

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М.В. Ломоносова  
Институт энергетики и транспорта

**ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ  
СИСТЕМЫ  
ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД**

*Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по материаловедению*

Архангельск  
2013

Рассмотрены и рекомендованы к изданию  
методической комиссией Института энергетики и транспорта  
Северного (Арктического) федерального университета  
9 октября 2013 г.

Составители:

*И.О. Думанский*, доцент, канд. техн. наук.  
*В.М. Александров*, доцент, канд. техн. наук.  
*С.И. Думанский*, доцент, канд. техн. наук.

Рецензент

*О.И. Бачин*, доцент, канд. техн. наук

УДК669

Диаграмма состояния системы железо-углерод: метод. указания к выполнению лаб. работы по материаловедению /сост.: И.О. Думанский, В.М. Александров, С.И. Думанский. – Архангельск: САФУ, 2013. – 15 с.

Приведены краткие теоретические сведения, методика выполнения лабораторных работ, порядок оформления, контрольные вопросы.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих курс материаловедения.

Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 4 назв.

© Северный (Арктический)  
федеральный университет, 2013

## **ВВЕДЕНИЕ**

С помощью диаграммы состояния сплавов описываются фазовые превращения, которые происходят при медленном изменении температуры и успевают полностью завершиться.

Среди большого количества диаграмм состояния различных двойных сплавов, изучаемых в металловедении, диаграмма системы *железо-углерод* занимает особое место, потому что эта система охватывает наиболее важные и широко применяемые во всех областях техники сплавы – сталь и чугун.

С помощью диаграммы кроме равновесных фазовых состояний компонентов определяются, например, такие важные данные, как необходимые температуры нагрева для проведения различных технологических обработок, связанных с фазовыми превращениями в сплавах, (например таких, как закалка, отжиг, ковка и т. д.)

Так как одной из главных задач металловедения является установление влияния условий различных видов термической обработки на структуру сплава и связи между структурой и свойствами, то важность изучения равновесной диаграммы состояния рассматриваемой системы становится тем более очевидной.

При взаимодействии железа с углеродом образуются фазы-твердые растворы и химические соединения, а также двухфазные структурные составляющие - механические смеси. В железоуглеродистых сплавах наблюдаются превращения не только в процессе кристаллизации из жидкого состояния или плавления, но и в твердом состоянии вследствие полиморфизма железа, а также ограниченной растворимости углерода в  $\alpha$ -железе и  $\gamma$ -железе. Таким образом, помимо практического интереса диаграмма состояния этих сплавов имеет и большое познавательное значение.

# 1. КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ СПЛАВОВ «ЖЕЛЕЗО - УГЛЕРОД» (Fe – C)

Химические элементы, входящие в сплав, называются компонентами. Системой сплавов называются набор компонентов, из которых они состоят. Сплавы могут состоять из двух, трех и более компонентов. Кроме основных компонентов сплавы могут содержать в небольших количествах и другие элементы, называемые примесями.

Компоненты в жидком состоянии обладают хорошей растворимостью друг в друге. В твердом состоянии они существуют в виде механической смеси кристаллов исходных материалов, находятся в химическом взаимодействии друг с другом или путём диффузии образуют так называемые твердые растворы.

В железоуглеродистых сплавах компонентами являются железо и углерод.

ЖЕЛЕЗО (Fe) – металл восьмой группы 4-го периода периодической таблицы. Имеет серебристо-серый цвет, температуру плавления  $1539^{\circ}\text{C}$ , плотность  $7,82 \text{ г/см}^3$ . Железо пластично, ферромагнитно (до температуры  $768^{\circ}\text{C}$  – точка Кюри) и обладает достаточно высокой стойкостью к коррозии. В повседневной практике химически чистое железо встречается редко. Применяемое в технике железо (техническое) содержит до 0,15 % примесей марганца, углерода, кремния, серы, фосфора, кислорода, водорода, азота и других элементов.

Возможность изготовления изделий способом глубокой вытяжки определяется высокой пластичностью железа: относительное удлинение  $\delta$  равно 30...40 %, сужение площади поперечного сечения (относительное сужение)  $\psi$  достигает 70...80 %. Прочностные характеристики технического железа довольно низки: предел прочности  $\sigma_{\text{в}}=280\text{...}320 \text{ МПа}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}=130\text{...}210 \text{ МПа}$ , твердость по Бринеллю HB500...800 МПа. Данные о механических свойствах железа, приводимые в различных источниках, отличаются друг от друга. Это объясняется различием

степени чистоты (химического состава) железа, использованного в эксперименте.

Железо обладает полиморфизмом, то есть изменяет тип кристаллической решетки при нагревании и охлаждении (рис.1). Температуры превращений железа и железоуглеродистых сплавов называют критическими точками и обозначают буквой А с индексами 1,2,3 и т.д., указывающими на характер превращения. Для железа точка  $A_2$  - точка Кюри - не связана с полиморфным превращением. Выше неё железо становится парамагнитным. Точки  $A_3$  и  $A_4$  – точки полиморфного превращения.

