

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра материаловедения и технологии машиностроения

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЙ

СПЛАВОВ Fe-Fe₃C

Методические указания
к лабораторной работе и практическим занятиям
по материаловедению

Санкт-Петербург

2016

УДК 620.22(075)

Диаграмма состояний сплавов Fe-Fe₃C: методические указания к лабораторной работе и практическим занятиям по материаловедению/ сост. А.В. Гропянов, Н.Н. Ситов, М.Н. Жукова; ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2016. - 18 с.

Методические указания предназначены для самостоятельной подготовки студентов к лабораторной работе и практическим занятиям для студентов всех направлений и форм обучения.

Рецензент: зам.директора института безотрывных форм обучения ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент В.О. Варганов.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой материаловедения и технологии машиностроения Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (протокол № 7 от 25.02.2016).

Утверждены к изданию методической комиссией института технологии ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 4 от 24.03.2016).

© Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2016

Антон Васильевич Гропянов
Николай Николаевич Ситов
Мария Николаевна Жукова

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЙ СПЛАВОВ Fe-Fe₃C

**Методические указания
к лабораторной работе и практическим занятиям
по материаловедению**

Редактор и корректор Н.П. Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова
Компьютерный набор и верстка М.С. Локтевой

Темплан 2016 г., поз. 36

Подп. к печати 06.05.2016. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. Объем 1,25 печ. л., 1,25 уч. - изд. л.

Тираж 100 экз. Изд. № 36. Цена "С". Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД.
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

Лабораторная работа

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- изучение диаграммы состояний сплавов Fe-Fe₃C;
- приобретение навыков практического использования диаграммы Fe-Fe₃C для выбора режимов термической обработки, обработки давлением и литья железоуглеродистых сплавов.

Сплавами, имеющими первостепенное значение для всех отраслей промышленности, являются стали и чугуны, относящиеся к системе железоуглеродистых сплавов. Железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны – важнейшие металлические сплавы современной техники. Производство чугуна и стали по объему превосходит производство всех других металлов вместе взятых более чем в десять раз.

Диаграмма состояния железо – углерод дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов.

Начало изучению диаграммы железо – углерод положил русский ученый Чернов Д.К. в 1868 г. Чернов впервые указал на существование в стали критических точек и на зависимость их положения от содержания углерода.

Диаграмма железо – углерод должна распространяться от железа до углерода. Железо образует с углеродом химическое соединение: цементит – Fe₃C. Каждое устойчивое химическое соединение можно рассматривать как компонент, а диаграмму – по частям. Так как на практике применяют металлические сплавы с содержанием углерода до 5%, то рассматриваем часть диаграммы состояния от железа до химического соединения цементита, содержащего 6,67 % углерода.

Для изучения сталей и чугунов в **равновесном** состоянии пользуются диаграммой состояний железо - карбид железа, приведенной на рис. 1.

Нередко вводят дополнительную шкалу, показывающую содержание в системе цементита, что практически значения не имеет.

Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания в них углерода, делятся на техническое железо (до 0,02 % С), сталь (0,02...2,14 % С), чугун (свыше 2,14 и до 6,67 % С).

