

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР Г. В. КУРДЮМОВ и О. П. МАКСИМОВА

**К ВОПРОСУ О РАБОТЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАРОДЫШЕЙ  
МАРТЕНСИТА**

Изучение кинетики превращения аустенита в мартенсит в области температур ниже комнатной показало, что скорость превращения при достаточно низкой температуре становится измеримой и уменьшается при дальнейшем понижении температуры (<sup>1</sup>, <sup>2</sup>). Если брать приведенную скорость превращения, т. е. скорость, отнесенную к предельному для данной температуры количеству изотермически возникающего мартенсита, то температурная зависимость скорости может быть описана следующей формулой:

$$\frac{1}{V_0'} \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t=0} = A e^{-U/RT}, \quad (1)$$

где  $V$  — количество мартенсита, определяемое магнитометром;  $V_0'$  — предельное количество мартенсита, образующегося при температуре  $T$ ;  $A$  и  $U$  — константы, характеризующие данную сталь.

Так как рост кристаллов мартенсита ограничен, то изменение  $V$  происходит, главным образом, за счет увеличения числа кристаллов мартенсита, т. е. определяется скоростью образования зародышей мартенсита.

Если считать, что средняя величина кристаллов мартенсита, образующихся в начальной стадии, постоянна, то можно принять (<sup>1</sup>, <sup>2</sup>)

$$\frac{1}{V_0'} \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t=0} = n v, \quad (2)$$

где  $n$  — число зародышей, образующихся в единицу времени в единице объема;  $v$  — средний объем кристалла мартенсита.

Если сравнить (1), при учете (2), с формулой для скорости флуктуационного зарождения центров новой фазы в случае кристаллизации жидкостей (<sup>3</sup>)

$$n = K e^{-U/RT} e^{-W/RT} \quad (3)$$

( $U$  — энергия активации,  $W$  — работа образования зародышей и  $K$  — коэффициент, не зависящий от температуры), то можно заключить, что в нашем случае работа образования зародышей  $W$  мала по сравнению с  $U$ , а  $K = A/v$ .

Последнее позволяет оценить величину  $K$ . Так как  $A$  в нашем случае (<sup>2</sup>) имеет порядок 1 мин.<sup>-1</sup>, или 10<sup>-2</sup> сек.<sup>-1</sup>, то, приняв размер кристаллов мартенсита 10<sup>-3</sup> · 10<sup>-3</sup> · 10<sup>-4</sup> см<sup>3</sup>, получим для  $K$  значение 10<sup>8</sup> сек.<sup>-1</sup> · см<sup>-3</sup>.

В случае спонтанной кристаллизации жидкостей, как установлено в работах В. И. Данилова и его сотрудников<sup>(3)</sup>, величина  $K$  имеет порядок  $10^{24}$ — $10^{26}$  сек.<sup>-1</sup>·см.<sup>-3</sup>. При кристаллизации на нерастворимых дисперсных частицах примесей  $K$  может быть меньше, чем  $10^{10}$ .

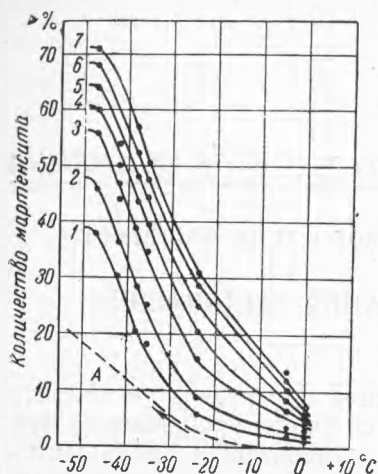


Рис. 1. Приращение количества мартенсита в зависимости от температуры при различном времени выдержки вблизи мартенситной точки. Сплав железо — никель (23%) марганец (3,4%). А — кривая охлаждения ( $10^\circ$  в мин.); 1—5 мин., 2—10 мин., 3—30 мин., 4—1 час, 5—2 часа, 6—5 час., 7—10 час.

шиться и на определенном расстоянии от  $T_0$  стать практически равной нулю.

