

Таким образом, используя данный подход можно прогнозировать прочность сцепления составляющих биметалла при гидропрессовании и выбирать оптимальные режимы процесса.

Список литературы

1. **Высокие** давления в современных технологиях обработки материалов / Б.И. Береснев, К.И. Езерский, Е.В. Трушин, Б.И. Каменецкий. — М.: Наука, 1988. — 245 с.
2. **Айнбиндер С.Б.** Новые способы сварки давлением. — Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1960. — 115 с.
3. **Давиденко А.А., Орлов Д.В., Сарры Е.А., Бейгельзимер Я.Е.** Прогноз прочности соединения составляющих при гидропрессовании биметаллов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії / Краматорськ-Слов'янськ, 2000. — С. 227–233.
4. **Некоторые** актуальные задачи теории обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. — М.: ВИЛС, 1979. — 124 с.
5. **Колмогоров В.Л., Щеголев Г.А.** Уточненная методика экспериментального определения диаграмм пластичности окисных пленок // Изв. вуз. Черная металлургия, 1979. — № 12. — С. 47–51.
6. **Механические** свойства материалов под высоким давлением / Под ред. Х.Л. Пью. — М.: Мир, 1973. — Т. 2 — 372 с.
7. **Авицур Б., Ву Р.-С., Талберт С., Чжоу Е.** Критерий разрушения сердечника при прессовании биметаллических прутков // Конструирование и технология машиностроения, 1982. — № 3. — С. 186–196.
8. **Обработка** материалов жидкостью высокого давления, исследование и проектирование технологий / Я.Е. Бейгельзимер, Б.М. Эфрос. — Донецк, ДонФТИ, 1992. — 53 с.

© Давиденко А.А., Бейгельзимер Я.Е., Дугадко А.Б., 2002

НОВИКОВА Е.В., КУРБАТОВ Ю.Л. (ДонНТУ)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Определено влияние постоянного электрического поля на окисление металла при высокотемпературном нагреве. Получены коэффициенты для расчета константы окалинообразования с различными напряжениями электрического поля.

Качественный высокотемпературный нагрев стальных изделий — одна из важнейших задач металлургического производственного процесса. Для этого необходимо выполнить два основных условия — обеспечить заданные конечные температурные параметры и свести брак металла к минимуму. Окисление стали при ее нагреве приводит не только к потере до 3% металла, но и как следствие, к ухудшению поверхности изделий. При этом все технологии, применяемые для снижения угара металла в промышленных печах, весьма дороги.

Предлагается технология нагрева стали с наложением постоянного внешнего электрического поля, что обеспечивает снижение окисления металла в печи на 30–50% [1]. За счет подвода к нагреваемому образцу отрицательного потенциала, происходит торможение реакции окисления и уменьшается скорость диффузии кислорода через слой окисла.

В лабораторных условиях собрана установка и проведена серия экспериментов, которые подтвердили теоретические предположения. Установка включает в себя электрическую печь сопротивления, которая обеспечивает поддержание постоянной температуры до 1100°C , аналитические весы, к одному из коромыслов которых подвешивается на нихромовой проволоке цилиндрический образец из исследуемой стали, и источник электрического напряжения, соединенный отрицательным полюсом с нихромовой проволокой подвески. Окисление металла определяли по привесу, который фиксировался через каждые 15 минут. Нагрев проводили в течение 2–4 часов для различных вариантов напряжений в диапазоне от 0 В до 100 В, но исходя из условий безопасности и экономичности технологии, авторы считают целесообразным ограничиться напряжением 50 В.

Так как скорость процесса окисления может быть определена по изменению толщины и массы окисла, а также по убыли металла, возникает необходимость в определении констант окалинообразования с различными размерностями [2]. Так, по закону Таммана:

$$S^2 = 2K \cdot \tau, \quad (1)$$

где S — толщина окисла, м; K — постоянная параболического закона Таммана, $\text{м}^2/\text{с}$.

