



*The regularities of forming scale on the surface of metal during heating in high-temperature open-flame furnaces are given. Application of the magistral asymptotic optimization method for optimal thermal technologies designing in respect of scaling is grounded.*

С. М. КОЗЛОВ, В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, БГПА,  
В. В. ФИЛИППОВ, РУП "БМЗ", П. Э. РАТНИКОВ, БГПА

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ОКИСЛЕНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ НАГРЕВЕ В ПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ

УДК 669.012.9

Окисление стали — результат высокотемпературного взаимодействия металла с воздухом и продуктами сгорания топлива. Учитывая тот факт, что в технологическом процессе прохождения от слитка до конечного продукта заготовка неоднократно подвергается термической обработке, потери металла с окалиной могут составлять до 3—3,5% от общей массы нагреваемого металла.

Авторы [1] выделяют ряд негативных явлений, вызываемых окислением металла:

1) снижение доли годного металла в общей массе за счет угара стали;

2) разрушение огнеупорных материалов нагревательных печей окалиной с образованием сварочного шлака, что приводит к появлению бугров на подинах печей, затрудняет технологический процесс и увеличивает простой оборудования;

3) ускорение износа инструментов окалиной при операциях обработки металла давлением;

4) дополнительные потери металла, вызванные необходимостью удаления образовавшейся окалины с поверхности металла;

5) появление брака вследствие заковывания или закатывания окалины в металл, неравномерности закалки стали при неоднородной окалине;

6) уменьшение размеров нагреваемых изделий по причине окалинообразования;

7) необходимость в дополнительных производственных площадях и оборудовании для борьбы с последствиями окисления.

Поэтому снижение величины окисления стальных слитков позволяет увеличить выход годного металла, понизить непроизводительные потери теплоты и расходы за межремонтный период эксплуатации печи и, как следствие, повысить качество выпускаемой продукции и уменьшить ее себестоимость.

В ходе проведения многочисленных экспериментов различными авторами установлено, что динамика процесса окисления зависит от времени нагрева, температуры поверхности слитка, химико-кинетических параметров взаимодействия ме-

талла с окружающей средой, параметров массообмена между металлом и средой.

При неизменном составе окружающей среды и постоянной температуре поверхности слитка установленные опытным путем зависимости прироста толщины окалины от времени могут быть описаны дифференциальным уравнением [1]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\sum_{i=0}^n b_i \omega^i}, \quad \omega > 0,$$

где  $\omega$  — толщина слоя окалины;  $t$  — время;  $b_i$  — некоторые коэффициенты.

При  $n = 0$ ,  $b_0 = k_1$  получаем линейный закон

$$k_1 \omega = t + c_1;$$

при  $n = 1$ ,  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 2k_2$  — параболический (закон квадратного корня)

$$k_2 \omega^2 = t + c_2;$$

при  $n = 1$ ,  $b_0 = k_1$ ,  $b_1 = 2k_2$  — полный параболический закон (параболический)

$$k_2 \omega^2 + k_1 \omega = t + c_2';$$

при  $n = 2$ ,  $b_0 = b_1 = 0$ ,  $b_2 = 3k_3$  — кубический (закон корня кубического из времени)

$$k_3 \omega^3 = t + c_3;$$

при  $n = 2$ ,  $b_0 = k_1$ ,  $b_1 = 2k_2$ ,  $b_2 = 3k_3$  — полный кубический

$$k_3 \omega^3 + k_2 \omega^2 + k_1 \omega = t + c_3';$$

при  $n = \infty$ ,  $b_i = \frac{(\ln f)^{i+1}}{i!} k_3$  — экспоненциальный

$$k_3 f^\omega = t + c_3,$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_3', c_1, c_2, c_2', c_3, c_3', c_3, f$  — константы, определяемые экспериментальным путем.

В большинстве случаев при достаточной продолжительности процесса один из этих законов сменяется другим вследствие изменения толщины и диффузионной проницаемости слоя прореагировавшего металла.

Интенсивное образование окалины, состоящей из различных слоев оксидов  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , начинается при температуре поверхности свыше  $575^\circ\text{C}$ . Экспериментальные данные [2] позволяют утверждать, что в силу закона неизменности состава для значительных величин окалины ее состав не изменяется, если во время роста все физические условия окисления сохраняются (т.е. можно считать, что все слои растут с одинаковой скоростью).

Зависимость скорости окисления металла от температуры поверхности определяется эмпирической формулой

$$\frac{d\omega^2}{dt} = AT_{\text{пов}}^m(t) \exp\left(\frac{-\beta}{T_{\text{пов}}(t)}\right), \quad \omega(0)=0, \quad (1)$$

где  $A$  — некоторая константа;  $\beta$  — отношение энергии активации к газовой постоянной ( $\beta = (3-60) \cdot 10^3 \text{ K}$ );  $T_{\text{пов}}(t)$  — температура окисляющейся поверхности.