Между тем, при изучении температурной зависимости скорости превращения в ряде сталей мы наблюдали только увеличение скорости превращения с повышением температуры<sup>(1, 2)</sup>. Все значения величины  $\ln \frac{1}{V_0} \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t=0}$

показывали прямолинейную ее зависимость от  $1/T$ , в соответствии с формулой (1). Затухание изотермического превращения происходило тем быстрее, чем выше температура, и при температурах выше  $-50^\circ$  предельное количество мартенсита достигалось за время, которое необходимо

было для установления температуры. Поэтому изотермическое превращение в этой области не могло наблюдаться.

Иную картину мы получили при исследовании температурной зависимости скорости изотермического превращения для сплава железа с 23% Ni и 3,4% Mn. При непрерывном охлаждении со ско-

Полученное нами значение  $K$  для мартенситного превращения можно считать указанием на то, что зародыши мартенсита образуются не в любой области твердого раствора, что они возникают в каких-то особых местах. Поэтому изучение влияния различных факторов на величину  $K$  существенно для выяснения природы зарождения кристаллов мартенситных фаз<sup>(4)</sup>.

Величина  $U$  для превращения аустенита в мартенсит мала и имеет порядок 1000 калорий на моль<sup>(2)</sup>. Скорость превращения становится очень большой уже при температурах выше  $-50^\circ$ . В то время как  $U$  не зависит от температуры, величина работы образования критического зародыша  $W$  растет с повышением температуры и в точке фазового равновесия  $T_0$  между аустенитом и мартенситом<sup>(5)</sup> должна сделаться бесконечно большой.

Поэтому при повышении температуры величина  $W$  в какой-то области должна сделаться сравнимой с  $U$ , а затем значительно превзойти ее. Скорость превращения в этой области должна умень-

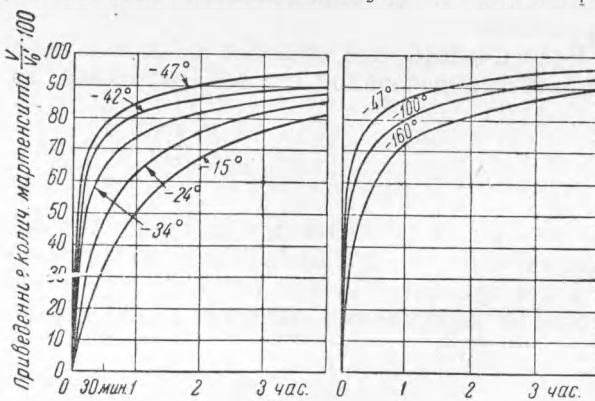


Рис. 2. Приведенное количество мартенсита в зависимости от времени выдержки при различных температурах. Сплав железо—никель (23%) — марганец (3,4%)

ростью  $10^\circ$  в минуту превращение началось при температуре  $-17^\circ$  которая была принята за мартенситную точку для этого сплава. Однако кинетические кривые превращения, полученные при постоянных температурах, показали, что превращение происходит и при более высоких температурах (см. рис. 1). При этом оказалось, что скорость затухания превращения максимальна при  $-47^\circ$ . Ниже этой температуры она уменьшается с понижением температуры, а выше нее уменьшается с повышением температуры.

Температурная зависимость скорости видна из рис. 2, на котором даны изотермы „приведенного количества“ мартенсита  $V/V_0$ . Кривая изменения начальной скорости превращения (выраженной в процентах) в зависимости от температуры (см. рис. 3) имеет максимум, как в общем случае процессов кристаллизации.

На рис. 4 дана кривая зависимости  $\ln \frac{1}{V_0} \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t=0}$  от  $\frac{1}{T}$ . Мы видим, что при температурах ниже  $-50^\circ$  точки укладываются на одну прямую.

