

## О МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРНО- ВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ОТПУСКА

Ю. М. ЛОЗИНСКИЙ, И. Т. ТИХОНОВ

(Представлена научным семинаром кафедры технологии металлов)

Для определения зависимости свойств закаленных сталей от температуры отпуска и его продолжительности Холломоном и Джейфом [1] было предложено так называемое параметрическое уравнение

$$P = T (C + \lg t), \quad (1)$$

где

$P$  — параметр, имеющий постоянное значение для отпусков с различными температурами и продолжительностями, после которых закаленная сталь получает определенные свойства, например твердость;

$T$  — температура отпуска в °К;

$t$  — продолжительность отпуска;

$C$  — постоянная, подбираемая при построении параметрической кривой в соответствии с минимальным разбросом экспериментальных данных.

При получении уравнения [1] названные авторы исходили из предположения, что твердость стали после отпуска связана с его температурой и продолжительностью следующей функциональной зависимостью

$$H = f_1 \left( t e^{-\frac{Q}{RT}} \right). \quad (2)$$

При этом было найдено, что в свою очередь

$$Q = f_2(H), \quad (3) \quad t e^{-\frac{Q}{RT}} = t_0. \quad (4)$$

где  $t_0$  — постоянная, зависящая только от свойств закаленной стали.

Уравнения (3) и (4) дают

$$Q = (\ln t - \ln t_0) RT = f_2(H), \\ H = f[T (C + \lg t)]. \quad (5)$$

Отсюда для постоянных значений твердости  $H = \text{const}$  следует уравнение (1), где  $C = -\lg t_0$ .

Параметрическое уравнение (1) получило широкое распространение за рубежом в работах по исследованию поведения закаленных ста-

лей в процессе их отпуска, например, [2, 3, 4], однако, несмотря на это, его применение нам кажется необоснованным. Действительно, величина  $Q$  в уравнении (2) соответствует энергии активации процесса и поэтому не может быть функцией твердости, то есть уровня процесса, таким образом уравнение (5) теоретически необосновано. С другой стороны, величина  $t_0$  в уравнении (4) рассматривается как константа процесса, в то время как теоретически именно она должна изменяться с изменением его уровня. Уравнение (4), которое служит основой получения параметрической зависимости Холломона и Джейфа, несправедливо, так как из уравнения (2) видно, что твердость является функцией левой части уравнения (4), следовательно, величина  $te^{-\frac{Q}{RT}}$  не может быть постоянной при изменении твердости. Кроме теоретических недостатков, параметрическое уравнение (1) и практически вызывает существенные затруднения, связанные с выбором константы  $C$ , величина которой может изменяться в довольно широких пределах от 10 до 20. В результате на параметрических кривых часто наблюдается значительный разброс точек, соответствующих экспериментальным данным [3]. Причем особенности параметрического уравнения (1) даже не позволяют выявить причину появляющихся отклонений, например, если на какой-то стадии отпуска происходит смена процесса, приводящего к изменению свойств закаленной стали, и, следовательно, изменяется энергия активации. На основании вышесказанного нам представляется рациональнее для решения поставленной задачи воспользоваться классическим уравнением Аррениуса. Согласно этому уравнению для процесса, протекающего до определенной стадии или уровня,

$$te^{-\frac{U}{RT}} = B, \quad (6)$$

где

$T$  — температура процесса, °К;

$t$  — продолжительность процесса;

$U$  — энергия активации;

$B$  — величина, изменяющаяся с изменением уровня процесса.

При отпуске закаленных сталей о константе  $U$  можно говорить лишь как об условной энергии активации [5], а величина  $B$ , зависящая от уровня, достигаемого процессом отпуска, в случае изучения твердости отпущенных сталей может рассматриваться как  $B = f(H)$ .

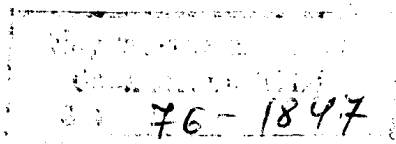
Изменение свойств отпущенных сталей является результатом сложных процессов, поэтому нельзя ожидать, чтобы условная энергия активации сохраняла постоянное значение в широком интервале температур и продолжительностей отпуска. Однако, как будет показано ниже, предлагаемый метод позволяет учесть и эти особенности.