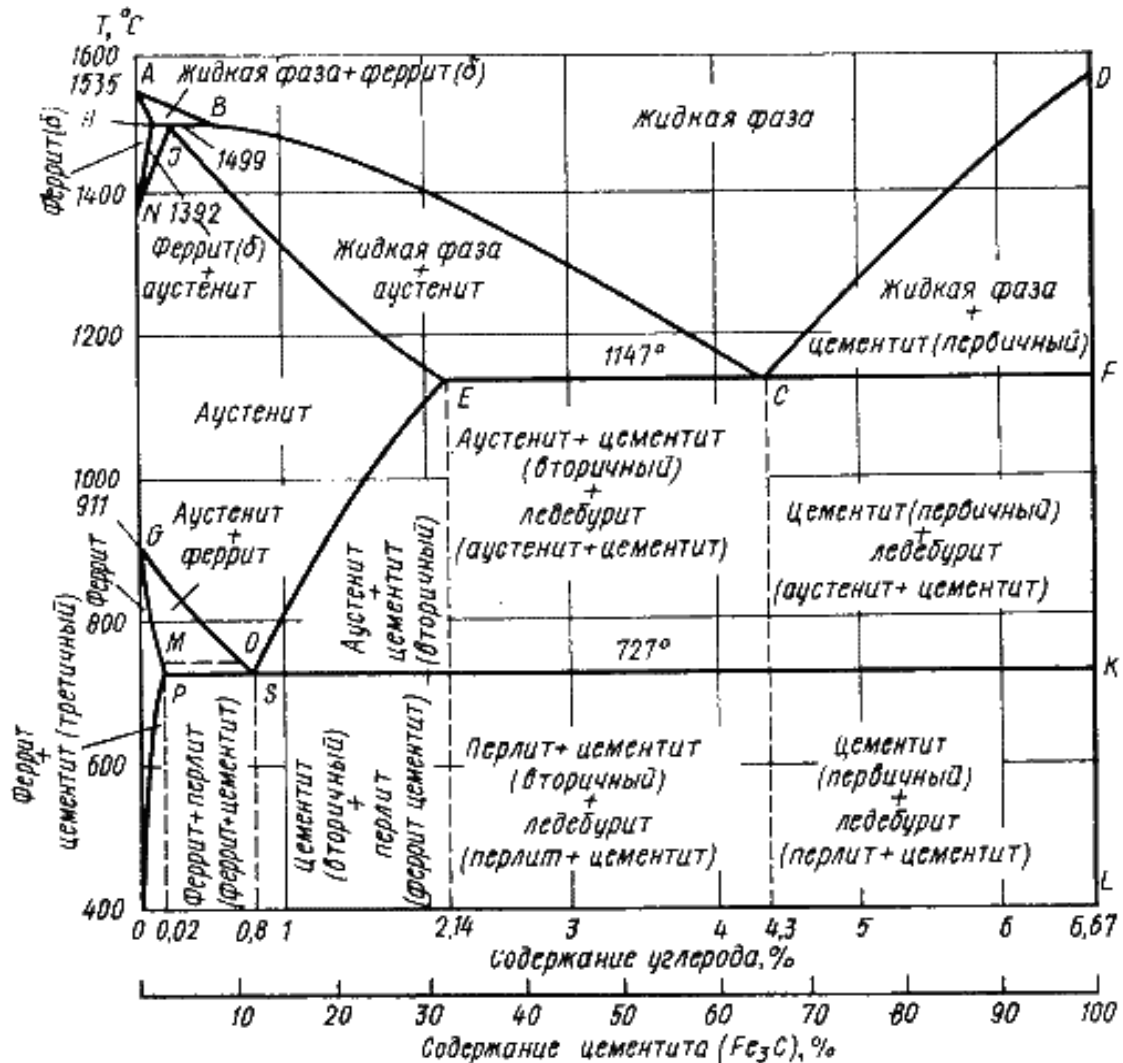


Рис. 1. Диаграмма состояния железо - цементит

Непрерывной структурной составляющей стали в равновесном состоянии является перлит. Второй структурной составляющей может быть либо феррит (доэвтектоидная сталь), либо вторичный цементит (заэвтектоидная сталь). Содержание углерода в доэвтектоидной стали находится в пределах 0,02...0,8 %, в эвтектоидной – 0,8 %, в заэвтектоидной – в пределах 0,8...2,14 %.

Для белого чугуна характерно обязательное наличие структурной составляющей – ледебурит(по имени немецкого ученого Ледебура).

Другими структурными составляющими белого чугуна могут быть перлит и вторичный цементит (доэвтектический чугун). Содержание углерода в доэвтектическом чугуне находится в пределах 2,14...4,3 %, в эвтектическом – 4,3 %, в заэвтектическом – более 4,3 %.

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо, углерод и цементит.

