

Кинетика взаимодействия фаз в сталеплавильных агрегатах

С. А. Храпко

Донецкий Национальный Технический Университет, г. Донецк

Термодинамика и кинетика взаимодействия металла и шлака в сталеплавильных агрегатах изучались большим количеством исследователей. Значительное количество работ посвящено анализу перехода химических элементов через межфазную границу и 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. 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. Движущей силой потока компонента из одной фазы в другую принимается разность текущей и равновесной концентраций (или активностей). Коэффициент молекулярной диффузии заменяется "эффективным" коэффициентом диффузии (коэффициент "турбулентной" диффузии). Получаемые в результате одно- и двумерные системы дифференциальных уравнений имеют высокую вычислительную сложность при описании реальных процессов.

Мы предлагаем следующий способ расчета: считаем, что поверхностные слои металла и шлака находятся в равновесии. За счет конвективных потоков в объемах фаз через некоторое время эти поверхностные слои заменяются новыми порциями металла и шлака, между которыми снова рассчитываем равновесие. Выводимые поверхностные слои поступают в основные объемы металла и шлака, где они усредняются. После этого весь расчет повторяется.

Скорости обновления поверхностных слоев металла и шлака характеризуются соответствующими постоянными времени T_{Me} и $T_{Шл}$. Аналитический расчет траектории перехода системы в равновесное состояние при $T_{Me} = T_{Шл}$ дает классические экспоненциальные зависимости приближения системы к равновесию, как и диффузионные модели. Например, при $(m_{[i]})_{\tau=0} = 0$ получим

$$m_{[i]} = m_{[i]}^{равновесн} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) \right). \quad (1)$$

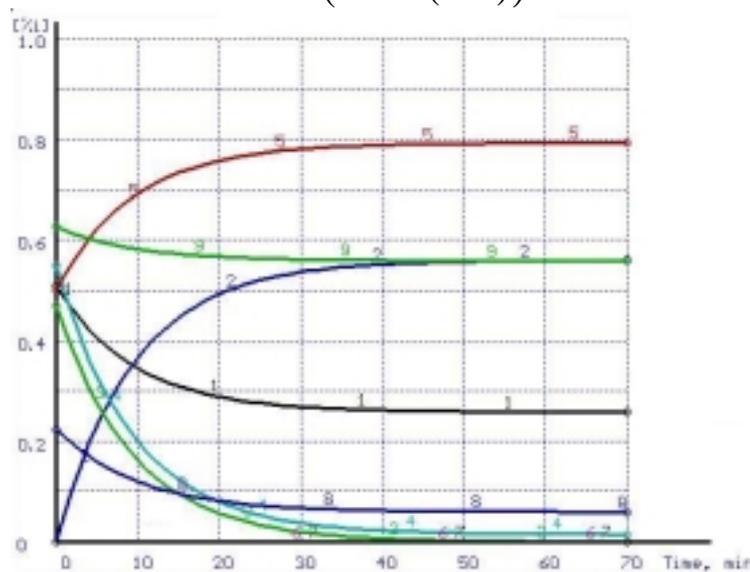


Рис 1. Результаты расчета при $T_{Me} = T_{Шл} = 10$ мин. Цифры у кривых: 1 – [%Mn], 2 – [%O]*10, 3 – [%Si]*2, 4 – [%P]*20, 5 – [%S]*5, 8 – (FeO)*0.01, 9 – $M_{Шл}/M_{Me}$ *0.05.

Для ДСП приблизительно $T \approx 2 \div 10$ мин (см. рис. 1). Интересно, что такое экспоненциальное поведение состава металла и шлака наблюдается только при $T_{Me} = T_{Шл}$. В противном случае возможен временный «переход» содержания некоторых элементов через равновесное состояние (см. рис. 2).

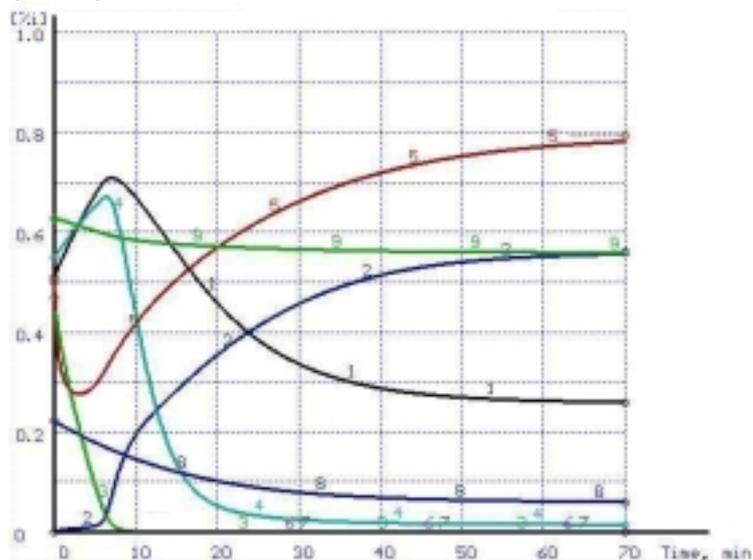


Рис 2. Результаты расчета при $T_{Me} = 1$ мин, $T_{Шл} = 10$ мин (обозначения см. рис.1).