Для случая двух режимов отпуска с различными температурами и продолжительностями, в результате которых закаленная сталь получает определенное свойство, например, твердость, в соответствии с уравнением (6) можем написать

$$t_1 e^{-\frac{U}{RT_1}} = t_2 e^{-\frac{U}{RT_2}} \quad (7)$$

и после логарифмирования

$$\lg t_1 - \lg t_2 = \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \lg e. \quad (8)$$



Следовательно, если мы имеем две кривые, построенные по экспериментальным данным и соответствующие изменению какого-либо свойства стали в зависимости от логарифма продолжительности отпусков при двух температурах  $T_1$  и  $T_2$ , то при условии, что величина  $\bar{U}$  сохраняет постоянное значение, одна кривая должна быть смещена относительно другой по оси логарифма времени на постоянную величину, так как в данном случае  $\lg t_1 - \lg t_2 = \text{const}$ . Аналогично, если экспериментальные кривые построены в координатах свойство стали после отпуска — величина, обратная его абсолютной температуре, то опять кривые в указанном случае могут быть наложены друг на друга простым сдвигом, поскольку для отпусков различной продолжительности  $t_1$  и  $t_2$  будет соблюдаться условие  $\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \text{const}$ .

Указанные закономерности позволяют получать совмещенные кривые, которые можно использовать для экстраполяции при выборе режимов отпуска в широком диапазоне их температур и продолжительностей, а также на основании экспериментальных данных определять значения условной энергии активации. На рис. 1 приведена совмещенная кривая, показывающая изменение твердости закаленной стали с 0,35% С в зависимости от логарифма продолжительности ее отпуска при 350°C. Кривая построена по данным [6] и объединяет результаты, полученные после четырех отпусков с температурами 350, 450, 550, 650°C продолжительностью от 0,01 до 1000 часов. При этом, как свидетельствует рис. 1, достаточно хорошее совмещение всех экспериментальных данных в одну кривую достигается при одном значении усло-

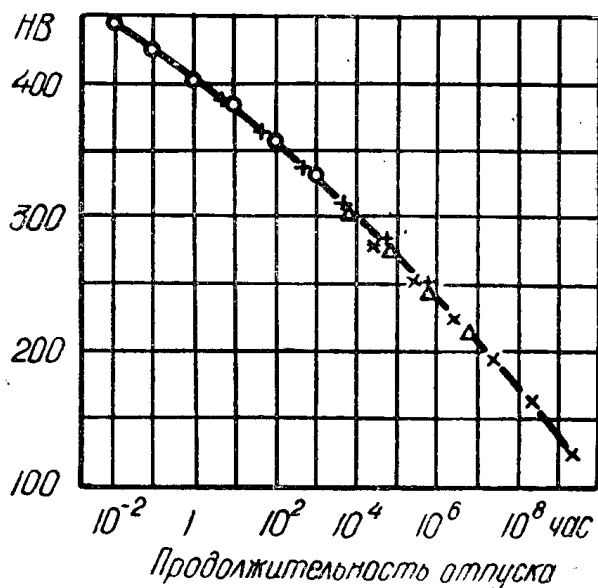


Рис. 1. Зависимость твердости закаленной стали с 0,35% С от продолжительности отпуска при 350°C. Совмещенная кривая построена по данным [6] изменения твердости после отпусков продолжительностью от 0,01 до 1000 часов при различных температурах: ○ — 350; + — 450; △ — 550; × — 650°C

вной энергии активации  $U = 56400$  кал/моль. В результате связь между температурами и продолжительностями отпусков, после которых сталь

получает заданную твердость, может быть определена следующим уравнением:

$$t = 1,42 \cdot 10^{-20} \cdot \tau_0 e^{\frac{56400}{RT}},$$

где

$\tau_0$  — продолжительность отпуска, для которого построена совместная кривая, в данном случае отпуска при 350°C.

Если в пределах исследуемых режимов отпуска значение условной энергии активации не остается постоянным, то для обобщения экспериментальных данных может быть построена номограмма в координатах логарифм продолжительности отпуска — величина, обратная его абсолютной температуре. На рис. 2 приведена такая номограмма, построенная по данным [1] для закаленной стали с 0,31% С, отпущенной при 200, 250, 300, 400, 500, 600 и 700°C с выдержками, изменявшимися в пределах от 0,025 до 24 часов. Легко заметить, что линии на номограмме, построенные по экспериментальным данным, имеют различный

