

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ СТАЛИ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Б.И. Басок (ИТТФ НАНУ, г. Киев), Ю.Л. Курбатов, Е.В. Новикова,  
Т.А. Лазаренко, Т.В. Тарасова (ДонНТУ, г. Донецк)**

*Представлена методика определения предэкспоненциального множителя  $K_0$  в уравнении Аррениуса для вычисления константы окалинообразования. Получена эмпирическая зависимость  $K_0$  от температуры и электрического потенциала, что дает возможность рассчитывать величину угара металла при нагреве в металлургических печах с применением электрофизического воздействия.*

Ресурсо- и энергосбережение являются приоритетными направлениями в Украине в различных отраслях промышленности, особенно в металлургии и машиностроении. Необходимость подвергать металл высокотемпературному нагреву перед дальнейшей обработкой приводит к значительным потерям в окалину (угару металла); в некоторых случаях при многократном нагреве суммарный угар может достигать 8 %. Изначально высокая стоимость стали и затраты, связанные с удалением окалины для обеспечения соответствующего качества поверхности, являются стимулом для усовершенствования существующих и разработки новых технологий и оптимальных режимов нагрева для уменьшения окалинообразования.

Уменьшение угара стали возможно различными способами, которые известны и широко применяются в практике высокотемпературного нагрева. Сведения о влиянии постоянного электрического поля на тепломассообменные процессы, происходящие при высокотемпературном окислении стали, достаточно ограничены, что обусловило дальнейшее изучение и исследование этого направления [1]. Знание механизма окалинообразования и влияние на этот процесс постоянного электрического поля представило возможность предложить усовершенствование технологии нагрева стали в нагревательных печах за счет уменьшения потерь металла в окалину. В результате экспериментальных исследований, проведенных как в лабораторных так и заводских условиях авторами установлены качественные и количественные характеристики влияния постоянного электрического поля на тепломассообменный процесс окалинообразования при окислении металла, нагреваемого в атмосфере воздуха и продуктов сгорания топлива и разработаны практические рекомендации по усовершенствованию технологии высокотемпературного нагрева стали в нагревательных печах.

Целью работы является выявление зависимости предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса для определения константы окалинообразования в зависимости от температуры и электрического потенциала.

Экспериментально доказано [1], что применение электрофизического воздействия путем подачи отрицательного электрического потенциала к металлу способствует замедлению массообменных процессов в системе  $Fe - FeO - Fe_3O_4 - Fe_2O_3 - O_2$  при нагреве стальных образцов в окислительной атмосфере, вследствие чего уменьшается угар железа, т.е. снижаются потери металла в окалину. В результате компенсации избыточного положительного заряда, образующегося в результате присоединения электронов из оксида железа к кислороду и образования вакансий, внешним отрицательным зарядом электрохимический градиент потенциала в слое окалины стремится к нулю, а реакционное сопротивление первичного слоя оксида, полученного путем хемосорбции, увеличивается, за счет чего происходит снижение скорости диффузии кислорода к металлу через слой окалины.

В экспериментах гравиметрическим методом исследовано изменение массы (привес) опытных образцов за счет присоединения кислорода из атмосферы (воздуха)  $g_{O_2}$  кг/м<sup>2</sup>, в зависимости от значения электрического потенциала  $\varphi$ , В, и температуры  $t$ , °С. В теории окисления сплавов железа [2] окалинообразование рассматривается как диффузионный процесс, и зависимость привеса от времени определяется уравнением Таммана:

$$g_{O_2}^2 = K\tau \quad (1)$$

где  $\tau$  - время, с;

$K$  – константа окалинообразования, (кг<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>с), которая может быть определена из уравнения Аррениуса:

$$K = K_0 \exp(-Q/RT), \quad (2)$$

при условии, что известны значения предэкспоненциального множителя  $K_0$  и энергии активации  $Q$ , Дж/г-атом.

