

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

М. М. ЗАМЯТНИН

О СКОРОСТЯХ ПРОЦЕССОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ СТАЛИ

(Представлено академиком Н. Т. Гудцовым 22 VII 1949)

Процессы химико-термической обработки стали обычно рассматриваются как процессы диффузионные. В связи с этим считают^(1,2), что зависимость глубины слоев от времени должна иметь характер параболы:

$$x = k \sqrt{t}, \quad (1)$$

а зависимость от температуры — экспоненциальный характер:

$$x = ae^{-bt}. \quad (2)$$

Концентрация диффундирующего элемента на поверхности должна в таком случае приниматься равной предельной достижимой в данной среде с самого начала процесса.

Получающиеся в практике и в экспериментах весьма существенные отличия от ожидаемой теоретической зависимости или игнорируются или относятся за счет отступлений от классических законов диффузии.

Попытаемся показать, что учет ограниченной скорости подведения диффундирующего элемента к поверхности позволяет получить более правильное решение задачи, объясняющее многие из экспериментальных данных.

Допустим, что количество Q элемента, поступающего на поверхность из данной среды, прямо пропорционально разности концентраций предельной достижимой в данной среде $C_{пред}$ и переменной поверхностной $C_{нов}$, а также площади поверхности F и времени t :

$$Q = \alpha (C_{пред} - C_{нов}) Ft, \quad (3)$$

где α — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость передачи элемента от среды на поверхность стали.

Равенство (3) является граничным условием для решения второго дифференциального уравнения диффузии (так называемого второго закона Фика), простейшая форма которого:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где C — переменная концентрация, D — коэффициент диффузии и x — координата в направлении потока диффузии.

Решения аналогичного уравнения с подобным граничным условием имеются в математической теории теплопроводности. В частности, для полубесконечного пространства зависимость концентрации C от времени t , глубины x , коэффициента диффузии D и величины $h = \alpha/D$ получается следующей:

$$= 1 - \left\{ G \frac{x}{\sqrt{4Dt}} + e^{\frac{Dt}{x^2} (hx)^2 + hx} \left[1 - G \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} + \sqrt{\frac{Dt}{x^2} (hx)^2} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

или в общем виде:

$$\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}} = f \left(\frac{Dt}{x^2}, hx \right). \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) $C_{нач}$ — исходная концентрация элемента, G — „интеграл ошибок“ Гаусса.

Приведенное решение вполне применимо к изделиям или образцам конечного и даже небольшого размера с плоской поверхностью при условии, что полная глубина слоя меньше их толщины при односто-

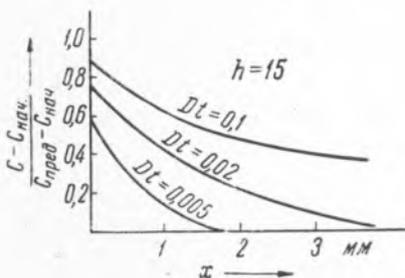


Рис. 1. Распределение концентраций диффундирующего элемента по глубине при различных Dt

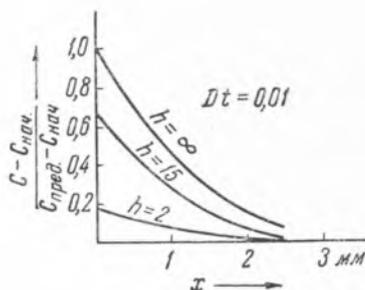


Рис. 2. Распределение концентраций диффундирующего элемента по глубине при различных h

роннем насыщении или меньше половины толщины при двухстороннем насыщении. Это же решение достаточно точно для кривых поверхностей, если отношение глубины слоя к радиусу не превышает 0,2.

Если рассчитать распределение концентрации диффундирующего элемента по формуле (5) для нескольких последовательных значений t или Dt , то получим картину, приведенную на рис. 1. Решение (5) дает повышающуюся со временем концентрацию элемента на поверхности, причем повышение идет с замедлением и концентрация стремится к $C_{пред}$. Такое повышение концентрации является обычным для больших процессов химико-термической обработки^(3,4).

Кроме времени, как это показывает рис. 2, на концентрацию элемента на поверхности влияет величина h , вследствие чего кривая распределения концентрации по глубине может менять свой характер при постоянных t и D и при изменении h , что объясняет известное влияние состава и характера среды на состав и глубину слоев.

С точки зрения практики большой интерес представляет установление зависимости глубины слоя от времени, коэффициента диффузии и величины h .

Из формулы (5) ясно, что принципиальный характер зависимости должен быть следующим:

$$x = f \left(Dt, h, \frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}} \right), \quad (7)$$

где Dt характеризует температуру и продолжительность процесса, h — активность среды и $\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}}$ — относительную граничную концентрацию элемента, принятую за границу слоя.