1. *Железо* – переходный металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления – $1539^{\circ} \text{C} \pm ^{\circ} \text{C}$.

В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах 911°C и 1392°C . При температуре ниже 911°C существует Fe_{α} с объемно-центрированной кубической решеткой. В интервале температур $911...1392^{\circ} \text{C}$ устойчивым является Fe_{γ} с гранецентрированной кубической решеткой. Выше 1392°C железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку и называется Fe_{δ} или высокотемпературное Fe_{α} . Высокотемпературная модификация Fe_{α} не представляет собой новой аллотропической формы. Критическую температуру 911°C превращения $\text{Fe}_{\alpha} \leftrightarrow \text{Fe}_{\gamma}$ обозначают точкой A_3 , а температуру 1392°C превращения $\text{Fe}_{\alpha} \leftrightarrow \text{Fe}_{\gamma}$ - точкой A_4 .

При температуре ниже 768°C железо ферромагнитно, а выше – парамагнитно. Точка Кюри железа 768°C обозначается A_2 .

Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (80 НВ) и прочностью (предел прочности $\sigma_{\text{В}}=250$ МПа, предел текучести $\sigma_{\text{Т}}=120$ МПа) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение – $\sigma=50$ %, а относительное сужение – $\Psi=80$ %). Свойства могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от величины зерна.

Железо характеризуется высоким модулем упругости, наличие которого проявляется и в сплавах на его основе, обеспечивая высокую жесткость деталей из этих сплавов.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения, с углеродом, азотом и водородом – растворы внедрения.

2. *Углерод* относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования, существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления – 3500 °C, плотность – 2,5 г/см³) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой с координационным числом, равным четырем (температура плавления – 5000 °C).

В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита (Fe_3C), а также в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

3. *Цементит* (Fe_3C) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода.

Аллотропических превращений не испытывает. Кристаллическая решетка цементита состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу, рис. 2.

Температура плавления цементита точно не установлена (1250, 1550 °C). При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 217 °C.

Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность. Такие свойства являются следствием сложного строения кристаллической решетки.

Цементит способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов: азотом, кислородом; атомы

железа – металлами: марганцем, хромом, вольфрамом и др. Такой твердый раствор на базе решетки цементита называется *легированным цементитом*.

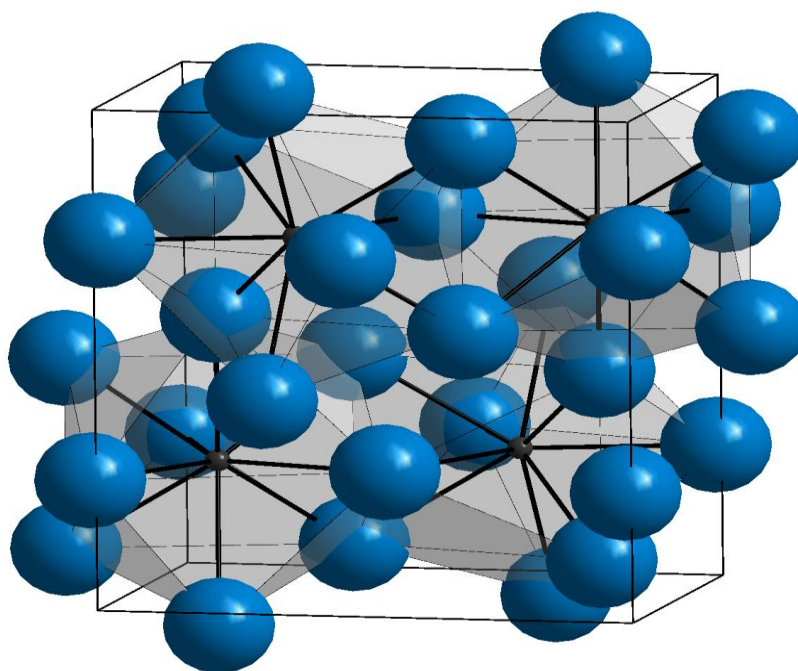


Рис.2. Кристаллическая решетка цементита

Цементит – соединение неустойчивое и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение при структурообразовании чугунов.