Вообще говоря, используемые в кинетике коэффициенты "турбулентной диффузии" являются попыткой учесть глобальный массоперенос в рамках классических диффузионных уравнений. Однако отличная от диффузии природа рассматриваемых явлений приводит в некоторых случаях к совершенно иным зависимостям. В диффузионных уравнениях невозможен переход через равновесное состояние. У химических элементов нет "инерции", поэтому при достижении равновесной концентрации происходит исчезновение движущей силы. Кроме того, при индивидуальной диффузии не может быть взаимного влияния компонентов и их потоков друг на друга.

Для численной проверки проведен расчет траектории перехода системы в равновесное состояние при следующих исходных данных: раскисленный металл с высоким содержанием кремния и марганца взаимодействовал с окисленным шлаком с высоким содержанием оксида марганца. В результате в начальный период времени содержание марганца увеличилось, хотя равновесное содержание марганца в рассматриваемой системе было ниже исходного содержания в металле (см. рис. 3-4).

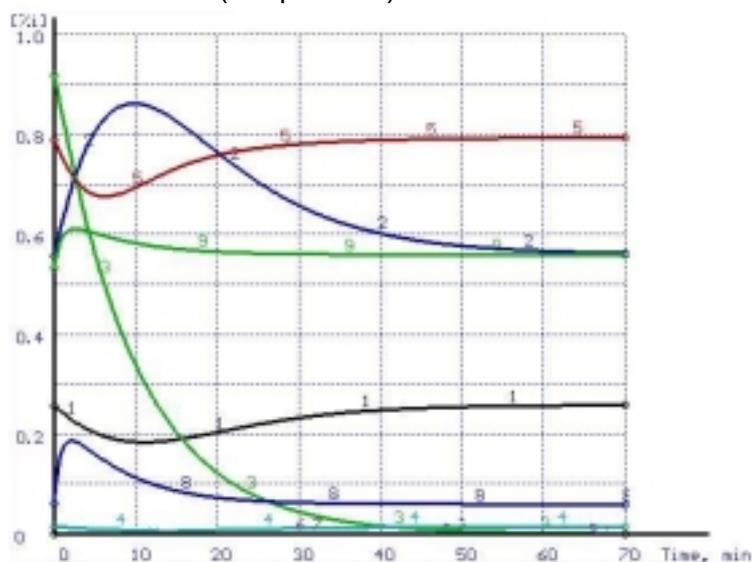


Рис 3. Результаты расчета при $T_{Me} = 10$ мин, $T_{Шл} = 1$ мин (обозначения см. рис.1).

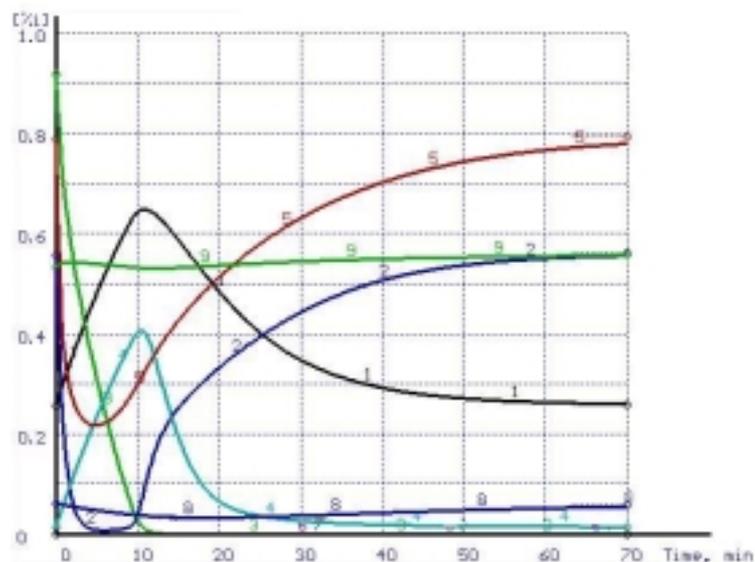


Рис 4. Результаты расчета при $T_{Me} = 1 \text{ мин}$, $T_{Шл} = 10 \text{ мин}$ (обозначения см. рис.1).

Несмотря на кажущееся противоречие, такое "антиравновесное" поведение марганца легко объясняется высоким содержанием кремния в металле в этот же интервал времени: пока содержание кремния не снизилось до равновесных значений, идет восстановление марганца и фосфора из шлака. После выгорания кремния процесс перехода марганца и фосфора обращается и происходит их снижение до равновесных значений. Таким образом, возникает эффект взаимодействия потоков.

Разработанная модель используется в системе прогноза химического состава металла и шлака. Она предназначена для автоматического управления выплавкой стали в ДСП. Система показала высокую точность, которая позволяет выпускать металла из печи без взятия пробы.