

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

М. Е. БЛАНТЕР

**О ПРИЧИНАХ РАЗЛИЧНОГО ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ЭВТЕКТОИДНЫЙ РАСПАД АУСТЕНИТА И КРИТИЧЕСКУЮ
СКОРОСТЬ ЗАКАЛКИ СТАЛИ**

(Представлено академиком Н. Т. Гудцовым 23 IV 1949)

До последнего времени причина изменения скорости перлитного превращения аустенита при введении легирующих элементов объяснялась на основании ошибочной качественной теории Мейля. В соответствии с теорией Мейля замедление превращения перлита в аустенит является следствием предварительного перераспределения легирующих элементов в аустените между будущими объемами феррита и карбидной фазы. Так как коэффициент диффузии легирующих элементов примерно в 10^4 раз меньше того же коэффициента для углерода, то причиной, приводящей к замедлению распада, является малая скорость диффузии легирующих элементов. Используя представления Н. Т. Гудцова об определяющем влиянии кристаллической среды ⁽²⁾ и принцип ориентационного и размерного соответствия П. Д. Данкова ⁽³⁾ для теоретического исследования, и поставив специальное экспериментальное исследование, мы показали ⁽¹⁾, что первичным процессом является диффузия углерода в легированном аустените с образованием легированного цементита. Диффузионное перераспределение легирующих элементов между образовавшимися объемами феррита и карбидной фазы является вторичным процессом и потому не может повлиять на скорость распада аустенита в легированной стали.

В то же время прямым экспериментом мы показали незначительность влияния легирующих элементов на скорость диффузии углерода в аустените по сравнению с энергичным замедлением перлитного превращения. Так например, введение 0,5% молибдена, незначительно уменьшая коэффициент диффузии, увеличивает устойчивость переохлажденного аустенита в верхнем районе температур в сотни раз. Введение никеля даже увеличивает коэффициент диффузии углерода в аустените, интенсивно замедляя распад и т. д. Кажущееся противоречие между двумя группами бесспорных экспериментальных фактов находит количественное и качественное объяснение в излагаемой ниже работе.

Так как критическая скорость закалки однозначно связана со скоростью перлитного распада, то в дальнейшем эта величина будет принята нами для количественной характеристики интенсивности эвтектоидного распада. Эта связь может быть установлена при рассмотрении диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 1). В первом приближении критическая скорость закалки определяется как частное от деления критической величины переохлаждения ΔT_m на время устойчивости аустенита τ_m . Однако С. С. Штейнбергом ⁽⁴⁾ показано, что при непрерывном охлаждении превращение запаздывает и в действительности начинается через время τ_0 (рис. 1). Между

временем до начала превращения в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении установлено следующее экспериментальное соотношение (5):

$$\tau_0 = 1,5 \tau_m. \quad (1)$$

Тогда величина верхней критической скорости закалки $V_{в.к.}$ определяется следующим образом:

$$V_{в.к.} = \frac{\Delta T_m}{\tau_0} = \frac{\Delta T_m}{1,5 \tau_m}. \quad (2)$$

Ранее было показано, что превращение аустенита в перлит начинается всегда мгновенно (6), а линия начала превращения, т. е. экспериментально определяемое время τ_m , зависит от чувствительности метода исследования. Однако практически следует считать, что критическая скорость соответствует появлению в структуре первых порций троостита в определенном количестве, существенно не влияющих на свойства закаленной стали (это положение используется экспериментаторами для опытного определения критической скорости закалки). Отсюда следует, что время τ_m должно соответствовать всегда постоянной степени превращения v_{τ_m} .

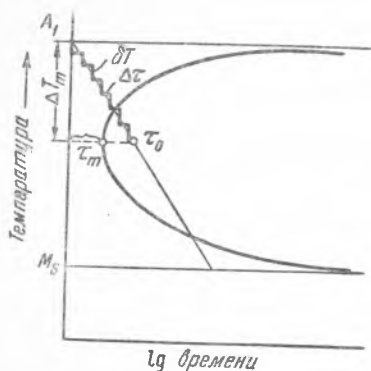


Рис. 1. Интенсивность эвтектоидного распада и критическая скорость закалки

Изотермически превращенный объем аустенита v определяется по уравнению:

$$v = 1 - e^{-k_0 n c^3 \tau^{2,5}}, \quad (3)$$

где n — скорость зарождения центров, c — скорость роста, τ — время, а k_0 — определяется формой растущего перлитного зерна*.

Из уравнения (3) следует, что если $v_{\tau_m} = \text{const}$,

$$\tau_m = \frac{k_1}{(n c^3)^{1/2,5}}. \quad (4)$$

Здесь константа k_1 определяется только заданной степенью превращения.

Выше нами показано, что первичным процессом, определяющим скорость эвтектоидного превращения в легированной стали, является диффузия углерода в аустените, т. е. в процессе превращения сохраняется механизм распада для нелегированного аустенита. Поэтому для определения величин скорости роста и зарождения перлитных образований можно использовать зависимости, полученные для случая углеродистой стали.

Используя уравнение И. Л. Миркина (7) и анализируя опытные данные ряда исследователей, можно показать, что при постоянном содержании углерода в стали скорость зарождения центров n при температуре T_m (рис. 1) определяется по уравнению:

$$n = k_2 \cdot D \cdot S, \quad (5)$$

* Степень 2,5 при τ определена для температуры у изгиба с-кривой экспериментально С. А. Казеевым (6).

где D — коэффициент диффузии углерода в легированном аустените, S — удельная поверхность зерен аустенита в единице объема ($\text{мм}^2 / \text{мм}^3$) (определяется действительным размером зерна аустенита, полученным в условиях нагрева под закалку), k_3 определяется только содержанием углерода в аустените.

Скорость роста c может быть выражена уравнением Зинера (8) *

$$c = k_3 \cdot \Delta T_m^2 \cdot D, \quad (6)$$

причем k_3 зависит только от содержания углерода в аустените.

Из сопоставления уравнений (2), (4), (5) и (6) следует, что:

$$V_{в.к.} = k \cdot D^{1,6} \Delta T_m^{3,4} \cdot S^{0,4}. \quad (7)$$

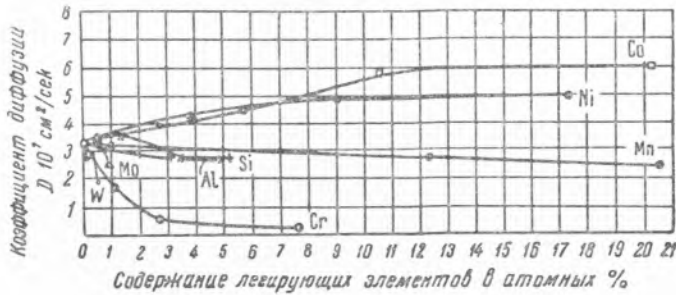


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на коэффициент диффузии углерода в аустените (1000° ; 0,4% углерода)

Таким образом, критическая скорость закалки $V_{в.к.}$ определяется легированностью стали (влияние на коэффициент диффузии углерода в аустените D и величину критического переохлаждения ΔT_m), константой уравнения k , зависящей только от содержания углерода в стали и технологическими факторами (температурой и временем нагрева под закалку, степенью раскисленности стали, чистотой по неметаллическим включениям и т. д. **), влияние которых выражается в величине удельной поверхности зерен аустенита S .

Для установления причин различного влияния легирующих элементов на критическую скорость закалки, а следовательно, на интенсивность распада аустенита в перлитном районе температур, следует рассмотреть влияние легирующих элементов на основные определяющие величины. Характер изменения коэффициента диффузии углерода в легированном аустените показан на рис. 2 (по нашим экспериментальным данным для 1000°). Кобальт и никель увеличивают коэффициент диффузии, кремний и алюминий практически не влияют, а марганец слабо понижает эту величину. Хром, вольфрам и молибден уменьшают величину D . Влияние легирования на величину критического переохлаждения ΔT_m было установлено нами путем рассмотрения положения температуры T_m (на основе анализа нескольких сот диаграмм изотермического распада) и A_1 (нижняя граница трехфазной области диаграммы железо — углерод — легирующий элемент). Результаты обработки опытных данных представлены на рис. 3. Уменьше-

* Функция Зинера, несмотря на ряд упрощений при выводе, хорошо воспроизводит зависимость скорости роста от величины переохлаждения (устанавливается сопоставлением с уравнением Фольмера и Мардера и получением линейной связи между ними).

** Такой технологический фактор, как ликвационная неоднородность, расчетом не учитывается.

ние критической степени переохлаждения имеет место при введении хрома и, особенно, никеля, марганца, вольфрама и молибдена. Кобальт увеличивает ΔT_m , а кремний (и также алюминий) до 1,5—2% уменьшают, а затем резко увеличивают критическую степень переохлаждения. На основании этих данных и уравнения (7) мы приходим к выводу о причинах и характере влияния легирующих элементов на величину критической скорости закалки (табл. 1), весьма хорошо подтверждаемому всеми имеющимися в этой области экспериментальными данными.

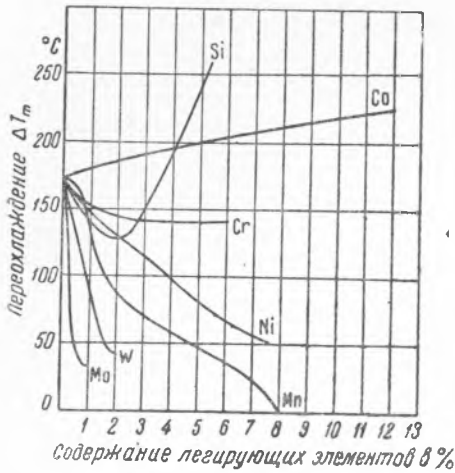


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на величину критического переохлаждения ΔT_m

Особенно сильное влияние молибдена определяется резким уменьшением величины ΔT_m . Так например, введение в сталь 0,6% молибдена уменьшает ΔT_m от 173 до 35°. Допуская постоянство D , мы определяем (по уравнению (7)), что критическая скорость закалки, при прочих равных условиях, должна уменьшиться в $\left(\frac{173}{35}\right)^{3,4} \approx 230$ раз (!!!).

Таким образом, при введении 0,6% молибдена критическая скорость закалки уменьшается от нескольких сот до нескольких градусов в секунду, т. е. сталь становится воздушно закаливаемой.

Таблица 1

Влияние легирующих элементов на критическую скорость закалки

Легирующий элемент	Коэффициент диффузии D	Критическая степень переохлаждения ΔT_m	Критическая скорость закалки
Кобальт	увеличивает	увеличивает	увеличивает
Никель	»	уменьшает	уменьшает
Кремний	не влияет	до 1,5—2% уменьшает, далее увеличивает	до 1,5—2% уменьшает, далее увеличивает
Алюминий	»	то же, что и кремний	то же, что и кремний
Марганец	слабо уменьшает	сильно уменьшает	сильно уменьшает
Хром	уменьшает	уменьшает	»
Вольфрам	»	сильно уменьшает	»
Молибден	»	очень сильно уменьшает	очень сильно уменьшает

Поступило
21 IV 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. Е. Блантер, ЖТФ, 19, в. 4, 531 (1948). ² Н. Т. Гудцов, Сб. трудов МИС, в. 23, 33 (1946). ³ П. Д. Данков, Изв. Сектора физ.-хим. анализа, 16, в. 1, 82 (1942). ⁴ С. С. Штейнберг, Металлург. № 1, 7 (1938). ⁵ R. A. Grange and J. M. Kiefer, Tr. A. S. M., 29, No. 1, 85 (1941). ⁶ С. А. Казеев, Кинетические основы металлургических процессов, Л., 1946. ⁷ И. Л. Миркин, Сб. трудов МИС, в. 18, 5 (1941). ⁸ C. Zene, Metals Technology, I (1946).