Так, в ходе экспериментальных исследований получено уменьшение угара металла за счет ЭФВ минимум на 20 %, что может быть учтено введением поправочного сомножителя  $A$  в уравнение Аррениуса. Эмпирическим путем определены константы окалинообразования  $K$  с различными потенциалами электрического поля в диапазоне 0...-30 В, что позволило рассчитать величину угара металла при нагреве с применением электрофизического воздействия, где  $K = AK_0 \exp(-Q/RT)$ , где  $A$  – поправочный сомножитель: при  $\varphi = 0$  В  $A = 1$ ; при  $\varphi = -30$  В  $A = 0,6$ .

Зависимость  $K = f(\varphi, t)$ , полученная из выражения (1) по эксперимен-

тально определенному привесу для стали 20 с энергией активации  $Q=55970$  Дж/г-атом, приведена на рис. 1. Экспериментальные значения  $K_0$ , определенные по уравнению (2) усреднением результатов более 200 опытов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные значения предэкспоненциального множителя  $K_0$ ,  $10^{-2}$  кг/(м<sup>4</sup>с)

$\varphi$ , В \ $t$ , °С	950	1000	1050
0	0,568	0,834	1,093
-30	0,402	0,536	0,645

На рис.2 приведена зависимость  $K_0=f(\varphi, t)$ , из которой видно, что  $K_0$  не является постоянной величиной, как это принято считать, и зависит не только от уровня электрофизического воздействия ( $\varphi$ ), но и от температуры ( $t$ ).

Зависимость  $K_0=f(\varphi, t)$ , представляется возможным найти в виде выражения:

$$K_0=K_{\varphi=0} - a_{\varphi}\varphi, \quad (3)$$

где  $a_{\varphi}$  - коэффициент влияния электрического поля кг/(м<sup>4</sup>·с·В).

Полученные зависимости  $K_{\varphi=0}=f(t)$  и  $a_{\varphi}(t)$  приведены на рис. 3, 4, а эмпирическая зависимость  $K_0=(\varphi, t)$  имеет вид:

$$K_0=((0,834+5,25 \cdot 10^{-3}(t-100)-1,4 \cdot 10^{-6} \cdot (t-1000)^2)-0,0093+ \\ +0,096 \cdot 10^{-3} \cdot (t-1000)+0,08 \cdot 10^{-6} \cdot (t-1000)^2) \cdot \varphi \cdot 10^{-2}, \text{ кг}/(\text{м}^4 \cdot \text{с}) \quad (4)$$

Таким образом, в работе представлена методика определения предэкспоненциального множителя  $K_0$  в уравнении Аррениуса для вычисления константы окалинообразования в расчетах массы присоединенного кислорода и потерь металла в окалину при нагреве стальных образцов в атмосфере воздуха, а также получена эмпирическая зависимость  $K_0$  от температуры и электрического потенциала.

Анализ результатов экспериментов, проведенных в атмосфере воздуха и в среде продуктов сгорания, позволяет ввести понижающий поправочный коэффициент  $A$  в уравнении Аррениуса для учета электрического поля, который составляет 0,6 для исследованных углеродистых марок сталей (20, 40, 45) при  $\varphi=-30$  В. Уточнение значения понижающего коэффициента возможно при расширении экспериментальной базы.

*Перечень обозначений:*  $\tau$  - время, с;  $t$  – температура, °С;  $T$  – температура, К;  $Q$  – энергия активации, Дж/г-атом;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль\*К);  $K$  - константа окалинообразования, кг<sup>2</sup>/(м<sup>4</sup>с);  $K_0$  –

предэкспоненциальный множитель,  $\text{кг}^2/(\text{м}^4\text{с})$ ;  $\varphi$  – электрический потенциал, В;  $g_{O_2}$  – удельный привес кислорода,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $a_\varphi$  – коэффициент влияния электрического поля  $\text{кг}/(\text{м}^4\cdot\text{с}\cdot\text{В})$ .