Поскольку экспериментальным путем была определена масса кислорода, как изменение удельного количества прореагировавшего металла, то:

$$g^2 = K' \cdot \tau,$$

где K' — практическая константа окалинообразования, $\text{кг}^2/(\text{с м}^4)$; g — удельная масса прореагировавшего кислорода, $\text{кг}/\text{м}^2$.

$$K = 0.5K'(1/\rho)^2, \quad (2)$$

где ρ — плотность окалины, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В работах Бровкина [3] предложена зависимость скорости окисления от температуры:

$$K' = C_1 \exp(C_2 \cdot T),$$

где C_1, C_2 — некоторые постоянные.

На основе экспериментальных данных, полученных в интервале температур $T=950 \dots 1050^{\circ}\text{C}$ и при $U=0, 30, 50$ В были определены коэффициенты C_1 и C_2 .

Для окисления металла марки Ст20 без применения внешнего электрического поля, при $U=0$ В:

$$C_1 = 2,1 \cdot 10^{-11} \text{ кг}^2/(\text{м}^4 \text{с}); C_2 = 11,94 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

При использовании электрофизического воздействия, при $U = -30$ В:

$$C_1 = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг}^2/(\text{м}^4 \text{с}); C_2 = 5,79 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

При $U = -50$ В:

$$C_1 = 2,53 \cdot 10^{-14} \text{ кг}^2/(\text{м}^4 \text{с}); C_2 = 16,16 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

Имея полученные коэффициенты C_1 и C_2 для напряжения поля $U=0; 30; 50$ В, можно определить удельный привес $g(\tau)$ при любой температуре нагрева металла.

Исследования в области тепломассобмена и общие положения теории окисления металла [2], а также результаты проведенных ранее лабораторных исследований окисления металла при влиянии электрического поля, дают возможность составить матема-

тическую модель определения угара металла с учетом электрофизического воздействия в зависимости от температуры нагрева и времени нахождения металла в печи.

Для решения задачи по определению температурного поля цилиндра конечных геометрических размеров рассмотрена многомерная постановка. Используя принцип суперпозиции, синтезируется решение задачи общее для цилиндра конечных геометрических размеров, применяя решение для бесконечной плоской стенки и бесконечного цилиндра. При условии симметрии все расчеты проводятся для 1/4 части цилиндра.

$$c(t)\rho(t)\partial t/\partial \tau = \lambda(t) \cdot [\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial r^2 + (1/r) \cdot (\partial t/\partial r)];$$

$$c(t) = c_0 + m_1 t; \quad \rho(t) = \rho_0 + a m_2 t; \quad \lambda(t) = \lambda_0 + a m_3 t;$$

$$r = r_0: \alpha(t_{CP} - t_{r0}) = \lambda(\partial t/\partial r); \quad r = 0: \partial t/\partial r = 0;$$

$$x = \pm h: \alpha(t_{CP} - t_h) = \pm \lambda(\partial t/\partial x); \quad x = 0: (\partial t/\partial x) = 0.$$

Цилиндр, радиусом r и высотой H помещается в среду с постоянной температурой t_{CP} , поэтому температурное поле зависит только от параметров образца и времени. Из условия симметрии относительно осей r (i) и H (j) следует, что $t_{r=0, h=0} \neq \infty$, то есть в центре цилиндра температура имеет конечное значение. Для решения дифференциальных уравнений теплопроводности используется метод конечных разностей. При разностном решении двухмерного уравнения теплопроводности входящие в него производные приближенно аппроксимируются производными в конечных разностях:

$$\partial t/\partial \tau \approx (t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^k)/\Delta \tau;$$

$$\partial t/\partial x \approx (t_{i+1,j}^k - t_{i,j}^k)/\Delta x;$$

$$\partial t/\partial r \approx (t_{i,j+1}^k - t_{i,j}^k)/\Delta r.$$

В приведенных выше уравнениях значения частных производных от температуры t по времени τ и от температуры по координате H или r заменены их приближенными значениями, а дифференциалы — конечными приращениями, где $\Delta \tau$, Δx и Δr — малые приращения независимых переменных ($\Delta \tau$ — шаг по времени, Δx — шаг по оси $H(j)$ и Δr — шаг по оси $r(i)$). При решении этих уравнений температуры определяются в отдельных точках по двум осям: $i=1, 2, 3 \dots n$ и $j=1, 2, 3 \dots m$.

