

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

М. М. ЗАМЯТНИН

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ИЗДЕЛИЙ ИЛИ ОБРАЗЦОВ
НА ГЛУБИНУ И СОСТАВ СЛОЕВ,
ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ**

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

При проведении операций химико-термической обработки обычно считают, что глубина и состав слоев не зависят от размеров и формы поверхности обрабатываемых изделий или образцов. Это положение, правильное для крупных изделий и вообще для малых отношений глубины слоя к радиусу или половине толщины, заметно нарушается при больших отношениях глубины слоя к радиусу или половине толщины.

Из литературы и заводской практики известно, что образцы малого диаметра дают большую глубину слоя, чем изделия (1). Тем не менее, очень часто влияние размера и формы образцов на глубину и состав слоев не учитывается, и даже исследовательские работы производятся на образцах недостаточно продуманных размеров и формы.

Постараемся показать причины и размеры влияния этих факторов на результаты химико-термической обработки.

Допустим, что элемент, которым производится насыщение стали, подается на поверхность в количестве, прямо пропорциональном разности концентраций предельной для данной среды $C_{пред}$ и переменной поверхностной $C_{нов}$:

$$Q = \alpha (C_{пред} - C_{нов}) Ft, \quad (1)$$

где α — коэффициент пропорциональности, F — поверхность, t — время.

Если диффузия элемента в стали подчиняется классическим законам диффузии (так называемым законам Фика) и, в частности, второму закону, наиболее простая форма которого

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

то для любой из простых геометрических форм и любого размера тела зависимость между концентрацией, с одной стороны, и глубиной, коэффициентом диффузии и величиной α (или $h = \alpha/D$), с другой, может быть получена по аналогии с соответствующими решениями из математической теории теплопередачи.

В частности, для пластины, насыщаемой с двух сторон, решение принимает вид:

$$\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}} = 1 - \sum_{k=1}^{\infty} 2 \frac{\sin \delta_k}{\delta_k + \sin \delta_k \cos \delta_k} e^{-\delta_k^2 \frac{Dt}{X^2}} \cos\left(\delta_k \frac{x}{X}\right), \quad (3)$$

где C — искомая концентрация, $C_{нач}$ — начальная концентрация, $C_{пред}$ — предельная достижимая концентрация, δ_k — корни уравнения $\text{ctg } \delta = \delta / hX$, D — коэффициент диффузии, t — время, X — половина толщины пластины, x — расстояние от средней плоскости до рассматриваемого сечения.

Для цилиндра с радиусом R , насыщаемого с боковой поверхности, решение имеет вид:

$$\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}} = 1 - \sum_{k=1}^{\infty} 2 \frac{1}{\mu_k} \frac{J_1(\mu_k)}{J_0^2(\mu_k) + J_1^2(\mu_k)} e^{-\mu_k^2 \frac{Dt}{R^2}} J_0\left(\mu_k \frac{r}{R}\right), \quad (4)$$

где, кроме уже известных значений, μ_k — корни уравнения $\mu J_1(\mu) = hR J_0(\mu)$, J_0 и J_1 — функции Бесселя, r — расстояние от центра сечения до рассматриваемой точки.

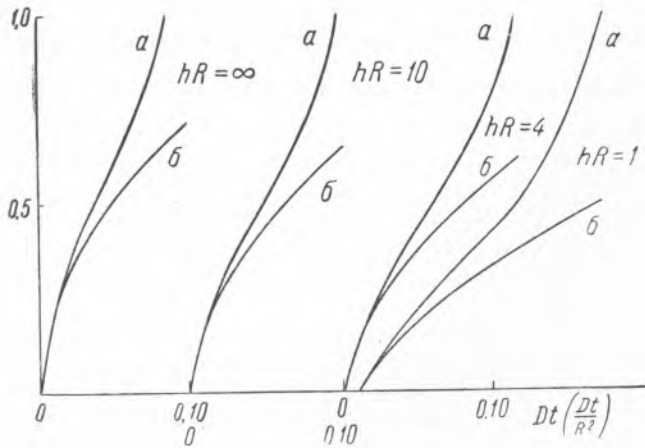


Рис. 1. Зависимость глубины слоев от времени для цилиндра (а) и толстой пластины (б)

Формулы (3) и (4) позволяют произвести расчет концентрации диффундирующего элемента в любой точке пластины или цилиндра, причем некоторые численные значения могут быть заимствованы из литературы по теплопередаче.

