропией [2].