

Таким образом, в результате анализа и экспериментальных исследований, разработана имитационная модель взаимосвязанных электроприводов транспортирующих роликов средней технологической части ЛНГЦ, учитывающая основные факторы, влияющие

на динамические и статические свойства полосы обрабатываемого металла как объекта управления.

Полученные результаты предназначены для оптимизации режимов работы ЛНГЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ющенко О.А. Экспериментальные исследования натяжения в электромеханической системе печи термохимической обработки // Тр. ун-та. Вып. № 4. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2008. С. 77-79.
2. Сивякова Г.А. Взаимосвязанный электропривод агрегата непрерывного отжига : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.06.2007. Алматы: АИЭС, 2007. 24 с.
3. Дьяконов В.И. Simulink 5/6/7: Самоучитель. М. : ДМК-Пресс, 2008. 784 с. : ил.

УДК 669.054
КИМАНОВ Б.М.

Исследование механизма фильтрационного рафинирования стали от растворённого кислорода

В последние годы в металлургии и литейном производстве стран Европы, США, Японии, России, Китая и др. всё большее применение находит фильтрационный метод, обеспечивающий высокую степень рафинирования металлов и сплавов. Суть этого метода состоит в пропускании металлического расплава через специальное устройство (фильтр), при прохождении через который в результате физико-химических, адсорбционных, механических и др. явлений происходит его очищение от шлаковых, неметаллических, интерметаллидных, газовых включений и от вредных примесей.

Используемые фильтры конструктивно можно разделить на две группы: двумерные и объёмные. Первые являются достаточно распространённым видом фильтров и представляют собой сетку (пластину) из керамики или стекловолокна. Такие фильтры очищают металл главным образом от крупных включений экзогенного характера, размер которых больше размеров отверстий в сетке. В этом случае фильтр выполняет роль механического сита (сетки), в связи с чем рафинирующий эффект называют ситовым или сеточным, а процесс очистки - поверхностным [1, 3]. В целом, при фильтровании через двумерные фильтры характерным является малая зависимость его результатов от характера движения расплава через фильтр, невозможность повышения рафинирующего эффекта за счет явлений адгезии, адсорбции, химических реакций и т.д., ввиду малой массы реагирующего материала и поверхности контакта расплава с фильтром.

Более эффективными являются объёмные фильтры, отличительной особенностью которых является большая поверхность их контакта с металлом в процессе его фильтрации и наличие длинных и тонких межзёрненных каналов переменного сечения, что обуславливает удаление из расплава как крупных, так и мелких включений [1]. Объёмный фильтр представляет собой либо слой гранул (кусков) фильтрующего материала определённого размера и толщины (высоты), размещённых в заливочной воронке, либо цельный блок из керамики. Кусковой фильтр определённого размера получают путем дробления огнеупорного материала с последующим его просеиванием. Фильт-

рующие элементы в виде гранул получают или путем окатывания соответствующих порошков, или прессованием. Окатыванием можно получить фильтрующие элементы практически любого размера из смеси различных материалов, в т.ч. содержащих раскислители, модификаторы, легкоплавкие компоненты, которые повышают рафинирующую способность фильтра. При этом гранулы могут быть двухслойными (плакированными), что позволяет использовать для изготовления внутреннего ядра окатыша более дешёвый и недефицитный огнеупорный материал, а наружный слой на нем формировать из специального (в зависимости от фильтруемого расплава) адгезионно-активного состава, обеспечивающего его высокую рафинирующую способность.

Несмотря на то, что мелкодисперсные включения имеют размер значительно меньше размеров проходного канала фильтра, а значит, по геометрическим факторам они должны свободно проходить через него, часть этих включений, достигающих поверхности фильтра, задерживаются им, вследствие действия на контактной поверхности адгезионных сил. Этот рафинирующий эффект, обусловленный прилипанием мелких включений к поверхности фильтра, называют адгезионным [1]. Процесс этот реализуется по всей поверхности фильтра, контактирующей с расплавом. Поэтому увеличение удельной поверхности фильтра, в том числе за счет его утолщения (увеличения высоты фильтра), способствует повышению степени очистки расплава. В объёмных фильтрах с развитыми поровыми каналами включения задерживаются на их внутренних поверхностях, поэтому процесс адгезионной очистки называют также процессом внутренней фильтрации [2].

