

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Н. М. РОДИГИН

**РАСЧЕТ СКОРОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА  
В АУСТЕНИТ ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПРИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВЕ**

(Представлено академиком И. П. Бардиным 4 II 1948)

При электронагреве тепло генерируется в самой массе металла, и поэтому процесс аустенизации мало связан с теплотехническими характеристиками стали. Скорость процесса и температура, при которой происходит превращение, зависят главным образом от количества электрической энергии, поданной металлу, и от распространения углерода в твердом растворе путем диффузии.

При нагреве эвтектоидной стали зарождение аустенита имеет место на границе стыка ферритной и цементитной пластинок перлита. После образования аустенитной прослойки мы имеем систему трех фаз: цементита, аустенита и феррита. На границах между этими фазами устанавливаются определенные концентрации углерода в аустените согласно равновесной температурно-концентрационной диаграмме, т. е. на границе с цементитом содержание углерода в аустените должно определяться линией  $ES$ , а на границе с ферритом — линией  $GS$  (точки  $m$  и  $n$  на рис. 1). Разность между этими концентрациями, очевидно, должна быть тем больше, чем выше перегрев над равновесной эвтектоидной температурой.

Наличие неодинаковой концентрации на границах аустенитной прослойки вызывает поток углерода, обусловленный процессом диффузии.

При достаточной подаче тепла количество феррита, переходящее из  $\alpha$  в  $\gamma$ , пропорционально потоку углерода. Излишек подачи тепла (т. е. разность между количеством тепла, подаваемым к изделию, и количеством тепла, расходуемым на превращение) приводит к перегреву стали. Это повышение температуры влечет за собой увеличение разности концентраций углерода в аустените и коэффициента диффузии. Тем самым увеличивается поток углерода и вместе с ним скорость превращения и потребление тепла на превращение. В итоге при заданной подаче тепла устанавливается какое-то равновесие между скоростью превращения и повышением температуры.

Примем за исходные данные начальную толщину ферритной пластинки равной  $2a$  и цементитной —  $2b$ . Длину и ширину пластинок будем считать очень большими по сравнению с толщиной. Для упро-

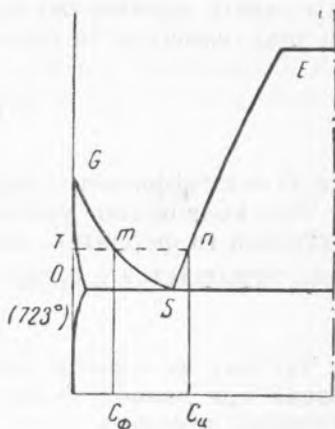


Рис. 1

щения задачи примем направление диффузии углерода перпендикулярным к плоскости раздела пластинок, хотя в действительности при зародышевом характере образования аустенита фронт роста его может быть не плоским, а сферическим. Начало координат расположим на границе между двумя соседними пластинками цемента и аустенита. Исходные концентрации углерода в феррите и цементите обозначим соответственно  $c_1$  и  $c_2$ . Количество энергии, подаваемой на единицу веса стали в единицу времени, примем равным  $P$ .

При нагреве стали, когда температура ее достигнет некоторой величины (точка  $S$  на рис. 1), на границе раздела ферритной и цементитной пластинок начнут образовываться зародыши аустенита с содержанием углерода, соответствующим этой температуре.

Для удобства вычислений температуру начала превращения примем условно равной нулю. Упрощая задачу, будем считать, что зародыши образуются мгновенно и без поглощения дополнительной энергии (на образование новой поверхности раздела).



Рис. 2. 1 — феррит, 2 — аустенит, 3 — цементит

Дальнейшее расширение аустенитной прослойки, как показано выше, зависит от количества углерода, протекающего по этой прослойке, и от количества подаваемого тепла.

Положим, что по прошествии некоторого времени  $t$  от начала превращения прослойка аустенита достигла размера  $x$  (рис. 2), а температура стали повысилась до величины  $T$ . В этот момент концентрация углерода в поверхностном слое аустенита, примыкающем к цементиту, равна  $c_{ц}$ , а в примыкающем к ферриту равна  $c_{ф}$ .

Зная концентрации на границах слоя аустенита толщиной  $x$ , можно определить количество углерода  $Q$ , проходящего через этот слой, на единицу площади за бесконечно малый промежуток времени  $dt$ :

$$Q = \frac{c_{ц} - c_{ф}}{x} D dt, \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, отвечающий данной температуре.

Это количество углерода проходит во вновь образующийся слой аустенита (в феррите) толщиной  $dx_1$ , в котором концентрация углерода повышается с  $c_1$  до  $c_{ф}$ . Таким образом, мы можем написать:

$$Q = (c_{ф} - c_1) dx_1. \quad (2)$$

Так как на границе цементитной и аустенитной пластинок концентрация при данной температуре  $T$  остается постоянной, то количество углерода, перешедшее из цемента в аустенит, равно той же величине  $Q$ .