Индексы k и $k+1$ относятся к моменту времени, которому соответствует значение температуры: t^k — значение температуры в некоторый момент времени τ ; t^{k+1} — значение температуры в момент времени $\tau + \Delta \tau$. Каждое из конечно-разностных уравнений содержит одну неизвестную температуру $t_{i,j}^{k+1}$. Эта температура возникает в узле (i, j) после того, как истечет малый промежуток времени $\Delta \tau$. При этом предполагается, что исходная температура в каждом из узлов равна $t_{i,j}^k$.

Для решения системы конечно-разностных уравнений применим метод переменных направлений и дробных шагов. Таким образом, выполняя первую половину шага по времени и решая первый раз систему уравнений для определения поля температур в узлах сетки бесконечного цилиндра, значения температур $t_{i,j}^k$ определяются из начальных условий, при переменных параметрах $\Delta \tau$ (k) и Δr (i). Вторую половину шага по времени определяем поле температур в узлах сетки для бесконечной плиты с переменными параметрами $\Delta \tau$ (k) и Δx (j), где при последующих решениях значения $t_{i,j}^k$ берутся

с предыдущего слоя по времени. Когда выполняется первый шаг по времени и система решается первый раз, значения исходных температур берут из начальных условий.

Исходя из условий теплового баланса и замены уравнений их разностным аналогом, имеем следующие системы уравнений, где ΔFo — изменение критерия Фурье:

— для поверхности цилиндра:

$$t^{k+1/2}_{n,j} = (1 - 2\Delta Fo)t^k_{n,j} + 2\Delta Fo(t^k_{n-1,j} + q^k_{n,j} \Delta r / \lambda);$$

— для оси цилиндра:

$$t^{k+1/2}_{0,j} = 4\Delta Fo t^k_{1,j} + (1 - 4\Delta Fo) t^k_{0,j};$$

— для внутренних узлов цилиндра:

$$t^{k+1/2}_{i,j} = (1 - 2\Delta Fo)t^k_{i,j} + \Delta Fo((t^k_{i+1,j} + t^k_{i-1,j}) + (1/2\Delta r/r_{ij})(t^k_{i+1,j} - t^k_{i-1,j}));$$

— для поверхности плиты:

$$t^{k+1/2}_{i,m} = (1 - 2\Delta Fo)t^k_{i,m} + 2\Delta Fo(t^k_{i,m-1} + q^k_{i,m} \Delta x / \lambda);$$

— для осевой плоскости плиты:

$$t^{k+1/2}_{i,0} = 2\Delta Fo t^k_{i,0} + (1 - 2\Delta Fo)t^k_{i,0};$$

— для внутренних узлов плиты:

$$t^{k+1/2}_{i,j} = (1 - 2\Delta Fo)t^k_{i,j} + \Delta Fo(t^k_{i,j+1} + t^k_{i,j-1});$$

где q — тепловой поток:

$$q^{k+1}_{ij} = \alpha^k_{ij}(t^k_{cp} - t^k_{i,j}).$$

В решении системы явных конечно-разностных уравнений учтена важность правильного выбора значения шага (Δt , Δx , Δr) для соблюдения условия устойчивости системы:

$$\Delta Fo(\text{пл}) = a(t)\Delta t / \Delta x^2 \text{ и } \Delta Fo(\text{цил}) = a\Delta t / \Delta r^2 < 0.5,$$

где $a(t)$ — температуропроводность материала, $a(t) = \lambda(t) / (\rho(t) c(t))$.

Необходимо, чтобы величина Δt удовлетворяла условиям устойчивости системы конечно-разностных уравнений, поэтому выбирается наименьшее значение Δt .

