

С.В.Бобырь

ДИФфуЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В ФЕРРИТ В ДОВЭТКТОИДНОЙ СТАЛИ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Предложена новая диффузионная модель $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в доэвтектоидной стали, теоретически найдена температурная зависимость скорости роста феррита от величины переохлаждения сплава и рассчитаны температурные границы областей существования обычного и игольчатого феррита для стали с 0,2% С.

Современное состояние вопроса.

Изучение основных закономерностей $\gamma \rightarrow \alpha$ –превращения и теоретическое описание этого процесса имеет важное значение в физическом металловедении и продолжается до настоящего времени [1–7]. Простейшая диффузионная модель была предложена в работе [1]. На ее основе объяснены некоторые закономерности образования перлита, в частности, максимум на кривой зависимости скорости роста перлита от величины переохлаждения ΔT . В работе [2] были рассмотрены более точные и сложные модели перлитного превращения, получены уравнения для зависимости межпластиночного расстояния от величины переохлаждения. В дальнейшем был выполнен обзор работ по перлитному превращению [3–5]; наиболее полные экспериментальные результаты приведены в работе [6].

Ранее в работе [7] была предложена модель образования перлита при эвтектоидном $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращении, отражающая основные закономерности кинетики этого процесса в железоуглеродистых сплавах. В результате установлена теоретическая зависимость скорости образования перлита и величины межпластиночного расстояния от переохлаждения ΔT ниже эвтектоидной температуры, позволяющая правильно объяснить полученные ранее экспериментальные результаты.

Цель настоящей работы – теоретическое описание превращения аустенита в феррит в доэвтектоидной стали на основании простой диффузионной модели, учитывающей величину энергии, идущей на образование межфазовых границ раздела α – фаза – цементит.

Методика исследования. Рассмотрим процесс $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения доэвтектоидной стали. Размер аустенитного зерна D_a будем считать достаточно малым, чтобы можно было пренебречь перепадом температур по его сечению. Температурную зависимость коэффициента теплопередачи между аустенитным зерном и окружающей средой примем линейной. Температурный интервал, при котором происходит превращение, зависит от содержания углерода в сплаве и величины переохлаждения (ΔT_n) аустенита ниже температуры A_{c3} на линии GS диаграммы состояния системы Fe–C.

При охлаждении стали ниже температуры A_{c3} начинается превращение аустенита путем образования ферритных зародышей. Состав остающегося аустенита при этом изменяется по линии GS и при температуре эвтектоидного превращения соответствует составу точки S ($\sim 0,8\%$ C). После появления зародышей феррита мы имеем систему двух фаз, между которыми происходит диффузия углерода. На границе между этими фазами устанавливаются определенные концентрации углерода, которые можно определить по диаграмме состояния сплава температур ниже A_{c3} (рис.1).

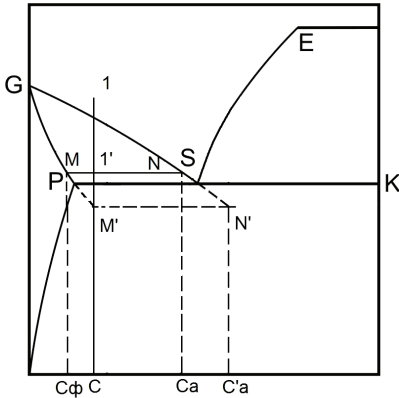


Рис.1. Схема $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в доэвтектоидной стали

Таким образом, содержание углерода в аустените на границе с ферритом будет C_a (точка пересечения линии GS с линией температуры превращения MN при переохлаждении ΔT), а в феррите – C_{ϕ} (точка пересечения линии GP с линией температуры превращения при переохлаждении). Разность между

этим концентрациями тем больше, чем ниже температура превращения стали. В аустените создается градиент концентрации углерода между C_a и C_{ϕ} , способствующий насыщению аустенита углеродом.

Условия превращения сплава зависят также от скорости отвода тепла. Когда количество отводимого тепла превышает количество тепла, выделяемого при превращении аустенита в феррит, то температура превращения снижается. Снижение температуры сплава вызывает уменьшение коэффициента диффузии углерода. Диффузионное перераспределение углерода на прежнее расстояние затрудняется, что, в свою очередь, вызывает уменьшение размеров ферритных участков.

Выведем количественные соотношения, описывающие изложенный выше диффузионный механизм $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения.