В системе железо – углерод существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит.

1. *Жидкая фаза*. В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

2. *Феррит (Ф) $Fe_{\alpha}(C)$* – твердый раствор внедрения углерода в α -железо.

Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – 0,006 % при комнатной температуре (точка *Q*), максимальную – 0,02 % при температуре 727 °C (точка *P*). Углерод располагается в дефектах решетки.

При температуре выше $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ существует высокотемпературный феррит (δ) Fe_{δ} (C), с предельной растворимостью углерода $0,1\%$ при температуре $1499\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка *J*)

Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость 130 HB , предел прочности $\sigma_{\text{B}}=300\text{ МПа}$) и пластичен (относительное удлинение – $\sigma=30\%$), магнитен до $768\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. *Аустенит (A)* Fe_{γ} (C) – твердый раствор внедрения углерода в γ -железо.

Углерод занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки.

Аустенит имеет предельную растворимость углерода максимальную – $2,14\%$ при температуре $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка *E*).

Аустенит имеет твердость $200\dots 250\text{ HB}$, пластичен (относительное удлинение $\sigma=40\dots 50\%$), парамагнитен.

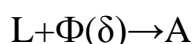
При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования.

4. *Цементит* – характеристика дана выше.

В железоуглеродистых сплавах присутствуют фазы: цементит первичный (C_I), цементит вторичный (C_{II}), цементит третичный (C_{III}). Химические и физические свойства этих фаз одинаковы. Влияние на механические свойства сплавов оказывают различия в размерах, количестве и расположении этих выделений. Цементит первичный выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов. Цементит вторичный выделяется из аустенита и располагается в виде сетки вокруг зерен аустенита (при охлаждении – вокруг зерен перлита). Цементит третичный выделяется из феррита и в виде мелких включений располагается у границ ферритных зерен.

Линия $ABCD$ – ликвидус системы. На участке AB начинается кристаллизация феррита (δ), на участке BC начинается кристаллизация аустенита, на участке CD – кристаллизация цементита первичного.

Линия $АНЕСС$ – линия солидус. На участке $АН$ заканчивается кристаллизация феррита (δ). На линии $НJB$ при постоянной температуре 1499 °C идет перитектическое превращение, заключающееся в том, что жидкая фаза реагирует с ранее образовавшимися кристаллами феррита (δ), в результате чего образуется аустенит:



На участке JE заканчивается кристаллизация аустенита. На участке $ЕСС$ при постоянной температуре 1147 °C идет эвтектическое превращение, заключающееся в том, что жидкость, содержащая $4,3$ % углерода, превращается в эвтектическую смесь аустенита и цементита первичного:



Эвтектика системы железо – цементит называется ледебуритом (L), содержит $4,3$ % углерода.

При температуре ниже 727 ° C в состав ледебурита входят цементит первичный и перлит, его называют ледебурит превращенный (L_I).

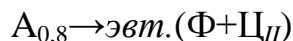
По линии HN начинается превращение феррита (δ) в аустенит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии NJ превращение феррита (δ) в аустенит заканчивается.

По линии GS происходит превращение аустенита в феррит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии PG превращение аустенита в феррит заканчивается.

По линии ES начинается выделение цементита вторичного из аустенита, обусловленное снижением растворимости углерода в аустените при понижении температуры.

По линии MO при постоянной температуре 768 °C имеют место магнитные превращения.

По линии PSK при постоянной температуре 727 °С идет эвтектоидное превращение, заключающееся в том, что аустенит, содержащий 0,8 % углерода, превращается в эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного:



По механизму данное превращение похоже на эвтектическое, но протекает в твердом состоянии.

Эвтектоид системы железо – цементит называется перлитом (П), содержит 0,8 % углерода.