Таким образом, механизм фильтрационного рафинирования металлических расплавов связывают главным образом с улавливанием взвешенных в расплаве неметаллических включений. При этом общий рафинирующий эффект фильтрования (Эф) представляется как сумма сеточного (Эсет) и адгезионного (Эадг) эффектов:

$$\text{Эф} = \text{Эсет} + \text{Эадг}. \quad (1)$$

Однако имеются термодинамические и кинетические предпосылки для эффективной фильтрационной очистки расплава не только от неметаллических частиц, находящихся в металле во взвешенном состоянии, но и от *растворенных* примесей, а именно [3]:

1. Неравновесное состояние расплава, оцениваемое степенью химического пересыщения $\alpha > 1$;

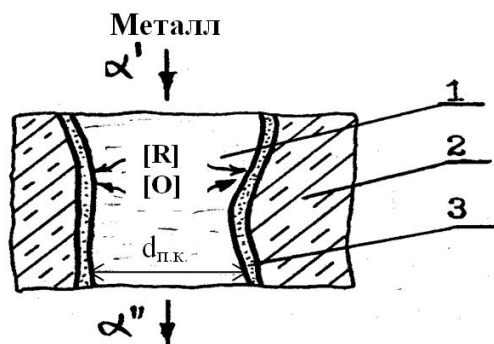
2. Предпочтительность реализации реакции связывания растворённой примеси на готовых подложках, в качестве которых может выступать поверхность фильтра;

3. Дробление потока расплава на тонкие струйки и развитая поверхность контакта расплава с фильтром, что обеспечивает интенсивную доставку компонента R и растворённой примеси к реакционной поверхности.

Предлагаемый механизм осаждения неметаллической фазы на поверхности фильтра можно назвать *подложечным* (подкладочным), поскольку фильтр выполняет роль подложки (подкладки), на которой реализуется реакция связывания растворённого кислорода [O] активным к ней элементом R:



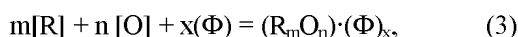
и выделение продукта реакции в виде неметаллической фазы (R_mO_n) на его поверхности (рисунок 1).



1 – жидкая сталь, содержащая растворенные в ней кислород [O] и связывающий его элемент [R];
2 – фильтрующие элементы; 3 – продукт реакции связывания кислорода в неметаллическую фазу;
 $d_{п.к.}$ – размер порового канала фильтра; α' и α'' – степени химического пересыщения нефильтрованного и фильтрованного расплавов, соответственно ($\alpha'' < \alpha'$)

Рисунок 1 – Схема подложечного механизма фильтрационного рафинирования стального расплава от растворённого кислорода

Поскольку связывание растворённого кислорода в неметаллическую фазу происходит не в объеме расплава, а непосредственно на поверхности фильтра, то последний может участвовать в поверхностной реакции с образованием сложной неметаллической фазы, т.е. вместо реакции (2) может реализоваться следующая:



где Φ – условное обозначение материала фильтра.

Активность R_mO_n в неметаллической фазе $(R_mO_n) \cdot (\Phi)_x$ будет ниже, чем при реализации реакции (2), следовательно в этом случае при фильтровании

расплава возможно достижение более глубокой степени рафинирования.

Таким образом, в расплаве в присутствии достаточного количества компонента R, создаются термодинамические условия для связывания части растворённого кислорода в неметаллическую фазу. Однако известно, что равновесие в реальных условиях практически не достигается, т.е. фактическое содержание растворённого кислорода всегда больше расчетного (равновесного), т.е. в расплаве остается избыточная часть кислорода в растворённом состоянии, которая потенциально может быть связана в неметаллическую фазу. Эта сверхравновесно растворенная часть кислорода может задерживаться фильтром за счет реализации *подложечного* механизма, т.е. за счёт связывания его в неметаллическую фазу на поверхности фильтра как на готовой подложке.