Если рассматривать глубину слоя δ как расстояние от поверхности до точки или сечения с определенной заданной абсолютной или относительной концентрацией, то в общем виде получим следующие зависимости:

$$\frac{\delta}{X} = f\left(\frac{Dt}{X^2}, hX, \frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}}\right), \quad (5)$$

$$\frac{\delta_{цил}}{R} = \varphi\left(\frac{Dt}{R^2}, hR, \frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}}\right). \quad (6)$$

Получение аналитических зависимостей для функций (5) и (6), повидимому, невозможно. Однако, если построить ряд графиков для зависимости концентрации от критериев типа Dt/X^2 и hX , то из них возможно графически определить необходимые точки для кривых, изображающих зависимости (5) и (6). На рис. 1 приводим зависимости глубины слоев от величины Dt/R^2 при нескольких постоянных значениях hR и при одном постоянном значении $\frac{C - C_{нач}}{C_{пред} - C_{нач}} = 0,1$.

На рисунке приведены значения глубины, отнесенные к радиусу цилиндра.

Для сравнения с цилиндром на том же рисунке нанесены кривые зависимости глубины слоя от времени для пластины большой толщины, глубина слоя в которой заведомо меньше половины толщины. Глубины слоя для пластины также отнесены к радиусу цилиндра, с которым производится сравнение. Сравнение производится при условии равенства величин Dt и h , т. е. при одинаковом времени, температуре, составе стали и одинаковой насыщающей среде.

Как видно из рисунка, цилиндр, начиная с определенного момента времени или начиная с определенного отношения глубины слоя к радиусу, должен давать заметно бóльшие значения глубины, чем пластины достаточной большой толщины. Это различие начинается тем раньше и достигает тем бóльших значений, чем меньше величина hR , т. е. чем меньше радиус цилиндра и чем слабее действует насыщающая среда.

В пределах значений hR от 1 до ∞ это различие становится заметным при глубине слоя на цилиндре в $0,2—0,3R$, т. е., например, при глубине слоя $1—1,5$ мм на цилиндрическом образце диаметром 10 мм или $0,5—0,75$ мм на цилиндрическом образце диаметром 5 мм.

Сквозное проникновение элемента в цилиндрическом образце наступает гораздо раньше, чем глубина слоя на плоскости достигает величины, равной радиусу цилиндра. Так, при $hR = 1$ и равном времени процесса получения слоя, равного радиусу в цилиндре, соответствует глубина слоя всего в $0,5$ радиуса этого цилиндра на пластине. Даже при максимальном значении $hR = \infty$ при получении глубины, равной радиусу в цилиндре, глубина, на пластине достигает всего $0,66$ от этой величины.

Еще большее различие в глубине слоя на плоской поверхности и в цилиндрах получается при расчете слоя до более высокого значения концентрации (например, заэвтектоидный или эвтектоидный слой при цементации).

Кроме влияния размеров и формы изделий или образцов на глубину слоя, имеет также место влияние этих факторов на состав насыщенного слоя и, в частности, на концентрацию элемента, которым производится обработка, на поверхности. Действительно, так как концентрация элемента на поверхности определяется двумя процессами — подвода к поверхности и отвода внутрь за счет диффузии, то изменение условий диффузии при переходе от плоской поверхности к цилиндру или при переходе от несквозного насыщения к сквозному может и будет вызывать изменение концентрации элемента в слое.

Соответственные численные данные могут быть получены из формул (3) и (4) для любой точки и, в частности, для самой поверхности.

Оказывается, что при несквозном слое концентрация элемента в поверхностном слое цилиндра лишь сравнительно слабо превышает концентрацию этого элемента на плоской поверхности. Различие, вероятно, больше для насыщения отверстий, в которых концентрация элемента на поверхности должна быть ниже, чем на плоскости. Большое различие в концентрации на поверхности может получаться при сравнении сквозного и несквозного насыщения, даже если повышенные концентрации в сердцевине невелики.