Пусть в зерне аустенита в результате охлаждения появились частицы феррита. Будем полагать, что частицы образовались с поглощением дополнительной энергии на формирование новой поверхности раздела. Характерный размер ферритных частиц (диаметр) обозначим как 2Δ . Концентрация углерода в аустените, примыкающем к ферритной частице, равна C_a , а в середине ферритной частицы – C_{ϕ} .

Будем учитывать также, что диффузия углерода вдоль оси X может идти как в аустените (при зарождении феррита), так и в слое α – железа.

Результаты исследований.

С одной стороны, количество углерода dQ , проходящего через слой феррита толщиной Δ на единицу площади за бесконечно малый промежуток времени dt можно найти по формуле:

$$dQ = (C_a - C_\phi) D_x dt / \Delta, \quad (1)$$

где D_x – коэффициент диффузии углерода вдоль оси x ; C_a – концентрация углерода в аустените вблизи ферритного зародыша.

С другой стороны, в образующемся ферритном слое толщиной dX происходит уменьшение количества углерода от C_a до C_ϕ . Тогда количество углерода, перешедшее из феррита в аустенит, будет равно:

$$dQ = (C_a - C_\phi) dX. \quad (2)$$

Сравнивая между собой выражения (1) и (2), находим:

$$dX = D_x dt / \Delta. \quad (3)$$

Это же количество углерода переходит в слой аустенита, повышая концентрацию от C_ϕ до C_a :

$$dQ = (C_a - C_\phi) dX_a, \quad (4)$$

где dX_a – приращение слоя аустенита с концентрацией C_a .

Рассмотрим далее баланс энергии для частицы феррита толщиной Δ в направлении оси X .

Общее количество теплоты, отводимой от рассматриваемой частицы, равно:

$$dW = \alpha \Delta \Delta T dt, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплопередачи; $\Delta T = (T - T_c)$, T_c – температура охлаждающей среды.

Часть энергии, затрачиваемой на образование межфазовой границы, равна:

$$dW_m = \sigma dX, \quad (6)$$

где σ – свободная энергия единицы поверхности раздела фаз.

При превращении аустенита в феррит выделяется энергия:

$$dW_1 = q\gamma\Delta dX, \quad (7)$$

где q – удельное количество теплоты, расходуемое на образование феррита; γ – удельный вес феррита.

Другая часть теплоты W_2 выделяется при снижении температуры феррита от T до $T - dT$:

$$dW_2 = C\gamma\Delta dT, \quad (8)$$

где C – удельная теплоемкость феррита при температуре T .

Баланс тепловой энергии можно представить в виде:

$$dW + dW_m = dW_1 + dW_2. \quad (9)$$

Подставляя в уравнение (9) значения энергий (5) – (8), получаем следующее уравнение:

$$\alpha\Delta\Delta T dt = q\gamma\Delta dX - \sigma dX + C\gamma\Delta dT. \quad (10)$$

Уравнение (10) связывают интересующие нас величины X , T и t при неравновесном $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращении.

Подставляя соотношение (3) в формулу (10), получаем следующее выражение:

$$\Delta^3(\alpha\Delta T - C\gamma dT/dt) - q\gamma D_x \Delta + \sigma D_x = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) описывает неравновесное $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращение. Из него следует, что размер ферритных частиц $L = 2\Delta$ зависит от разности температур ΔT и скорости охлаждения сплава dT/dt , т.е. изменяется во времени. Поэтому уравнение (11) можно решить только численным путем.

Рассмотрим далее фазовое превращение аустенита в особых условиях, когда можно принять, что $\Delta T \approx \text{const}$, $dT/dt \approx 0$.

В этом случае уравнение (9) приобретает следующий вид с постоянными коэффициентами при данной температуре:

$$\Delta^3 \alpha \Delta T - q\gamma D_x \Delta + \sigma D_x = 0. \quad (12)$$

Введем следующие обозначения:

диффузионный радиус ферритных частиц

$$\Delta_0 = \sqrt{q\gamma D_x / \alpha \Delta T}, \quad (13)$$

минимальный размер пластин игольчатого феррита

$$\Delta m = \sigma / q\gamma. \quad (14)$$

Уравнение (12) теперь можно представить в виде:

$$\Delta^3 - \Delta_0^2 \Delta + \Delta_0^2 \Delta m = 0. \quad (15)$$

При $\Delta m \rightarrow 0$, как и следует ожидать, решение уравнения (15) $\Delta = \Delta_0$.

Если $\Delta m \neq 0$, необходимо искать корни уравнения 3 – й степени.

Для нахождения решений уравнения (15) введем нормировку $\Delta_0 = 1$.