При  $m = 0$  выражение (1) представляет собой закон Аррениуса [3], при  $m = 1$  — закон Эйринга [1], при  $m = -1$  — закон Эванса [4] (закон справедлив для диапазона температур  $0 < T_{\text{пов}} < 0,15\beta$  и теряет смысл при  $T_{\text{пов}} \geq 0,293\beta$ ).

В работе [5] обобщаются результаты исследования кинетики окисления различных марок сталей (35, 45, 60, 80, У8А) в интервале температур  $800-1250^\circ\text{C}$  в продуктах сгорания природного газа, сжигаемого с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha$  от 0,7 до 1,1.

Авторам не удалось установить влияние содержания углерода в стали на скорость угара металла, что объясняется воздействием других химических элементов (например, Si, Cr) на жаростойкость стали.

Для рассматриваемых марок сталей при снижении коэффициента расхода воздуха с 1,1 до 0,9 при высоких температурах поверхности наблюдается резкое уменьшение скорости окалинообразования. Дальнейшее снижение величины  $\alpha$  до 0,7 практически не сказывается на скорости окисления металла. Некоторые различия в поведении кривых окисления при увеличении  $\alpha$  свыше 1,0 или уменьшении ниже 0,8—0,9, вероятно, отражают не только меру окислительной способности газовой среды, но и ее влияние на структуру оксидных пленок, которые способны либо увеличивать, либо уменьшать свою физическую проницаемость [1].

Следует отметить, что существенное влияние коэффициента расхода воздуха на угар металла сказывается только при температурах выше  $1000^\circ\text{C}$ . При более низких температурах такое влияние незначительно.

Что касается влияния различных продуктов сгорания на величину окалины, то в порядке убывания окислительной активности их можно расположить в такой последовательности [5]: коксовый, природный и доменный газы. Это обусловлено суммарной величиной окислителей в дымовых газах:  $23,14\% \text{ H}_2\text{O} + 8,19\% \text{ CO}_2$  — для коксово-

го,  $18,86\% \text{ H}_2\text{O} + 9,8\% \text{ CO}_2$  — для природного и  $4,3\% \text{ H}_2\text{O} + 24\% \text{ CO}_2$  — для доменных газов (при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 1$ ).

Необходимо также отметить сильное влияние серы на динамику окалинообразования. Так, присутствие всего  $0,2\% \text{ SO}_2$  увеличивает скорость окисления в 2 раза [1].

Количественная разница в величине окисления металла тем больше, чем выше температура поверхности изделия. При низких температурах скорость угара стали для всех рассматриваемых газов примерно одинакова.

Из прочих факторов, влияющих на процесс окисления металла, выделяется скорость газовой среды. Однако, если последняя превышает  $0,07 \text{ м/с}$ , то ее воздействие на скорость окисления прекращается.

Авторами [1] отмечается, что влияние некоторых факторов печной атмосферы на окислительный процесс можно учитывать приведением к эквивалентному коэффициенту избытка воздуха  $\alpha$ .

В работе [6] авторами выполнен анализ зависимости количества окалины от толщины изделия. Изучали следующие режимы нагрева: оптимальный режим; нагрев при постоянной температуре поверхности; нагрев при постоянной температуре печи; нагрев постоянным тепловым потоком. Для описания динамики процесса окисления использовали закон Вагнера.

На основе расчетных и экспериментальных данных сделаны следующие выводы.

1. С увеличением толщины изделия растет и толщина слоя окалины. Поэтому эффект от нагрева по оптимальному графику тем больше, чем массивнее тело.

2. Из существующих температурных режимов наилучшим с точки зрения минимизации величины окалины для пластин толщиной до  $0,1 \text{ м}$  является нагрев при постоянной температуре поверхности металла. Для пластин большей толщины — нагрев при постоянной температуре печи. Последнее утверждение хорошо согласуется с выводами, полученными на основе метода магистральной асимптотической оптимизации [7, 8]: наилучшим по критерию минимума окалинообразования является нагрев при  $T_{\text{печ}}(t) \equiv A_1$ , где  $T_{\text{печ}}(t)$  — температура греющей среды в момент времени  $t$ ;  $A_1$  — минимально допустимая (согласно технологическим инструкциям) температура печи.

В работе [9] отмечается, что рост окалины на поверхности металла определяется как внешними — скоростью процессов на границе оксида (приток кислорода, химические реакции), так и внутренними факторами — скоростью диффузии ионов металла или кислорода через оксидную пленку.

Таким образом, при решении задачи минимизации окалинообразования возможно использование двух принципиально отличающихся технологических подходов:

- 1) уменьшение коэффициента расхода воздуха

в сварочной и томильной зонах с целью снижения окислительной способности печной атмосферы на участках интенсивного окисления и последующее повышение величины  $\alpha$  в первых зонах печи для дожигания продуктов горения топлива;

2) разработка оптимальных температурных режимов работы печи.