В этом случае различие, при одинаковых условиях обработки, может достигать несколько десятых от предельной концентрации (например, $0,3—0,5\%$ в случае углерода). Большие различия могут иметь место и при сравнении двух образцов различной формы со сквозным насыщением в обоих. Эти различия являются результатом различного приближения к условиям равновесия. Тела с несквозным

слоем могут быть далеки от насыщения, так как большая часть поступающего элемента уходит внутрь; тела же со сквозным слоем приближаются к насыщению.

Кроме описанного выше строгого решения задачи о распределении концентраций в телах различной формы, из которого мы получили зависимость глубины слоя от кривизны поверхности, для получения этой зависимости может быть использован упрощенный, менее точный, но, вероятно, более наглядный способ.

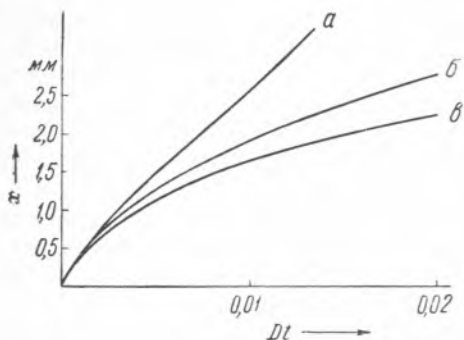


Рис. 2. Зависимость глубины слоев от времени для образцов различной формы: *a* — цилиндр диаметром 10 мм, *б* — плоскость, *в* — отверстие диаметром 10 мм

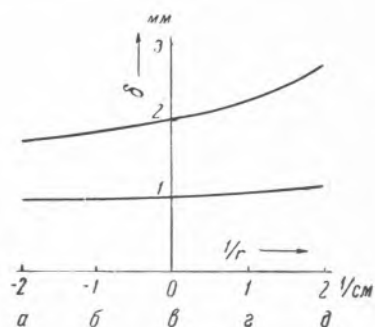


Рис. 3. Зависимость глубины слоя от кривизны поверхности: *a* — отверстие диаметром 10 мм, *б* — то же диаметром 20 мм, *в* — плоскость, *г* — цилиндр диаметром 20 мм, *д* — то же диаметром 10 мм

Допустим, что количество поступающего на поверхность элемента и средняя концентрация этого элемента в слое не зависят от формы поверхности. Тогда для образцов или изделий любой формы объемы слоев, приходящиеся на единицу поверхности, должны быть равны.

Если глубина слоя на плоскости равна δ , то при помощи расчетов, основанных на элементарной геометрии, легко получить глубины соответствующих слоев для цилиндра и цилиндрического отверстия:

$$\delta_{\text{цил}} = R - \sqrt{R^2 - 2R\delta}, \quad (7)$$

$$\delta_{\text{отв}} = \sqrt{R^2 + 2R\delta} - R. \quad (8)$$

Легко видеть, что глубина слоя в цилиндре всегда больше δ , а в отверстии всегда меньше δ ; различие между величинами $\delta_{\text{цил}}$, δ и $\delta_{\text{отв}}$ незначительно при малых значениях δ/R и становится все больше с увеличением отношения δ/R .

На рис. 2 приводим кривые зависимости глубины слоя от времени (или величины Dt) для плоскости, цилиндра и цилиндрического отверстия, рассчитанные по формулам (7) и (8). Рис. 1 и 2 показывают, что эти глубины, будучи одинаковыми при малых значениях Dt/R^2 , становятся резко различными при больших значениях; характер зависимости их от времени также различен.

На рис. 3 приводим кривую зависимости глубины слоя от кривизны цилиндрической поверхности, причем кривизна в отверстии рассматривается как отрицательная величина.

Высказанные в настоящей статье положения подвергались экспериментальной проверке, которая подтвердила их правильность.

Поступило
21 VII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ И. Е. Тутов, *Металлург*, № 7, 43 (1935).