Название получил за то, что на полированном и протравленном шлифе наблюдается перламутровый блеск.

Перлит может существовать в зернистой и пластинчатой форме, в зависимости от условий образования.

По линии PQ начинается выделение цементита третичного из феррита, обусловленное снижением растворимости углерода в феррите при понижении температуры.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы железо – цементит, т.е. критические точки, имеют условные обозначения.

Обозначаются буквой А (от французского *arret* – остановка):

А1 – линия PSK (727 °С) – превращение $\text{П} \leftrightarrow \text{А}$;

А2 – линия МО (768 °С, точка Кюри) – магнитные превращения;

А3 – линия GOS (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – превращение $\text{Ф} \leftrightarrow \text{А}$;

А4 – линия NJ (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – превращение $\text{А} \leftrightarrow \text{Ф}(\delta)$;

A_{cm} – линия SE (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) – начало выделения цементита вторичного (иногда обозначается A_3).

Так как при нагреве и охлаждении превращения совершаются при различных температурах, чтобы отличить эти процессы вводятся дополнительные обозначения. При нагреве добавляют букву с, т.е. A_{c1} , при охлаждении – букву r, т.е. A_{r1} .

Сталь. Кристаллизация начинается на линии ABC и заканчивается на линии ANJE, при содержании углерода в пределах 0,1...0,5 % при первичной кристаллизации образуется δ – феррит, превращающийся затем в аустенит. С содержанием углерода свыше 0,5 % аустенит образуется при непосредственной кристаллизации расплава. В дальнейшем охлаждении доэвтектоидной стали ниже линии GS аустенит постепенно превращается в феррит, состав аустенита изменяется по линии GS в сторону точки S. При температуре линии PSK (727 °C) состав оставшегося аустенита достигает точки S (0,8 % C), и он превращается в эвтектоид (перлит). Таким образом, структура доэвтектоидной стали состоит из перлита и феррита.

Перлит имеет значительно более высокую прочность и меньшую пластичность, чем феррит. Поэтому, чем больше углерода содержит сталь, т.е. чем выше в ней содержание перлитной составляющей, тем выше прочность стали и ниже ее пластичность.

При охлаждении эвтектоидной стали аустенит при температуре линии PSK целиком превращается в перлит. В заэвтектоидной стали ниже линии ES из аустенита выделяется вторичный цементит (C_{II}), располагающийся, как правило, по границам аустенитных зерен. По мере выделения вторичного цементита, состав аустенита изменяется по линии ES в сторону точки S. При температуре линии PSK состав аустенита достигает точки S, и он превращается в перлит. Таким образом, структура заэвтектоидной стали

состоит из перлита и сетки вторичного цементита. Выделение вторичного цементита по границам зерен повышает хрупкость стали.

Белый чугун. Кристаллизация начинается на линиях BC и CD и заканчивается на линии ECF. Доэвтектический белый чугун начинает кристаллизацию с образованием в жидком растворе кристаллов аустенита. При этом состав жидкости изменяется по линии BC в сторону точки C. При температуре линии ECF (1147 °C) состав оставшейся жидкости достигает точки C (4,3 % C), и она кристаллизуется в эвтектику – ледебурит. Следовательно, структура затвердевшего доэвтектического чугуна вблизи линии EC состоит из ледебурита и аустенита. При дальнейшем охлаждении доэвтектического чугуна из аустенита выделяется вторичный цементит. При этом состав аустенита изменяется по линии ES в сторону точки S. При температуре линии PSK состав аустенита (как структурно свободного, так и ледебуритного) достигает точки S, и он превращается в перлит. Таким образом, структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита (состоящего из перлита и цементита).