Согласно методу магистральной асимптотической оптимизации, успешно зарекомендовавшему себя при решении целого спектра проблем металлургического производства, суть задачи оптимального с точки зрения образования величины окалины управления заключается в выборе температуры печи  $T_{пч}(t)$  ( $T_0 < A_1 \leq T_{пч}(t) \leq T_k \leq A_2 < \beta$ , где  $T_0$ ,  $T_k$  — технологические начальная и конечная температуры металла;  $A_1$ ,  $A_2$  — некоторые постоянные) в классе кусочно-непрерывных функций, которая обеспечит быстрое достижение минимума критерия качества

$$I = \omega(t_k) \rightarrow \min,$$

где  $t_k$  — продолжительность нагрева.

В конце периода нагрева необходимо получить равномерное распределение температуры по сечению

$$\max |T(x, t_k)_{x \in S} - T_k| \leq \varepsilon.$$

Здесь  $S$  — сечение заготовки;  $\varepsilon$  — заданная точность нагрева.

Обобщая результаты выполненных ранее научных исследований [7, 10—12], сформулируем следующие выводы.

1. Выступающая в качестве управляющей функции изменения оптимальной температуры печи является кусочно-непрерывной функцией с конечным числом точек разрыва, не зависит от термической массивности тела и его геометрической формы и имеет вид

$$T_{пч}^*(t) = \begin{cases} A_1, & 0 \leq t \leq t^*, \\ A_2, & t^* < t \leq t_k, \end{cases}$$

где  $t^*$  — некоторый момент переключения, обеспечивающий нагрев металла до требуемой технологической инструкцией температуры.

Таким образом, вначале идет монотонный нагрев металла с минимально возможной температурой греющей среды до температуры интенсивного окалинообразования, а затем — форсированный нагрев до требуемой температуры.

2. Реализовать теоретически наилучший режим в реальной печи не представляется возможным, поскольку температура греющей среды в действительности является непрерывной функцией времени, а не разрывной, как получено в оптимальном режиме. Это обстоятельство требует введения дополнительного ограничения на скорость изменения температуры металла в каждый момент времени. Подобный прием позволит получить рациональные режимы нагрева металла, которые легче реализуются на практике и с большей степенью точности соответствуют действительности.

3. В случае использования величины расхода топлива  $U = U(t)$  в качестве функции управления режим нагрева металла до заданной температуры, обеспечивающий наименьшее количество окалины, также характеризуется двумя временными интервалами, на которых расход газа соответственно минимальный  $U_1$  и максимальный  $U_2$ :

$$U^*(t) = \begin{cases} U_1, & 0 \leq t \leq t^*, \\ U_2, & t^* < t \leq t_k. \end{cases}$$

4. Оптимальные по критерию окалинообразования режимы нагрева металла являются рациональными по топливопотреблению.

В общем случае момент переключения  $t^*$  определяется численно на ЭВМ на основе метода дихотомии (деления пополам). Алгоритм нахождения момента переключения приведен в [13].

Описанные выше теоретические аспекты использовали при разработке ресурсосберегающих режимов нагрева высокоуглеродистой кордовой стали в печах патентирования Республиканского унитарного предприятия "Белорусский металлургический завод".

### Литература

1. Бутковский А. Г., Малый С. А., Андреев Ю. Н. Оптимальное управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1972.
2. Окисление металлов. Т. 1. Теоретические основы / Под ред. Ж. Бенара. М.: Металлургия, 1968.
3. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1965.
4. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. М.: Машгиз, 1962.
5. Минаев А. Н., Ольшанский В. М., Волкова М. М., Шурова Н. И. Окисление сталей при сжигании газообразных топлив // Изв. вузов. Черная металлургия. 1983. № 12. С. 98—100.
6. Гузов Л. А., Ольшанский В. М., Тайц Н. Ю., Шкиндер М. М. Анализ режимов нагрева с точки зрения окисления стали // Изв. вузов. Черная металлургия. 1970. № 12. С. 145—146.
7. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Наука і тэхніка, 1995.
8. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Вайс Р. Б. и др. Оптимизация режимов нагрева специальных марок сталей по минимуму окалинообразования // Литье и металлургия. 1999. № 3. С. 13—18.
9. Тайц Н. Ю., Губинский В. И. Расчет процесса окалинообразования при нагреве и охлаждении металла // ИФЖ. 1962. Т. 5, № 6. С. 32—37.
10. Лисиенко В. Г., Ковалевский В. Б., Хо Ж. Анализ режимов нагрева металла в печах камерного типа с целью уменьшения окалинообразования // Изв. вузов и энерг. объед. СНГ. Энергетика. 1993. № 10. С. 86—89.
11. Бабушкин Ф. М., Ковалевский В. Б., Тимошпольский В. И. и др. Применение метода магистральной оптимизации при нагреве термомассивной пластины // Изв. вузов. Энергетика. 1992. № 1. С. 105—107.
12. Ковалевский В. Б., Бабушкин Ф. М., Седако О. Ю. Алгоритм решения задачи оптимального управления нагревом заготовок в проходных печах // ИФЖ. 1991. Т. 61, № 2. С. 199—203.
13. Тимошпольский В. И., Козлов С. М., Ковалевский В. Б., Трусова И. А., Филиппов В. В. Решение задач управления нагревом металла на основе метода магистральной асимптотической оптимизации // Литье и металлургия. 2000. № 4. С. 103—108.