

МЕХАНИЗМ $\gamma \rightarrow \alpha$ – ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭВТЕКТОИДНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Предложено теоретическое описание механизма $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в железоуглеродистом сплаве эвтектоидного состава. Построенная модель позволила нанести на ось температур границы областей перлитного и бейнитного превращений, и определить относительные количества фаз – перлита, верхнего и нижнего бейнита.

Введение. Эвтектоидное превращение аустенита является одним из важнейших фазовых превращений, определяющих структуру и свойства сплавов на основе железа. Изучение основных закономерностей $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения и теоретическое описание этого процесса имеет важное значение и продолжается до настоящего времени [1–5].

В работе [6] были рассмотрены особенности распада аустенита углеродистой стали с составом, близким к эвтектоидному. В результате совместного анализа дилатометрических и термических кривых охлаждения образцов стали показано, что распад аустенита происходит не изотермически, а в процессе охлаждения до температур изотермических выдержек (рис.1). Однако, механизмы $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в указанной работе не рассматривались.

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.

Построенная модель, однако, не учитывала величины энергии, идущей на образование межфазовых границ раздела α –фаза – цементит.

Цель настоящей работы – теоретическое описание механизма $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в железоуглеродистом сплаве эвтектоидного состава на основании новой физической модели, учитывающей величину энергии, идущей на образование межфазовых границ раздела α – фаза – цементит.

Методика проведения расчетов.

Рассмотрим процесс $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения сплава эвтектоидного состава. Размер аустенитного зерна будем считать настолько 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 ($\Delta T_{\text{п}}$) аустенита ниже равновесной температуры.

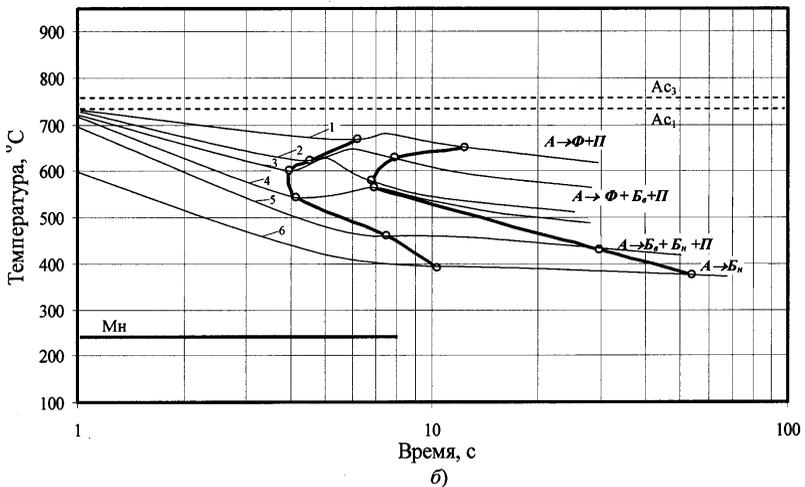
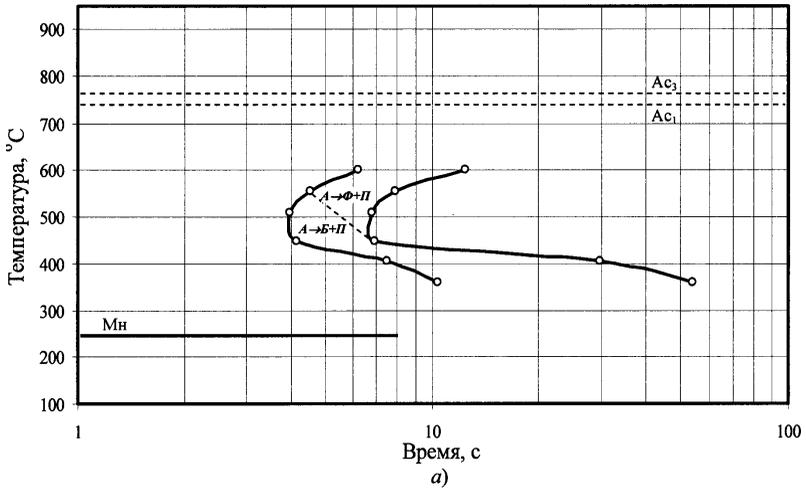


Рис.1. Кинетические диаграммы распада аустенита углеродистой стали с 0,77% С, построенные без учета (а) и с учетом (б) фактической температуры превращений [6]: 1 – $t_{\text{распл.}} = 600^{\circ}\text{C}$; 2 – $t_{\text{распл.}} = 550^{\circ}\text{C}$; 3 – $t_{\text{распл.}} = 500^{\circ}\text{C}$; 4 – $t_{\text{распл.}} = 450^{\circ}\text{C}$; 5 – $t_{\text{распл.}} = 400^{\circ}\text{C}$; 6 – $t_{\text{распл.}} = 350^{\circ}\text{C}$

При охлаждении сплава ниже линии PSK диаграммы состояния системы $Fe - C$ начинается эвтектическое превращение аустенита с образованием зародышей новой фазы [1]. По истечении инкубационного периода начинается $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение однородного аустенита. После

появления пластин цементита и α – фазы мы имеем систему трех фаз, между которыми происходит диффузия углерода. На границах между этими фазами устанавливаются определенные концентрации углерода в аустените, которые можно определить по линиям GS и ES , продолженным в область температур ниже эвтектоидной температуры T_3 .