Таким образом, в выражение (1) можно ввести ещё одну величину и тогда общий рафинирующий эффект фильтрования будет равен:

$$\mathcal{E}_\Phi = \mathcal{E}_{сет} + \mathcal{E}_{адг} + \mathcal{E}_п, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_{сет}$, $\mathcal{E}_{адг}$, $\mathcal{E}_п$ – соответственно сеточный, адгезионный и подложечный рафинирующие эффекты.

Чем большая часть примеси будет связана в неметаллическую фазу к началу фильтрования, тем существеннее становится роль сеточного ($\mathcal{E}_{сет}$) и (или) адгезионного ($\mathcal{E}_{адг}$) рафинирующих эффектов. С увеличением степени пересыщения расплава возрастает роль подложечного механизма процесса его фильтрования.

Экспериментально подложечный эффект можно зафиксировать с помощью датчиков окисленности – твердоэлектродных кислородно-концентрационных элементов [4] путем контроля *активности* растворённого кислорода в процессе фильтрования или моделирования этого процесса.

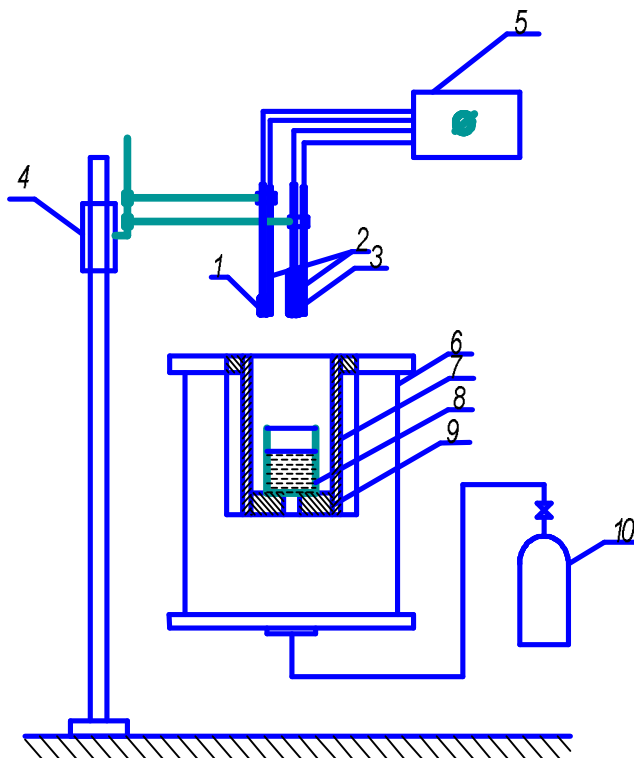
При постановке эксперимента исходили из того, что при постоянной температуре и неизменном составе металла изменение концентрации растворённого в нём кислорода эквивалентно изменению его активности. Для фиксации изменения активности кислорода в расплаве использовали методику непрерывного ее измерения активометрами методом ЭДС. Значения ЭДС датчиков фиксировали потенциометром КСП-4. Температуру расплава измеряли термопарой ВР 5/20, а также ПП 30/6. При этих условиях относительная систематическая ошибка косвенного измерения активности составляет $\pm 5\%$, а случайная ошибка определения не превышает $\pm 4\%$. Схема установки для выявления подложечного механизма фильтрованно-го рафинирования приведена на рисунке 2.

Эксперименты по выявлению подложечного механизма рафинирования растворённого кислорода проводили при моделировании процесса фильтрования по методике, представленной ниже.

В качестве объекта исследования использовали сталь марки 08КП следующего химического состава: C=0,047 %, Si=0,012 %, Mn=0,36 %, P=0,014 %, S=0,011 %, Al<0,005 %. Температуру расплава с помощью задатчика, включённого в электрическую цепь печи, поддерживали постоянной в течение опыта на

уровне 1570 °С. Плавки проводили в инертной атмосфере аргона. Материалом фильтра служили кварцевые и алундовые трубки.