Эвтектический чугун в результате первичной кристаллизации затвердевает при температуре точки C в ледебурит (смесь аустенита и цементита). При достижении температуры линии PSK аустенитная составляющая ледебурита превращается в перлит. Ниже этой температуры сплав имеет структуру ледебурита, состоящего из перлита и цементита. Заэвтектический чугун начинает кристаллизацию ниже линии CD с образованием в жидком растворе кристаллов первичного цементита. При этом состав жидкости изменяется по линии CD в сторону точки C. При температуре линии ECF состав жидкости достигает точки C, и она кристаллизуется в ледебурит. Следовательно, структура затвердевшего заэвтектического чугуна ниже линии ECF состоит из ледебурита и первичного цементита. Такая структура сохраняется до комнатной

температуры, но при достижении сплавом температуры линии PSK аустенит ледебурита превращается в перлит.

В качестве примера применения правила отрезков и правила фаз рассмотрим сплавы с содержанием углерода 0,4 и 5,0 % (рис. 3).

Правило фаз

Для твердофазных диаграмм в том случае, когда вкладом парциальных давлений компонентов в общее давление над системой можно пренебречь, правило фаз принимает следующий вид:

$$C = K - \Phi + 1,$$

где: C – число степеней свободы;

K – число компонентов системы;

Φ – число фаз системы.

Правило отрезков

Для того чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию - коноду. Отрезки коноды между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

Правило отрезков в двойных диаграммах состояния можно применить только в двухфазных областях.

При помощи правила отрезков можно определить в любой двухфазной области диаграммы состав фаз (в данном случае - содержание углерода) и относительное количество каждой фазы.

Для этого через точку v , соответствующую произвольно выбранной температуре в интервале между точками 2 и 3, проведем отрезок az (сплав с 0,4 % C). Тогда количество всего сплава будет соответствовать отрезку az , масса аустенита – отрезку vz , а масса жидкого раствора – отрезку av . Состав аустенита (содержание углерода в аустените) определится проекцией точки a на ось абсцисс, а жидкого раствора – проекцией точки z на ту же ось.

сохраняя систему в том же состоянии, т.е. с тем же количеством фаз. Φ – число фаз. Для того чтобы определить C , достаточно подсчитать число фаз в данной точке или области. Поскольку между точками 3 и 4 число фаз равно единице (чистый аустенит), то $C = 2$, т.е. можно изменить два фактора равновесия (например, температуру и концентрацию), не изменяя числа фаз.

В точке 6 три фазы (аустенит, феррит и цементит в составе перлита), поэтому система в этой точке не имеет степеней свободы, она невариантна, т.е. нельзя изменить ни один из факторов равновесия, не изменяя числа фаз.

Фазовые превращения при нагревании рассмотрим на примере сплава II эвтектическом чугуна, содержащем 5,0 % С. В точке 2 (рис. 3) происходит превращение ледебурита второго в первый. Сущность этого превращения состоит в переходе перлита в аустенит. Между точками 2 и 3 происходит науглероживание аустенита, входящего в состав ледебурита до содержания в нем 2,14 % С. В точке 3 происходит расплавление ледебурита (эвтектика). Между точками 3 и 4 происходит растворение первичного цементита. Выше точки 4 сплав состоит из однородного жидкого раствора.

На рис. 4 представлены термические кривые сплава с 0,4 % С при охлаждении (а) и сплава с 5,0 % С при нагревании (б). Обозначение точек такое же, как и на рис. 3. Между точками сделана краткая запись фазовых превращений.

Для выбора температурных режимов термической обработки следует знать, что линия PSK диаграммы Fe-Fe₃C представляет собой совокупность критических точек A_{c1} (A_{r1}); линия GS – A_{c3} (A_{r3}); линия – SE – A_{cm} .