Таким образом, содержание углерода в аустените на границе с цементитом будет C'_c (точка пересечения продолжения линии SE с линией температуры превращения при переохлаждении), а на границе с α – фазой – C'_ϕ (точка пересечения продолжения линии GS с линией температуры превращения при переохлаждении). Разность между этими концентрациями тем больше, чем ниже температура превращения сплава.

Условия превращения сплава зависят также от скорости отвода тепла. Когда количество отводимого тепла превышает количество энергии, выделяемой при превращении аустенита в перлит, то температура превращения снижается. При этом часть энергии, затрачивается на образование межфазовых границ раздела α – фаза – цементит. Снижение температуры сплава вызывает увеличение разности концентраций углерода в аустените на границах с цементитом и ферритом, а также уменьшение коэффициента диффузии углерода. Диффузионное перераспределение углерода на прежнее расстояние затрудняется, что, в свою очередь, вызывает уменьшение толщины перлитных пластин. Однако, чем меньше величина перлитных пластин, тем больше образуются грани раздела между α – фазой и цементитом, и выше затраты энергии на образование поверхности раздела.

Пусть в зерне аустенита в результате охлаждения появились зародыши перлита. Будем полагать, что зародыши образовались с поглощением дополнительной энергии на формирование новой поверхности раздела. Расстояние между серединами цементитной и ферритной пластин, т.е. дифференцировку перлита, обозначим как Δ . Концентрация углерода в переходном слое ΔZ , примыкающем к середине цементитной пластины, равна C'_c , а в примыкающем к середине ферритного слоя – C'_ϕ (рис.2).

Изменение концентрации углерода вдоль оси Z для $X = 0$, и $X = \Delta$ показано на рис.2. При образовании зародыша цементита (dX_1, dZ) атомы углерода взаимодействуют с железом и переходят в связанное состояние, концентрация свободного углерода резко снижается (в то время как в цементите она равна 6,67%). Соответствующий ход кривой концентрации свободного углерода показан штриховой линией от C'_c до 0. Возникает градиент концентрации углерода из γ -раствора к цементиту. Аналогично при образовании зародыша феррита (dX_2, dZ) часть атомов углерода

$$\alpha\Delta T dt = q\gamma dX - \sigma dZ/\Delta Z + C\gamma\Delta dT. (6)$$

Уравнение (6) связывают интересующие нас величины X , Z , T и t при неравновесном эвтектоидном превращении.

Для его преобразования учтем установленные авторами в работе [6] соотношения:

$$dZ/dt = (\Delta Z/\Delta) dX/dt, (7)$$

$$dX/dt = (\alpha_1 + \alpha_2) D_x/\Delta. (8)$$

Подставляя эти соотношения в формулу (6), получаем следующее выражение:

$$(\alpha_1 + \alpha_2)q\gamma D_x/\Delta - \sigma(\alpha_1 + \alpha_2)D_x/\Delta^2 - \Delta(\alpha\Delta T - C\gamma dT/dt) = 0. (9)$$

Уравнение (9) описывает неравновесное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение. Из него следует, что межпластиночное расстояние $S_0 = 2\Delta$ зависит от разности температур ΔT и скорости охлаждения сплава dT/dt , т.е. изменяется во времени.

Рассмотрим далее фазовое превращение аустенита в особых условиях, когда можно принять, что $\Delta T \approx \text{const}$, $dT/dt \approx 0$. Как следует из экспериментальных результатов, приведенных на рис. 1, такие условия приблизительно выполняются для сплава с $C=0,77\%$, помещенного в охлаждающую среду определенной температуры.

В этом случае уравнение (9) приобретает следующий вид:

$$(\alpha_1 + \alpha_2)q\gamma D_x/\Delta - \sigma(\alpha_1 + \alpha_2)D_x/\Delta^2 - \Delta\alpha\Delta T = 0. (10)$$

Введем следующие обозначения:

$$\Delta_0 = \sqrt{(\alpha_1 + \alpha_2)q\gamma D_x} / \alpha\Delta T - \text{толщина перлита}; (11)$$

$\Delta m = \sigma/q\gamma$ – минимальный размер диффузионного межфазового расстояния; (12)

Уравнение (10) теперь можно представить в виде:

$$\Delta^3 - \Delta_0^2\Delta + \Delta_0^2\Delta m = 0. (13)$$

При $\Delta m \rightarrow 0$, как и следует ожидать, решение уравнения (13) $\Delta = \Delta_0$.