После расплавления стали в печи Таммана (6) в тигель с расплавом (8) опускали активометр (1) с токосъёмником (2) с целью определения исходной активности кислорода ($E_{исх.}$) с помощью самопишущего потенциометра (5). После чего в расплав на ту же глубину вводили модель фильтра (3) в виде пакета из огнеупорных трубок с активометром внутри с последующим замером ЭДС ($E_{ф}$).



1 – активометр; 2 – токосъёмник молибденовый;
3 – трубки из фильтрующего материала с активометром внутри; 4 – механизм подъёма и опускания датчиков и фильтров; 5 – потенциометр КСП-4; 6 – печь сопротивления Таммана; 7 – нагреватель; 8 – тигель алундовый с металлом; 9 – подставка; 10 – баллон с аргоном
Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для фиксации изменения активности кислорода в расплаве при контакте его с материалом фильтра

На рисунке 3 приведены потенциограммы изменения активности кислорода (E мВ) в стали до и после контакта расплава с фильтрами из SiO_2 и Al_2O_3 .

По полученным значениям ЭДС (в мВ) рассчитывали активность кислорода в % масс. [4]:

$$\lg a_{[O]} = 2,685 - \frac{10,087E + 5660}{T}, \quad (5)$$

где $a_{[O]}$ – активность растворенного кислорода, % масс;
 E – величина ЭДС активометра, мВ;
 T – температура расплава, К.

Полученные усреднённые значения активности кислорода в мВ и % масс. приведены в таблице.

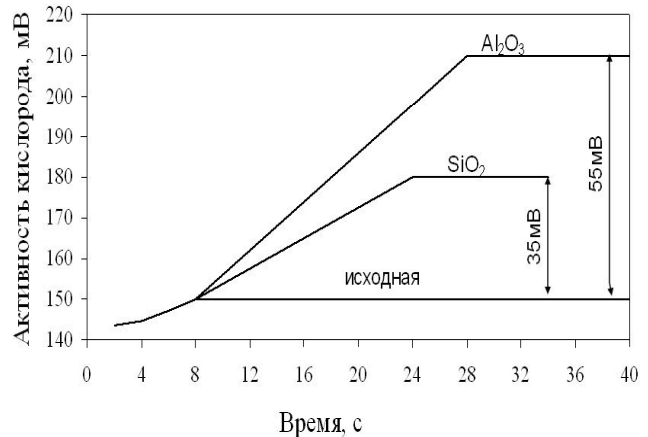


Рисунок 3 – Влияние материала фильтра на изменение активности кислорода в стали 08КП

Активность кислорода в стали до и после контакта с материалом фильтра

Вариант	Активность кислорода		Эффективность рафинирования, %
	E , мВ	$a_{[O]}$, % масс.	
1. Исходный металл (без фильтра)	150	0,062	-
2. Фильтр SiO_2	185	0,040	35,5
3. Фильтр Al_2O_3	205	0,033	46,5

Как видно из приведенной таблицы, концентрация растворенного в стали кислорода при контакте с фильтрами из SiO_2 и Al_2O_3 снижается на 35,5 и 46,5 % соответственно, что доказывает существование подложечного механизма рафинирования стали от растворенного кислорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдюмов А.В., Инкин С.В., Чулков В.С. и др. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов. М.: Металлургия, 1980. 196 с.
2. Apelian D., Mutharasan R., Alis Removal of inclusions from steel melts by filtration // J. of natevials science. 1985. V. 20. №10. P. 3501-3514.
3. Тен Э.Б., Киманов Б.М., Ким В.А. и др. Фильтрационное рафинирование металлических расплавов от растворённой примеси // Труды междунар. научно-практ. конф. «Инновационная роль науки в подготовке современных технических кадров». Караганда: КарГТУ, 2008. С. 327-330.
4. Лузгин В.П., Зинковский И.В., Подкидышев В.В., Иванов А.А. Кислородные зонды в сталеплавильном производстве. М.: Металлургия, 1989. 144 с.