После того, как становится известным распределение температур по сечению цилиндра в любой заданный интервал времени, появляется возможность определить толщину угара металла при переменных внешних условиях. Зная коэффициенты C_1 и C_2 , рассчитанные в предыдущем разделе и полученные при напряжении $U=0;30;50$ В, определяем практическую константу окалинообразования по формуле Бровкина (2) при нестационарной температуре поверхности металла. Далее, по формуле (1), рассчитывается масса окалина либо толщина угара в обозначенный момент времени.

Полученная математическая модель адекватно отражает процессы тепломассообмена в нагреваемом металле, позволяет определить степень влияния электрического поля и количественно рассчитать параметры окалинообразования через модель нестационарного поля.

Вышеописанная математическая модель процесса окалинообразования, позволяет составить алгоритм расчета нестационарного температурного поля и толщины окалина в любой точке поверхности нагреваемого образца в форме цилиндра конечных размеров. Он положен в основу программы для ЭВМ. По результатам моделирования

построен график зависимости удельного привеса металла от времени при различной температуре и напряжении (рисунок).

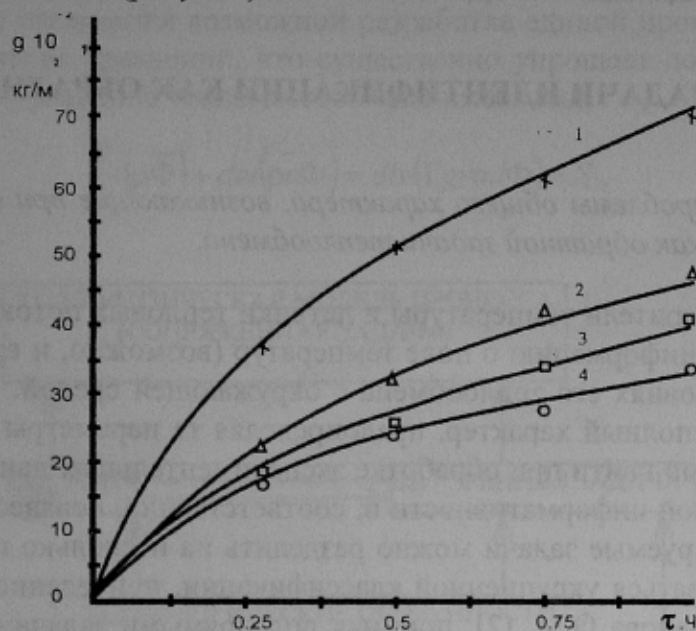


Рисунок. График зависимости удельного привеса металла от времени нагрева: 1 — кривая зависимости $g(\tau)$ при $U=0$ В; $T=1050^{\circ}\text{C}$; 2 — кривая зависимости $g(\tau)$ при $U=-30$ В; $T=1050^{\circ}\text{C}$; 3 — кривая зависимости $g(\tau)$ при $U=0$ В; $T=950^{\circ}\text{C}$; 4 — кривая зависимости $g(\tau)$ при $U=-30$ В; $T=950^{\circ}\text{C}$

Вид кривых на графике, а также величина удельного привеса металла сопоставимы с результатами лабораторных исследований. Это подтверждает адекватное отражение математической моделью процессов, происходящих при окислении стали. Это позволяет определять величину потерь металла в окалину в зависимости от приложения внешнего воздействия, температуры и времени нагрева. Физические свойства металла играют второстепенную роль, так как не оказывают прямого влияния на величину угара, тем более что для исследуемых марок стали они имеют сравнимые значения.

Таким образом, математическое моделирование определения угара металла позволило получить количественные характеристики в зависимости от температуры нагрева, времени окисления металла и влияния электрофизического воздействия.

Список литературы

1. Новикова Е.В., Курбатов Ю.Л. Исследование окисления стали при электрофизическом воздействии // Экотехнологии и ресурсосбережение, 1998. — № 5. — С. 38–41.
2. Окисление металлов / Под ред. Ж.Бенара. — М.: Металлургия, 1968. — Т. 1. — 500 с.
3. Лебедев А.Н. Разработка режимов тепловой обработки стали для уменьшения угара и повышения качества металла // Автореферат дисс. канд. техн. наук. — Донецк, 1987. — 236 с.

© Новикова Е.В., Курбатов Ю.Л., 2002