Получаем решение для перлитного превращения аустенита.

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

Для нахождения решений уравнения (13) введем нормировку $\Delta_0 = 1$.

Уравнение (13) тогда принимает вид:

$$\Delta^3 - \Delta + \Delta m = 0. (14)$$

Корни уравнения (14) равны [7]:

$$X_0 = A+B, X_{1,2} = -(A+B)/2 \pm i\sqrt{3} (A-B)/2 (15)$$

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

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.

Обсуждение результатов

Решение уравнения состояния (14) можно представить графически. Введем две вспомогательные функции Y_1 и Y_2 , где:

$$Y_1 = X^2, Y_2 = 1 - \Delta m/X.$$

Решение уравнения (14) графически можно найти в виде:

$$Y_1 = Y_2. \quad (16)$$

Нанесем графики функций Y_1 и Y_2 на ось координат при разных значениях Δm (в единицах Δ_0) (рис.3). При этом, в соответствии с выражениями (11) и (12), будем учитывать, что $\Delta m = const$, а изменяется Δ_0 в зависимости от температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

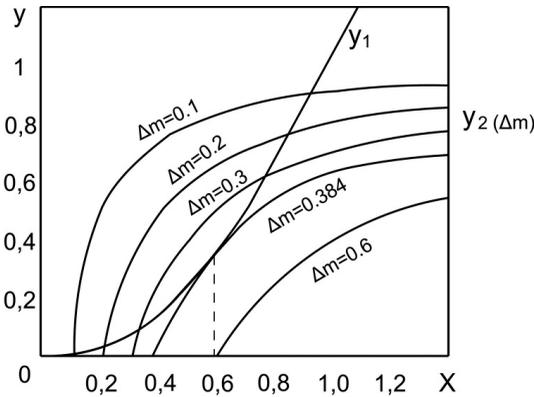


Рис.3. Графическое решение уравнения состояния (16) в зависимости от величины Δm .

Как видно из рис.3, в действительной области существует два решения уравнения (16). 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 протекание двух диффузионных превращений аустенита: одного с межпластинчатым расстоянием, близким к Δ_0 – перлитное превращение. Второе диффузионное превращение идет с малыми путями диффузии, близкими к Δm , и известно как бейнитное превращение [8].

Оценить количество перлита и бейнита в структуре сплава можно следующим образом. Функция $C_1 = Y_2(X_1)$ показывает нам долю перлита в структуре сплава (при $\Delta m = 0$, $C_1 = 1$, при $\Delta m > 0$, $C_1 < 1$). Тогда функция $C_2 = Y_2(X_2)$ характеризует долю бейнита в структуре сплава.

При $\Delta m = 0,1 \Delta_0$ в структуре сплава находится примерно 94 части перлита и 1 часть бейнита. Следовательно, при небольшом переохлаждении сплава, при котором $\Delta m \leq 0,1$, структура его состоит в основном из перлита.

С увеличением переохлаждения сплава, при котором $\Delta m = 0,2 \Delta_0$, структура сплава состоит из ~88 частей перлита и ~4 частей верхнего бей-

нита. Дисперсность перлита возрастает (сорбитообразная структура), одновременно несколько увеличивается размер частиц бейнита.

Дальнейшее понижение температуры превращения приводит к увеличению доли бейнита в составе сплава; одновременно уменьшается межпластиночное расстояние и количество перлита (троостита) в структуре сплава.

При $\Delta m \approx 0,35 - 0,38\Delta_0$ в сплаве существует состояние из двух дисперсных фаз с разной толщиной пластин. Это полностью подтверждают экспериментальные результаты, приведенные на рис.1 (область перлит + бейнит).

При температуре изотермического превращения, для которой $\Delta m = 0,384\Delta_0$, структура сплава состоит из однородного бейнита.

Дальнейшее понижение температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения приводит к переходу в точку $\Delta m = 0,384\Delta_0$ в область превращений, при котором атомы перемещаются на расстояния $< \Delta_0$, что характеризует нижний бейнит [2,8].

Решение уравнения (14) может дать определенную характеристику и этой области. Введем действительный параметр:

$$C = C_1 + C_2 = Y_2(X_1) + Y_2(X_2). \quad (17)$$

Этот параметр будет характеризовать относительное количество верхнего бейнита в структуре стали.