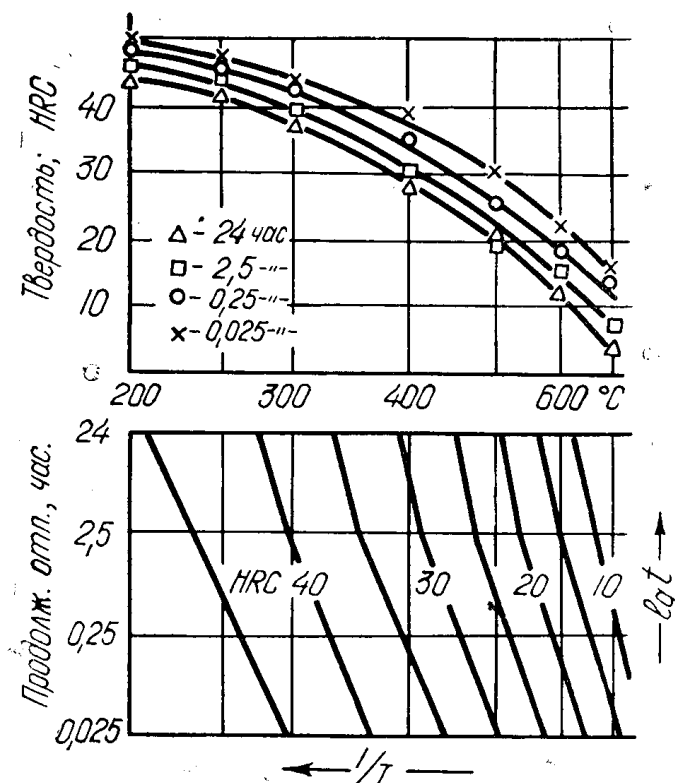


Рис. 2. Зависимость твердости закаленной стали с 0,31% С от продолжительности и температуры отпуска. Номограмма построена по данным [1] изменения твердости после отпусков продолжительностью от 0,025 до 24 часов, с температурами в пределах от 200 до 650° С

наклон и перегибы, что является следствием изменения величины условной энергии активации процесса отпуска примерно от 45200 до 78600 кал/моль.

Сопоставление двух методов определения зависимости свойств закаленных сталей от температуры и продолжительности отпуска показывает, что первый метод с применением параметрического уравнения (1) существенно уступает второму, основанному на обычном уравнении Аррениуса. Метод, базирующийся на экспоненциальной зависимости Аррениуса, позволяет отметить следующие его преимущества:

1. По наклону линий, соответствующих постоянным значениям свойства, в координатах логарифм продолжительности отпуска — величина, обратная его абсолютной температуре, можно легко определить числовые значения условной энергии активации процесса отпуска.

2. Общая картина изменения процессов, происходящих при отпуске закаленных сталей, может быть использована для решения вопросов рационального легирования, например, теплостойких сталей.

3. Дает возможность наметить оптимальные режимы отпусков для получения закаленной стали определенного комплекса свойств, например, сочетания высокой прочности и ударной вязкости [7].

4. Позволяет обобщать экспериментальные данные после отпусков с различными режимами без необходимости подбора каких-либо констант (постоянная  $C$  в параметрическом уравнении)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. H. Hollomon and Jaffe. Time-temperature Relations in Tempering Steel. «Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers», v. 162, 1945, p. 233—248.

2. K. Bungardt, G. Hoch, O. Mülders. Einfluss der Wärmebehandlung auf die Zugfestigkeit und Kerbschlagzähigkeit von Warmarbeitsstählen, «Stahl und Eisen», n. 16, 1955, S. 1035—1046.

3. T. Nishimura, J. Shinyama. On the Tempering Behavior of W—Cr—V Steels, «Tetsu-to-hagane», v. 49, № 10, 1963, p. 1539—1541.

4. T. Nishimura, J. Shinyama. On the Tempering Behavior of 5 Cr—Mo—W—V and 5 Cr—Mo—W Steels. «Tetsu-to-hagane», v. 50, № 4, 1964.

5. В. И. Архаров. Об уточнении понятий «энергия активации» и «элементарный акт» для твердого состояния. Журнал технической физики, т. 24, вып. 3, 1954, стр. 375—387.

6. Эдгер Бейн. Влияние легирующих элементов на свойства стали. Металлургиздат, 1945.

7. Ю. М. Лозинский, И. Т. Тихонов. Исследование взаимосвязи между изменением механических свойств стали при отпуске. Известия вузов, «Черная металлургия», № 2, 1971, стр. 113—116.