Уравнение (13) тогда принимает вид:

$$\Delta^3 - \Delta + \Delta m = 0. \quad (16)$$

Корни уравнения (14) равны [8]:

$$X_0 = A+B, \quad X_{1,2} = -(A+B)/2 \pm i\sqrt{3} (A-B)/2$$

$$A = \sqrt[3]{-\Delta m / 2 + \sqrt{Q}} \quad B = \sqrt[3]{-\Delta m / 2 - \sqrt{Q}},$$

A и B – любые значения кубических корней из комплексных чисел, удовлетворяющих равенству $AB = -P/3$.

Если $Q > 0$, то решением уравнения (14) являются один действительный и два комплексных корня. Если $Q = 0$, то есть три действительных корня, из них два равны. Если $Q < 0$, то существует три действительных корня уравнения (14). Однако корень X_0 является отрицательным при всех положительных значениях Δm и, следовательно, не имеет физического смысла, как отрицательное расстояние диффузии.

Решение уравнения состояния (16) можно представить графически. Введем две вспомогательные функции V_1 и V_2 , где:

$$V_1 = X^2, \quad V_2 = 1 - \Delta m / X. \quad (17)$$

Решение уравнения (16) графически можно найти в виде:

$$V_1 = V_2. \quad (18)$$

Нанесем графики функций Y_1 и Y_2 на ось координат при разных значениях Δm (в единицах Δ_0) (рис. 2). При этом, в соответствии с выражениями (13) и (14), будем учитывать, что $\Delta m = const$, а изменяется Δ_0 в зависимости от температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения.

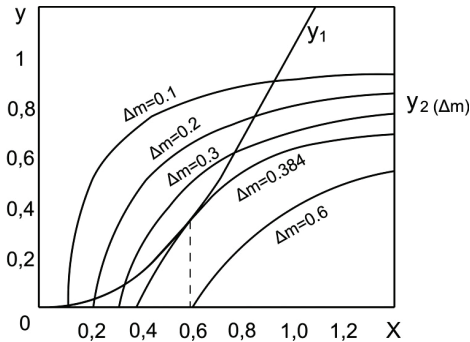


Рис.2. Графическое решение уравнения состояния (18) в зависимости от величины Δm .

Как видно из рис.2, в действительной области существует два решения уравнения (18). При малых Δm ($< 0,1$) один из корней находится в области, близкой к 1 ($X_1 \rightarrow \Delta_0$), другой корень (X_2) находится в области, близкой к Δm .

Таким образом, в рассматриваемой системе возможно образование двух продуктов превращения аустенита в феррит: одного с размером ферритных частиц, близким к Δ_0 – обычный, а также видманштеттовский феррит. Второй продукт превращения образуется в результате диффузионного процесса с малыми путями диффузии, близкими к Δm , и представляет собой игольчатый феррит [9].

Оценить количество обычного и игольчатого феррита в структуре стали можно следующим образом. Функция $C_1 = Y_2(X_1)$ показывает нам долю феррита в структуре стали (при $\Delta m = 0$, $C_1 = 1$, при $\Delta m > 0$, $C_1 < 1$). Тогда функция $C_2 = Y_2(X_2)$ характеризует относительную часть игольчатого феррита в структуре стали.

При $\Delta m = 0,1\Delta_0$ в структуре стали находится примерно 99 процентов обычного феррита и 1 процент игольчатого. Следовательно, при небольшом переохлаждении сплава, при котором $\Delta m \leq 0,1$, структура его состоит в основном из феррита.

С увеличением переохлаждения сплава, при котором $\Delta m = 0,2\Delta_0$, структура сплава состоит из ~ 96 частей обычного феррита и ~ 4 частей игольчатого феррита. Размер частиц феррита уменьшается, одновременно несколько увеличивается размер частиц игольчатого феррита.

Дальнейшее понижение температуры превращения приводит к увеличению доли игольчатого феррита в составе сплава; одновременно уменьшается размер и количество частиц феррита в структуре сплава.

При $\Delta m \approx 0,35-0,38 \Delta_0$ в сплаве существует состояние из двух ферритных фаз с разной степенью дисперсности. При температуре изотерми-

ческого превращения, для которой $\Delta m = 0,384 \Delta_0$, структура сплава состоит из однородного игольчатого феррита.

Дальнейшее понижение температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения приводит к переходу в точке $\Delta m = 0,384 \Delta_0$ в область превращений, при котором атомы углерода перемещаются на расстояния $< \Delta_0$, что характеризует малоуглеродистый мартенсит [6,10].