Действительно, в точке $\Delta m = 0,384C = C_1 + C_2$ – равно количеству верхнего бейнита. При $\Delta m \geq 0,384\Delta_0$ в структуре стали присутствует нижний бейнит.

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 верхнего бейнита в структуре сплава составляет 50,6 атомарных %, т.е. понижается с увеличением переохлаждения. Соответственно увеличивается количество нижнего бейнита.

Используя выражения (15) и (17), находим, что

$$C \approx 0 \text{ при } \Delta m \approx 1,4\Delta_0. \quad (18)$$

При снижении температуры превращения до значений, при которых $\Delta m \approx 1,4\Delta_0$, количество верхнего бейнита $C = 0$, структура сплава состоит из нижнего бейнита, тем самым определяя точку конца бейнитного превращения [2].

Выполним некоторые оценочные расчеты для нашего сплава. Из данных, приведенных на рис.1, можно установить, что температура начала образования нижнего бейнита $T_{\text{Бн}} \approx 725^\circ\text{K}$ [5].

Используем результаты, полученные в работе (6), формула (28а):

$$\lg S_0 = K_2 - 0,4343Q/2RT = 7,341 - 3545/T, \quad (28a)$$

где S_0 – межпластиночное расстояние пластинчатой структуры.

Тогда при $T = T_{\text{Бн}}$, $\lg S_0 = 2,451$, $S_0 = 282,5$ нм, $\Delta_0 = S_0/2 = 141,25$ нм;

$\Delta m = 0,384\Delta_0 = 54,24$ нм.

Тем самым мы нашли минимальный размер диффузионного межфазового расстояния.

В точке $\Delta t = 1,4\Delta'_0$, $\Delta'_0 = 38,74$ нм; $S'_0 = 77,48$ нм.

Такому межпластиночному расстоянию соответствует температура конца образования верхнего бейнита (из формулы 28а):

$$T_{\text{БК}} = 650,3 \text{ } ^\circ\text{K} = 377,1^\circ\text{C}.$$

Образование нижнего бейнита, в соответствии с теорией, идет в интервале температур $74,7^\circ\text{C}$ и при $377,1^\circ\text{C}$ его количество достигает 100%. Это вполне соответствует экспериментальным данным, приведенным на рис.1.

Таким образом, учет энергии образования межфазных границ в диффузионной модели превращения аустенита позволил предложить простой механизм $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в железоуглеродистом сплаве эвтектоидного состава в изотермических условиях. Он характеризуется уравнением 3–ей степени и позволяет нанести на ось температур границы областей перлитного и бейнитного превращений, и определить относительные количества фаз.

Дальнейшее развитие теории позволит теоретически описать изотермическое $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращение в железоуглеродистых сплавах, состав которых отличается от эвтектоидного.

Выводы

- Предложен теоретический механизм $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения в железоуглеродистом сплаве эвтектоидного состава в изотермических условиях, описываемый уравнением 3–ей степени относительно межпластиночного расстояния.
- Выполненный анализ позволил нанести на ось температур границы областей перлитного и бейнитного превращений, и определить относительные количества фаз – перлита, верхнего и нижнего бейнита.
- Для определенного температурного интервала превращений, при котором $\Delta t \approx 0,35\text{--}0,38 \Delta_0$, в сплаве возможно существование структуры состоящей из двух дисперсных фаз (троостита и верхнего бейнита).
- Показано, что существует четкая граница на оси температур, разделяющая области верхнего и нижнего бейнита.

1. *Физическое металловедение. Вып. 2. Фазовые превращения. Металлография.* / Под ред. Р. Кана – М.: Изд-во «Мир», 1968. – С.264 – 270.
2. *Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И.* Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 238с.
3. *Парусов В.В.* Морфологические особенности перлита при превращениях гомогенного аустенита. // *Фундам. и прикл. пробл. черн. метал.* Вып.2. – К.: Наукова думка, 1988. – С.355–364.
4. *Сидоренко О.Г.* Влияние процессов теплообмена на развитие фазовых превращений в многокомпонентных системах. // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов.* Вып.12. – Дн-ск, ПГАСА, 2001. – С.85–91.

5. *Борисенко А.Ю., Евсюков М.Ф., Левченко Г.В.* Особенности распада аустенита углеродистой стали в изотермических условиях. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып.32, ч.1. – Дн–ск, ПГАСА, 2005. – С.85–91.
6. *Большаков В.И., Бобырь С.В.* Кинетические параметры процесса образования перлита в железоуглеродистых сплавах.// МиТОМ, 2004. – №8. – С.11–15.
7. *Цыпкин А.Г.* Справочник по математике. Для средних учебных заведений. – М.: Наука, 1988. – 432с.
8. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов – М.: Metallургия, 1978. – 480с.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Г.В.Левченко