Вследствие уменьшения количества углерода в цементитной пластинке в ней происходит также образование аустенита. Если в слое толщиной  $dx_2$  концентрация углерода изменилась с  $c_2$  до  $c_{ц}$ , то количество углерода, перешедшее из цемента в аустенит, будет

$$Q = (c_2 - c_{ц}) dx_2. \quad (3)$$

Сравнивая между собой уравнения (1), (2) и (3), получим:

$$\frac{c_{ц} - c_{ф}}{x} D dt = (c_{ф} - c_1) dx_1 = (c_2 - c_{ц}) dx_2. \quad (4)$$

Пользуясь равенствами (4), можно определить полное приращение толщины слоя аустенита:

$$dx = dx_1 + dx_2 = \frac{(c_{\text{II}} - c_{\text{Ф}})(c_2 - c_1 - c_{\text{II}} + c_{\text{Ф}})D dt}{x(c_{\text{Ф}} - c_1)(c_2 - c_{\text{II}})} \quad (5)$$

Общее количество энергии, поданное в рассматриваемый объем стали (площадь равна единице, а толщина  $a + b$ ), за бесконечно малый промежуток времени будет

$$W = P(a + b)\gamma dt, \quad (6)$$

где  $\gamma$  — удельный вес стали.

Часть этого количества энергии, равная  $W_1$ , затрачивается на превращение:

$$W_1 = q_1\gamma dx_1 + q_2\gamma dx_2, \quad (7)$$

где  $q_1$  — количество энергии, расходуемое на превращение феррита в аустенит на единицу веса при концентрации углерода  $c_{\text{Ф}}$ ;  $q_2$  — количество энергии, расходуемой на превращение цементита в аустенит на единицу веса при концентрации углерода  $c_{\text{II}}$ .

Другая часть  $W$ , равная  $W_2$ , идет на повышение температуры стали от  $T$  до  $T + dT$ :

$$W_2 = (a + b)\gamma c_0 dT, \quad (8)$$

где  $c_0$  — теплоемкость стали при температуре  $T$ .

Приравняв поданное количество энергии затраченному и заменяя  $dx_1$  и  $dx_2$  их значениями из уравнений (4), получим:

$$P(a + b)dt = \frac{c_{\text{II}} - c_{\text{Ф}}}{x} \left[ \frac{q_1}{c_{\text{Ф}} - c_1} + \frac{q_2}{c_2 - c_{\text{II}}} \right] D dt + (a + b)c_0 dT. \quad (9)$$

Уравнения (5) и (9) связывают интересующие нас величины  $t$ ,  $T$  и  $x$ . Исключая одну из них, например  $t$ , мы можем определить зависимость между двумя остальными  $T$  и  $x$ :

$$\frac{dT}{dx} - Vf_1(T)x + f_2(T) = 0, \quad (10)$$

где  $V = P/c_0$  — скорость нагрева без учета затрат тепла на превращение,

$$f_1(T) = \frac{(c_{\text{Ф}} - c_1)(c_2 - c_{\text{II}})}{D(c_{\text{II}} - c_{\text{Ф}})(c_2 - c_1 - c_{\text{II}} + c_{\text{Ф}})},$$

$$f_2(T) = \frac{q_1(c_2 - c_{\text{II}}) + q_2(c_{\text{Ф}} - c_1)}{c_0(a + b)(c_2 - c_1 - c_{\text{II}} + c_{\text{Ф}})}.$$

Общее решение полученного уравнения найти трудно. Однако для каждого отдельного случая можно произвести расчет, пользуясь способом численного интегрирования.

Найдем зависимость между  $T$  и  $x$  в начальный момент, когда  $T$  стремится к нулю. Для этого случая можно считать, что

$$f_1(T) = k_1/T, \quad f_2(T) = k_2, \quad (11)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — постоянные коэффициенты.

Подставляя значения  $k_1$  и  $k_2$  в уравнение (10), получим:

$$\frac{dT}{dx} - \frac{Vk_1x}{T} + k_2 = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения (12), удовлетворяющее начальному условию (при  $T = 0$   $x = 0$ ), дает простую зависимость между  $T$  и  $x$ :

$$T = \frac{x}{2} (\sqrt{k_2^2 + 4Vk_1} - k_2). \quad (13)$$

Разбивая весь процесс нагрева на малые промежутки времени, в течение каждого из которых температура стали повышается на величину  $\Delta T$ , и считая, что функции  $f_1(T)$  и  $f_2(T)$  в пределах изменения температуры от  $T$  до  $T + \Delta T$  имеют прежние значения (см. равенства (11)), но только при переходе от одного промежутка времени к другому изменяются величины  $k_1$  и  $k_2$ , мы можем найти зависимость между  $T$  и  $x$  для каждого интервала, а стало быть, и для всего процесса, пользуясь одним и тем же уравнением (12).

При этом определяется скорость продвижения фронта аустенита в зависимости от температуры в любом интервале времени:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{1}{2} (\sqrt{k_2^2 + 4Vk_1} - k_2). \quad (14)$$

Когда  $x$  станет равным  $a + b$ , величина  $T$  примет значение температуры стали при окончании процесса превращения.

Зная количество тепла, расходуемое на превращение в рассматриваемом объеме стали, температуру нагрева и количество подаваемого за единицу времени тепла, можно найти полное время аустенизации и распределение концентрации углерода в аустените в момент завершения превращения.

Процесс выравнивания концентраций углерода после завершения превращения может быть рассчитан по формулам, аналогичным формулам теплопроводности для конечной пластины при заданном распределении температуры.

Легко показать, что с повышением скорости нагрева величина температурного интервала, в течение которого совершается процесс превращения, увеличивается. Для скорости нагрева  $2000^\circ \text{C}$  в секунду величина его составляет (по расчету) около  $100^\circ$  при  $a + b = 5 \cdot 10^{-5}$  см.

Институт физики металлов  
Уральского филиала  
Академии Наук СССР

Поступило  
4 II 1948