Решение уравнения (16) может дать определенную характеристику и этой области. Введем действительный параметр:

$$C = C_1 + C_2 = Y_2(X_1) + Y_2(X_2). \quad (19)$$

Этот параметр будет характеризовать относительное количество игольчатого феррита в структуре стали.

Действительно, в точке $\Delta m = 0,384$, $C_0 = C_1 + C_2 = 0,768$ – равно относительному количеству игольчатого феррита (100%). При $\Delta m \geq 0,384 \Delta_0$ в структуре стали присутствует мартенсит.

Пусть $\Delta m = 0,6 \Delta_0$, тогда $X_{1,2} = 0,61 \pm 0,344i$, $C = 0,506$.

При температуре превращения, соответствующей $\Delta m = 0,6 \Delta_0$, относительное количество игольчатого феррита в структуре сплава составляет $C/C_0 = 0,66 = 66\%$, т.е. понижается с увеличением переохлаждения. Соответственно увеличивается количество мартенсита.

Используя выражения (16) и (19), находим, что

$$C \equiv 0 \text{ при } \Delta m \equiv 1,4 \Delta_0. \quad (20)$$

При снижении температуры превращения до значений, при которых $\Delta m \equiv 1,4 \Delta_0$, количество игольчатого феррита $C=0$, структура сплава целиком состоит из мартенсита, тем самым определяя точку конца мартенситного превращения [6].

Найдем также зависимости кинетических параметров dX/dt и Δ_0 от величины переохлаждения.

Как известно [5], зависимость коэффициента диффузии от температуры имеет вид:

$$D = A \exp(-Q/RT), \quad (21)$$

где Q – энергия активации; R – постоянная.

Учтем также, что в первом приближении (рис. 1) параметр α_1 линейно зависит от величины переохлаждения стали ниже эвтектоидной температуры. Тогда

$$\alpha_1 = \alpha' \Delta T. \quad (22)$$

Подставляя выражения (21), (22) и (13) в уравнение (4), находим:

$$dX/dt = \Delta T \sqrt{\alpha \alpha' A \exp(-Q/R(T_3 - \Delta T)/q\gamma)}, \quad (23)$$

где учтено, что диффузия углерода происходит в изотермических условиях при температуре T_3 , $-\Delta T$ [здесь $T_3 = 996^\circ\text{K}$ – равновесная температура эвтектоидного превращения, $R = 1,986$ кал/(моль·град)].

Уравнение (23) описывает температурную зависимость скорости роста феррита от величины переохлаждения сплава.

Рассмотрим изменение величины скорости роста феррита при изменении величины переохлаждения сплава.

При $\Delta T=0$, как и должно быть, $dX/dt=0$. При увеличении переохлаждения скорость образования феррита увеличивается, проходя через максимум при некотором значении ΔT . Введем нормированные параметры:

$$\beta = Q/RT_3 = \text{const}, y = \Delta T/T_3.$$

Тогда положение максимума функции dX/dt может быть найдено из уравнения:

$$y = 1 + \beta/4 - \sqrt{(1 + \beta/4)^2 - 1}. \quad (24)$$

Возьмем в качестве исходных данных параметры диффузии углерода в железе, приведенные в работе [5].

Согласно построенной модели, скорость роста феррита в направлении оси X имеет максимальное значение при переохлаждении $\Delta T = 149,3^\circ\text{C}$, если считать, что диффузия углерода происходит в α – фазе.

Рассмотрим теперь изменение размеров ферритных зерен при изменении величины переохлаждения сплава.

При небольшой величине переохлаждения стали, когда $\Delta_0 \geq D_a/2$, размер ферритного зародыша D_ϕ связан с величиной аустенитного зерна следующим приблизительным соотношением (из рис.1):

$$D_\phi = (C_a - C)(C_a - C_\phi)D_a \approx D_a \kappa \Delta T, \quad (25)$$

где κ – температурный коэффициент (град $^{-1}$); когда же $\Delta_0 < D_a/2$, тогда $D_\phi = \Delta_0$.

Из уравнений (13) и (25) можно найти максимальный размер ферритных зерен и величину переохлаждения стали ΔT , соответствующую этой величине.

Выполним некоторые оценочные расчеты для нашего сплава. Из данных, приведенных в работе [10], можно принять, что температура начала мартенситного превращения низкоуглеродистой стали с 0,2%С в изотермических условиях $T_{\text{Мн}} \approx 500^\circ\text{C} \approx 773,2^\circ\text{K}$.