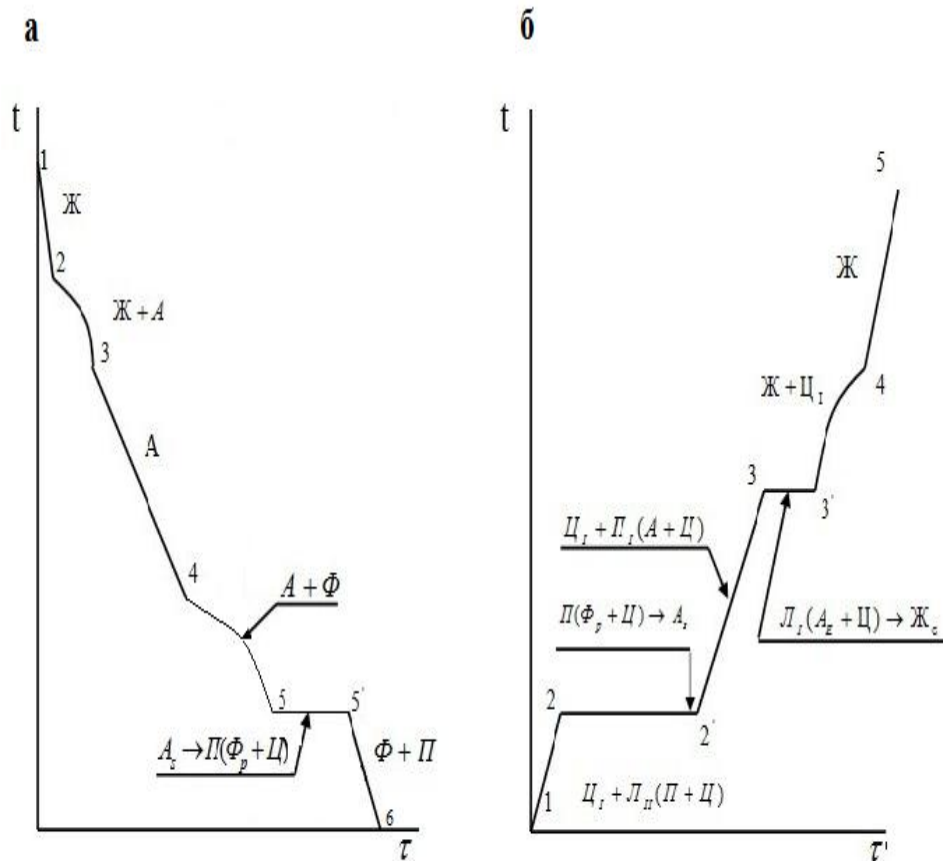


Рис. 4. Термические кривые сплава с 0,4 % С при охлаждении (а) и сплава с 5,0 % С при нагревании (б)

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Вычертить диаграмму Fe-Fe₃C.
2. Указать на диаграмме для каждой ее точки характерную температуру и концентрацию углерода.
3. Указать на диаграмме фазы и структурные составляющие.
4. Показать вертикальными линиями два сплава, назначенные преподавателем.

5. Обозначить цифрами точки пересечения сплавами линий диаграммы и провести анализ превращений этих сплавов при охлаждении и нагревании.
6. Построить термические кривые для указанных сплавов.
7. Выбрать для одного из сплавов температуру в двухфазной области и определить концентрацию углерода в фазах и количество каждой фазы, в процентах от количества сплава.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- диаграмму Fe-Fe₃C с указанием исследуемых сплавов, фаз и структурных составляющих, а также температур и концентраций углерода основных точек;
- название и определения фаз, входящих в систему Fe-Fe₃C;
- анализ превращений при охлаждении и нагревании заданных сплавов;
- термические кривые сплавов;
- результаты определения состава и расчета количества фаз в двухфазной области для одного из сплавов;
- реакции перитектического, эвтектического и эвтектоидного превращений.

Вопросы для самопроверки

1. Какой диаграммой пользуются при изучении сталей и чугунов?
2. Что называется сталью?
3. Что называется чугуном?
4. Перечислите равновесные фазы диаграммы железо-цементит.
5. Перечислите неравновесные фазы.
6. Что такое перлит?
7. Чем отличается перлит от троостита и сорбита?
8. Что такое феррит?
9. Что такое аустенит?

10. Что такое цементит?
11. Где на диаграмме железо-цементит располагается фаза «графит»?
12. Какой состав эвтектики диаграммы железо цементит?
13. Какая температура линии PSK?