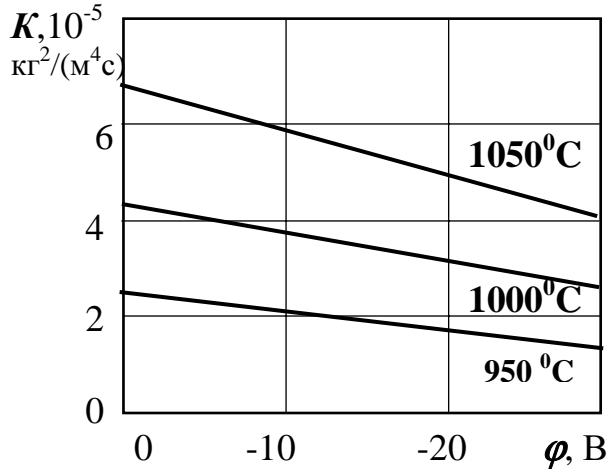


Рисунок 1 – Зависимость константы окалинообразования от электрического потенциала и температуры

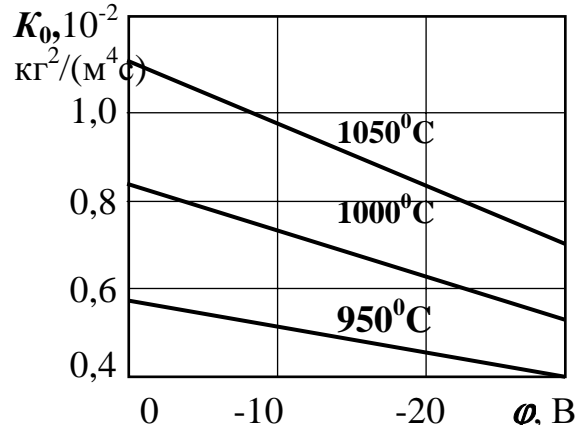


Рисунок 2 – Зависимость предэкспоненциального множителя от электрического потенциала и температуры

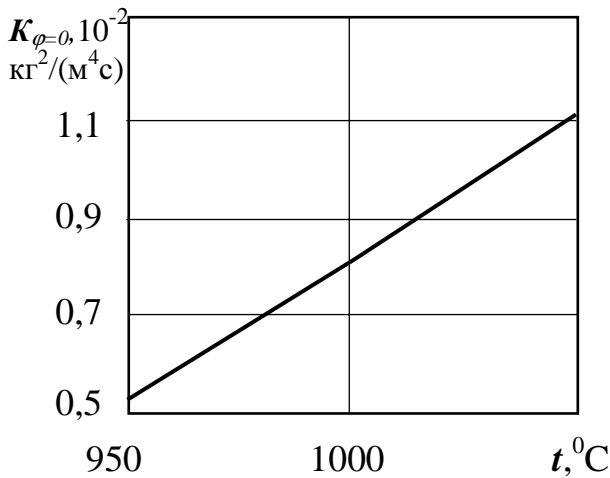


Рисунок 3 – Изменение предэкспоненциального множителя в зависимости от температуры без приложения ЭФВ

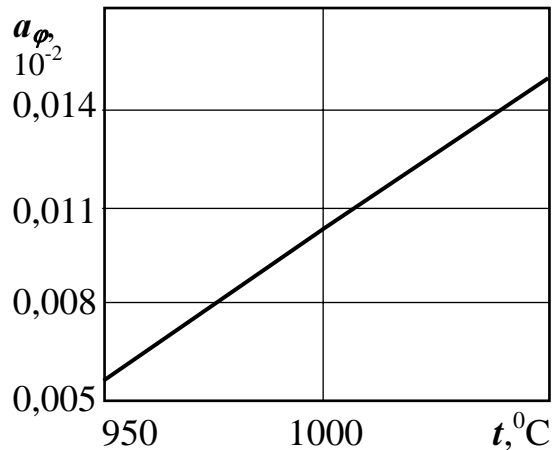


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента влияния электрического поля от температуры

### Литература

1. Новікова О.В. Зменшення окалиноутворення при нагріванні сталевих заготовок: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К., 2006. – 20 с.
2. Окисление металлов / Под ред. Ж.Бенара. – М.: Metallurgy, 1968. – Т.1. – 500 с.

© Басок Б.И., Курбагов Ю.Л., Новикова Е.В., Лазаренко Т.А., Тарасова Т.В. 2007