Используем результаты, полученные в работе [7], формула (28а):

$$\text{Log } S_0 = K_2 - 0,4343Q/2RT = 7,341 - 3545/T, \quad (26)$$

где S_0 – межпластиночное расстояние игольчатой структуры.

Тогда при $T = T_{\text{Мн}}$, $\lg S_0 = 2,75$, $S_0 = 568,85$ нм, $\Delta_0 = S_0/2 = 284,43$ нм;

$$\Delta m = 0,384\Delta_0 = 109,22 \text{ нм}. \quad (27)$$

Тем самым мы нашли толщину пластин для игольчатого феррита при этой температуре.

В точке $\Delta m = 1,4\Delta'_0$, $\Delta'_0 = 78,01$ нм; $S'_0 = 156,02$ нм. (28)

Такой толщине пластин соответствует температура конца образования мартенсита (из формулы 26):

$$T_{\text{Мк}} = 688,6^\circ\text{K} \approx 415,4^\circ\text{C}.$$

Образование мартенсита в стали с 0,2%С, согласно теории, идет в интервале температур $84,4^\circ\text{C}$ и при температуре изотермической выдерж-

ки $415,4^{\circ}\text{C}$ его количество достигает 100%. Это вполне соответствует экспериментальным данным, приведенным в работах [10,11].

При $\Delta t = 0,1\Delta_0$ в структуре стали находится примерно 1 процент игольчатого феррита, чему соответствует расчетная температура:

$$T_{\text{иФн}} = 885,9^{\circ}\text{K} \approx 612,7^{\circ}\text{C}.$$

Начало образования игольчатого феррита в количестве 1 процент происходит при расчетной температуре $612,7^{\circ}\text{C}$, что также соответствует экспериментальным данным, полученным для низкоуглеродистых сталей [11].

Таким образом, учет энергии образования межфазных границ в диффузионной модели превращения аустенита позволил предложить простой механизм $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в доэвтектоидной стали в изотермических условиях. Он характеризуется уравнением 3–ей степени и позволяет нанести на ось температур границы областей существования обычного и игольчатого феррита, а также мартенсита, и определить относительные количества фаз.

Отметим, что в этой теории совершенно не учитывается сдвиговый характер образования игольчатого феррита и мартенсита, однако расчетная толщина пластин игольчатого феррита (27) и (28) вполне соответствует экспериментальным значениям.

Выводы.

1. Предложена новая диффузионная модель $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в доэвтектоидной стали в изотермических условиях, описываемая уравнением 3–ей степени относительно характерного размера частиц α – фазы. Модель описывает образование как обычного, так и игольчатого феррита.

2. Теоретически найдена температурная зависимость скорости роста феррита от величины переохлаждения сплава, описываемая кривой с максимумом, зависящим от размера аустенитных зерен.

3. Теоретически рассчитаны температурные границы областей существования обычного и игольчатого феррита, а также мартенсита для низкоуглеродистой стали с 0,2% C и определены относительные количества фаз при разной температуре.

1. Zener C. Kinetics of Decomposition of Austenite. // Trans. AIME, 1946. – V.167. – P.550.
2. Hillert M. Decomposition of Austenite // AIME Symposium on Decomposition of Austenite by Diffusional Processes. – New York: Intersci. Publ., 1962. – P.197.
3. Мейл Роберт Ф., Хагелъ Уильям К. Аустенитно–перлитное превращение // Успехи физики металлов. Т. 3. – М.: Металлургиздат, 1960. – С.88 – 156.
4. Физическое металловедение. Вып. 2. Фазовые превращения. Металлография / Под ред. Р. Кана – М.: Изд–во «Мир», 1968. – С. 264 – 270.
5. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 238с.

6. *Энтин Р.И.* Превращения аустенита в стали.– М.: ГНТИ, 1960.–252с.
7. *Бобырь С.В.* Простая диффузионная модель эвтектоидного превращения аустенита в пластинчатый перлит // Строительство, материаловедение и машиностроение: Сб. науч. труд. –Дн–ск: ПГАСА, 2003. – Вып.27, ч.2, – С. 60–64
8. *Цыпкин А.Г.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1988. – 432с.
9. *Большаков В.И., Узлов О.В., Бекетов А.В.* Что такое игольчатый феррит // Строительство, материаловедение и машиностроение: Сб. науч. Труд./ ПДАБ-тА – Дн–ск, 2002 – Вып. 15, ч.1, – С. 72–76
10. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов – М.: Metallургия, 1978. – 480с.
11. *Попова Л.Е., Попов А.А.* Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. Справочник термиста.– М.: Metallургия, 1991.– 503с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко*