

Б. Я. ЛЮБОВ

**ВЫЧИСЛЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ФЕРРИТНОГО ЗЕРНА
ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ РАСПАДЕ АУСТЕНИТА**

(Представлено академиком И. П. Бардиным 17 III 1948)

При достаточно медленном охлаждении аустенита доэвтектоидного состава ниже 723°C в нем возникают зародыши новой фазы (феррита). Рост последних состоит из двух частей: перестройки решетки железа ($\text{Fe}_{\gamma} \rightarrow \text{Fe}_{\alpha}$) и перераспределения концентрации углерода, обусловленной значительно меньшей его растворимостью в новой фазе, чем в исходной. Это обстоятельство определяет лимитирующую роль скорости диффузии атомов углерода в аустените при росте ферритного зерна.

Действительно, из требования уменьшения или по крайней мере сохранения постоянства свободной энергии соответствующего элемента системы следует ⁽¹⁾, что концентрация углерода на поверхности растущего ферритного зерна имеет равновесное для данной температуры значение

$$c[\rho(t), t] = c_{\text{рав}}, \quad (1)$$

где $\rho(t)$ — радиус зерна, увеличивающийся по мере его роста. Начало сферической системы координат помещено в центре зерна и оно считается имеющим форму правильной сферы.

Если ограничиться рассмотрением зерен видимых размеров, то можно считать, что поверхность, разделяющая новую и старую фазы, имеет малую кривизну. В первом приближении пренебрегаем влиянием последней, принимая, что равновесная концентрация углерода у внешней стороны поверхности зерна совпадает со значением, следующим из диаграммы равновесия железо — углерод при экстраполяции линии GS в область субкритических температур ⁽²⁾:

$$c_{\text{рав}} = 0,8 + 0,013(723 - T), \quad (2)$$

где T — температура, при которой происходит рост ферритного зерна.

Выполнение условия (1) возможно только при равенстве количества углерода, выделяющегося на поверхности зерна за время dt и отводимого в этот же промежуток времени путем диффузии в еще не превратившийся аустенит. Уравнение массового баланса на границе растущего зерна, таким образом, можно записать:

$$(c_{\text{рав}} - c_{\text{н.ф}}) \frac{d\rho(t)}{dt} = -D \left(\frac{\partial c}{\partial r} \right)_{r=\rho(t)}, \quad (3)$$

где $c_{\text{н.ф}}$ — концентрация углерода в новой фазе, D — коэффициент диффузии углерода в аустените.

Примем, что на интересующем нас этапе роста ферритного зерна зародыши новой фазы растут независимо друг от друга, т. е.

$$c(\infty, t) = c_0, \quad (4)$$

если

$$c(r, 0) = c_0, \quad r > 0, \quad (5)$$

где c_0 — исходная концентрация углерода в аустените.

Процесс диффузии углерода в аустените управляется уравнением

$$\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} = \frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial t}. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) при условиях (1), (3), (4), (5) может быть проведено, например, методом, предложенным Г. П. Иванцовым (3),

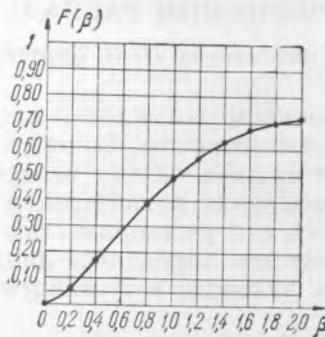


Рис. 1

и позволяет определить $c(r, t)$ при $t > 0$, $r \geq \rho(t)$ и $\rho(t)$. Не останавливаясь на деталях расчета, приведем окончательный результат:

$$c(r, t) = c_0 + (c_{\text{рав}} - c_0) \frac{\frac{2\sqrt{Dt}}{r} e^{-r^2/4Dt} - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2\sqrt{Dt}}\right)}{\frac{1}{\beta} e^{-\beta^2} - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\beta)}, \quad (7)$$

где $\operatorname{erfc}(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\beta}^{\infty} e^{-z^2} dz$;

$$\rho(t) = 2\beta\sqrt{Dt}, \quad (8)$$

β — корень трансцендентного уравнения.

$$\frac{c_{\text{рав}} - c_0}{c_{\text{рав}} - c_{\text{н.ф}}} = 2\beta^2 [1 - \beta\sqrt{\pi} e^{\beta^2} \operatorname{erfc}(\beta)] = F(\beta). \quad (9)$$

Функция $F(\beta)$ для $0 \leq \beta \leq 2$ показана на рис. 1.

Таким образом, скорость роста ферритного зерна

$$v(t) = \frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{\beta\sqrt{D}}{\sqrt{t}}, \quad (10)$$

где

$$\log D = -3,00 - 6,82 \left(\frac{1}{273 + T} - 5,8 \cdot 10^{-4} \right) \cdot 10^3, \quad (11)$$

если D выражено в $\text{мм}^2/\text{сек.}$ (2).

Пусть, например,

$$c_0 = 0,49; \quad c_{н.ф} = 0,04; \quad T = 720^\circ \text{C};$$

тогда

$$\frac{c_{\text{рав}} - c_0}{c_{\text{рав}} - c_{н.ф}} \cong 0,4.$$

Из рис. 1 находим

$$F(0,8) \cong 0,4; \quad \beta \cong 0,8.$$

В этом случае

$$v \cong \frac{940 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{t}} \text{ мм / сек.} \quad (12)$$

На рис. 2 сплошная кривая получена путем расчета по формуле (12), а пунктирная построена на основании экспериментов, проведенных В. Е. Неймарком и Р. И. Эггином при участии И. Б. Пилецкой.

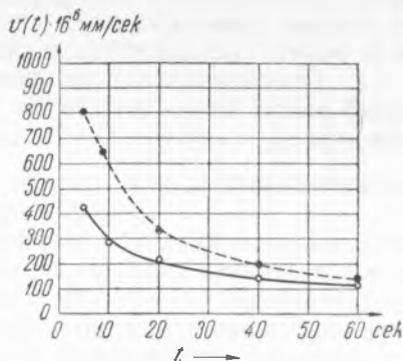


Рис. 2

Вполне удовлетворительное совпадение данных опыта и расчета указывает на правильность наших исходных предположений.

Изложенная схема может быть применена к вычислению скорости роста зерен новой фазы и в других металлических системах.

Отдел теоретической физики
Института металлофизики ЦНИИЧМ

Поступило
16 III 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ С. Зелер, Metals Technology, Jan. (1946). ² W. H. Brandt, J. Appl. Phys., 16, 139 (1945). ³ Г. П. Иванцов, ДАН, 58, 567 (1947).