В соответствии с формулой (3) следует принять, что в этой области температур работа образования зародышей мала по сравнению с энергией активации. Последняя оказалась равной 600 кал/моль. Поэтому

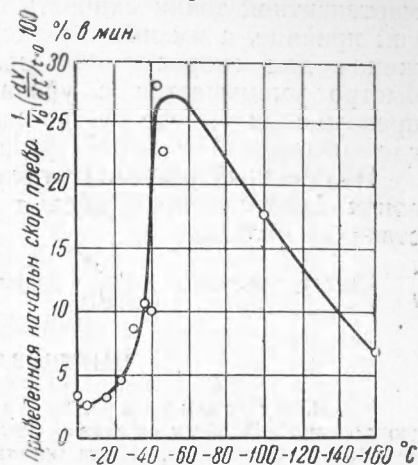


Рис. 3. Начальная скорость изотермического превращения в зависимости от температуры. Сплав железо — никель (23%) — марганец (3,4%)

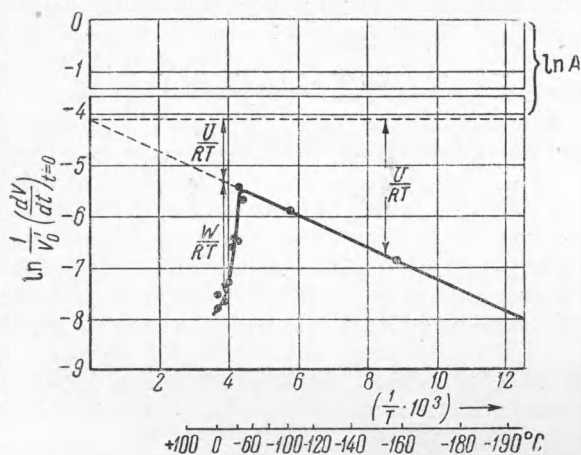


Рис. 4. Зависимость логарифма начальной скорости мартенситного превращения от температуры. Сплав железо — никель (23%) — марганец (3,4%)

$$\ln \frac{1}{V_0} \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t=0} \cong \cong \ln A - \frac{U}{R} \frac{1}{T}. \quad (4)$$

При температуре выше  $-50^\circ$  точки лежат ниже прямой и тем дальше от нее, чем выше температура. Повидимому, в этой области температур работа  $W$  становится сравнимой с  $U$  и должна учитываться:

$$\ln \frac{1}{V_0} \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t=0} = = \ln A - \frac{U}{R} \frac{1}{T} - \frac{W}{R} \frac{1}{T}. \quad (5)$$

Величина отклонения от прямой равна  $\frac{W}{R} \frac{1}{T}$ , что позволяет определить в этой области зависимость работы образования зародышей от температуры. Определенная таким образом величина  $W$  оказалась равной практически нулю при  $-50^\circ$  и более низких температурах, 100 кал/моль при  $-40^\circ$ , 700 кал/моль при  $-30^\circ$  и 1400 кал/моль при  $0^\circ$ .

Таким образом, при мартенситных превращениях обнаруживаются все основные черты кинетики фазовых превращений. Ранее нами было

установлено, что при достаточно низких температурах скорость превращения делается измеримой и уменьшается при дальнейшем понижении температуры, что обуславливается увеличением показателя  $U/RT$  (формула (1)). В настоящем исследовании нами показано, что около мартенситной точки скорость превращения может быть малой по другой причине, а именно, вследствие действия второго фактора в выражении для скорости образования зародышей ( $e^{-W/RT}$ ). Так как  $W$  быстро уменьшается с увеличением переохлаждения, то скорость превращения быстро растет с понижением температуры в той области, где фактор  $e^{-W/RT}$  играет решающую роль.

Полученный результат указывает на важность детального исследования скорости превращения вблизи мартенситной точки на разных сталях и сплавах.

Институт металловедения и физики металлов  
ЦНИИЧМ

Поступило  
20 IV 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Г. В. Курдюмов и О. П. Максимова, ДАН, **61**, № 1 (1948). <sup>2</sup> Г. В. Курдюмов и О. П. Максимова, Сталь, № 2 (1950). <sup>3</sup> В. И. Данилов, ЖЭТФ, **19**, 304 (1949); Сборн. тр. Ин-та металловедения и физики металлов ЦНИИЧМ, 1949. <sup>4</sup> Г. В. Курдюмов и О. П. Максимова, ДАН, **73**, № 2 (1950). <sup>5</sup> Г. В. Курдюмов, ЖТФ, **18**, в. 8 (1948); Сборн. тр. Ин-та металловедения и физики металлов ЦНИИЧМ, 1949.