Явное выражение зависимости (7), повидимому, невозможно. Однако, построив кривые зависимости концентрации от Dt/x^2 и hx , можно по ним находить значения x в зависимости от интересующих нас величин.

На рис. 3 приводим зависимость глубины слоев от времени (или Dt) при постоянном значении h и нескольких постоянных значениях

$\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}}$. Из рис. 3 видно, что полученная зависимость не имеет

параболического характера, а при большой предельной концентрации даже приближается к линейной. Приведенные кривые объясняют известные отклонения от „параболического закона“ и, в частности, почти

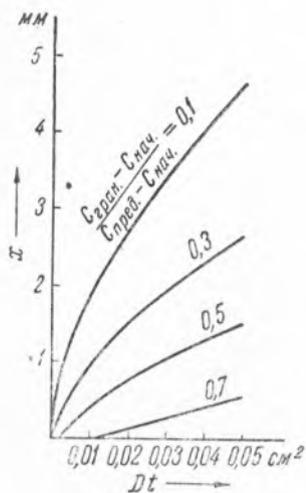


Рис. 3. Зависимость глубины слоев от времени при $h = 15$

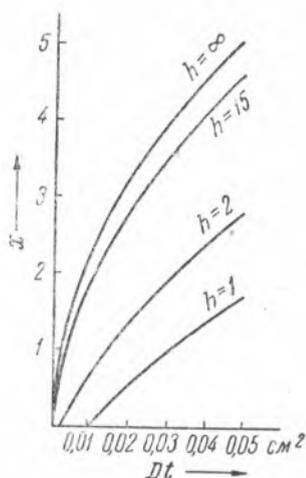


Рис. 4. Зависимость глубины слоев от времени при

$$\frac{C_{гран} - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}} = 0,1$$

линейное возрастание глубины заэвтектидного слоя при цементации⁽³⁾. Следует обратить внимание на факт появления слоев с известным насыщением лишь по истечении известного промежутка времени, что также известно из практики и эксперимента⁽³⁾.

На рис. 4 приводим зависимость глубины от времени (Dt) при постоянном значении $\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}} = 0,1$ и нескольких постоянных значениях h .

Рисунок показывает влияние величины h на глубину слоя и на характер кривой. Наибольшее отступление от параболической зависимости имеет место при малых значениях h .

Рассмотрение глубины слоя как величины, зависящей не только от Dt и $\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}}$, но и от h , объясняет часто встречающиеся

отклонения температурной зависимости глубины слоя от формулы (2).

Так как характер зависимости h от температуры может быть весьма различным, то в общем случае мы вправе ожидать не только сравнительно слабого увеличения глубины слоя с температурой, но и ее уменьшения.

С рассматриваемой точки зрения ограниченной подачи элемента на поверхность может быть решена также задача о количестве вещества, поступившего в сталь при химико-термической обработке.

При мгновенном насыщении поверхности

$$Q = 2(C_{пред} - C_{нач})F \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}; \quad (8)$$

при ограниченной подаче

$$Q = \frac{C_{пред} - C_{нач}}{h} F \left[e^{Dth^2} (1 - G(Dth^2)) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dth^2} - 1 \right]. \quad (9)$$

Если по формуле (8) зависимость количества вещества от времени (и коэффициента диффузии) параболическая, то формула (9) в соответствии с экспериментальными данными дает линейную зависимость при малых значениях Dth^2 , которая постепенно переходит в параболическую при очень больших значениях Dth^2 .

В заключение кратко остановимся на причинах ограниченной скорости подачи элементов на поверхность. В некоторых случаях тормозить процесс может скорость диффузии в газовой среде, в этих случаях ускорение циркуляции газа поведет к ускорению всего процесса. В большинстве случаев ограниченная скорость поступления, вероятно, связана со скоростью химических реакций, протекающих на поверхности раздела среда — металл, а в некоторых случаях со скоростями реакций образования или уничтожения промежуточных веществ, принимающих участие в общем процессе химико-термической обработки.

Автором и под руководством автора выполнено несколько работ по изучению скоростей перехода углерода на поверхность стали при цементации, которые подтверждают высказанные положения.

Поступило
21 VII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. С. Гаев, *Металлург*, № 2, 16, № 3, 3 (1932). ² С. А. Казеев, *Закалка и цементация стали*, 1942. ³ Н. Т. Гудцов и З. М. Бугаева, *Сообщ. Центр. ин-та металлов*, Л., № 17, 92 (1934). ⁴ Д. А. Прокошкин, *Сб. Моск. ин-та стали им. И. В. Сталина*, 1938.