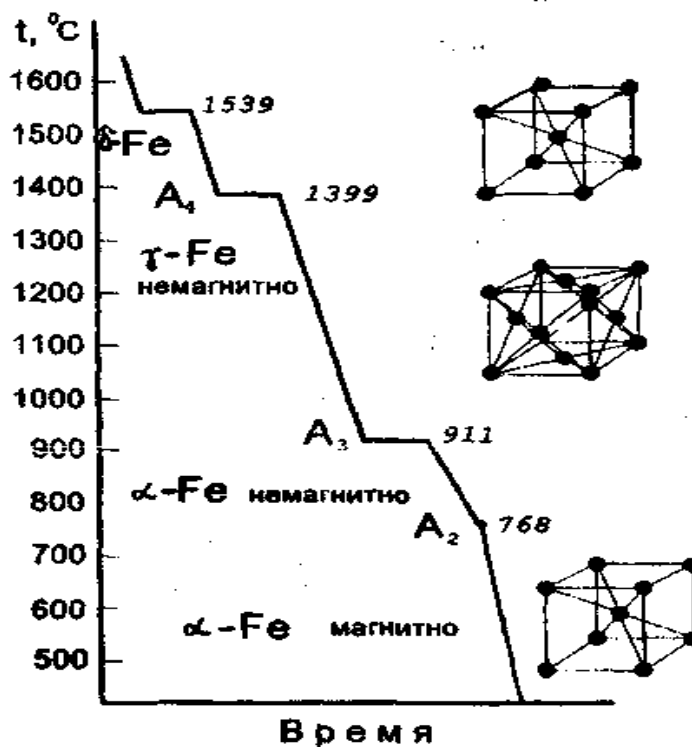


Рис.1. Кривая охлаждения железа

Для отличия превращений, протекающих при нагревании, от превращений при охлаждении принято к обозначениям критических точек добавлять индексы: при нагревании – с ( $A_{c3}$ ,  $A_{c4}$ ), а при охлаждении – г ( $A_{r3}$ ,  $A_{r4}$ ).

УГЛЕРОД (С) является неметаллическим элементом 2-го периода четвертой группы периодической таблицы. Его плотность равна  $2,22 \text{ г/см}^3$ , температура плавления  $3500 \text{ }^\circ\text{C}$ . В свободном

состоянии в природе углерод встречается в виде двух полиморфных модификаций – графита (стабильная модификация) с гексагональной слоистой решёткой и алмаза (метастабильная модификация) с сложной ромбической решёткой типа алмаза. В железоуглеродистых сплавах углерод может находиться в следующих формах: в свободном состоянии – в виде графита (в серых чугунах) и в связанном состоянии - в твердых растворах на основе  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железа и в составе химического соединения – карбида железа  $Fe_3C$ .

## 2. ФАЗЫ И ДВУХФАЗНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

*Фазой* называют однородную часть сплава( имеющую одни и те же строение, состав, агрегатное состояние), отделенную от других частей сплава поверхностью раздела(границей). В сплавах железа с углеродом *фазами* являются жидкий раствор углерода в железе(жидкость), цементит, твердые растворы углерода в  $\alpha$ -,  $\delta$ - и  $\gamma$ -железе.

ЦЕМЕНТИТ (Ц) – химическое соединение железа с углеродом  $Fe_3C$  (карбид железа), содержащее 6,67 % углерода. Имеет сложную ромбическую решётку типа алмаза. Цементит ферромагнитен(до температуры 210 °С- точка Кюри), обладает высокой твердостью (твердость по Бринеллю равна примерно 8000 МПа ) и очень хрупок. Из этого следует, что цементит в сплавах железа с углеродом повышает их твердость, но уменьшает вязкость и пластичность. В структурах сталей и чугунов цементит присутствует в виде игл, отдельных включений и сетки по границам зерен.

ФЕРРИТ (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ - или  $\delta$ -железо. Феррит имеет кубическую объемно-центрированную кристаллическую решетку (рис.1). Растворимость углерода в феррите ( $\alpha$ -железе) зависит от температуры. При комнатной температуре в феррите растворяется около 0,01 % углерода. С повышением температуры растворимость углерода в феррите возрастает и достигает максимальной 0,025 % (при 727 °С). В зависимости от

модификации различают низкотемпературный  $\alpha$ -феррит  $Fe_{\alpha}(C)$  и высокотемпературный  $\delta$ -феррит  $Fe_{\delta}(C)$ . Феррит обладает высокой пластичностью ( $\delta$  до 50 %), низкими твердостью (НВ 700... 800 МПа) и прочностью ( $\sigma_B = 250$  МПа) и высокими магнитными свойствами, которые сохраняются при нагревании до температуры 768 °С (точка Кюри).

АУСТЕНИТ (А) – твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо  $Fe_{\gamma}(C)$ . Аустенит имеет кубическую гранцентрированную решетку (рис.1). Существует в стабильном состоянии при температуре выше 727 °С. Растворимость углерода в аустените ( $\gamma$ -железе) зависит от температуры. Максимальная растворимость составляет 2,14 % (при 1147 °С), предельная растворимость при минимальной температуре его стабильного существования (при 727 °С) – 0,8 %. Аустенит парамагнитен, обладает большой пластичностью при высоких температурах и малой склонностью к хрупкому разрушению, что используют в практике при горячей обработке стали (ковке, штамповке, прокатке и т. д.).

В зависимости от температуры и содержания углерода сплавы железа с углеродом помимо фаз могут иметь следующие *двухфазные (гетерофазные) структурные составляющие*: перлит (П) и ледебурит (Л).

ПЕРЛИТ (П) – *эвтектоидная* смесь, состоящая из двух фаз – феррита и цементита. Эта структура образуется в результате распада аустенита с содержанием углерода 0,8 % при температуре 727 °С и ниже. Содержание углерода в перлите для всех железоуглеродистых сплавов всегда постоянно и равно 0,8 %. (Этот сплав назван перлитом потому, что после травления его поверхность приобретает характерный перламутровый отлив). В зависимости от формы частиц цементита перлит может быть пластинчатым или зернистым. Пластинчатый перлит состоит из перемежающихся пластин феррита и цементита, а зернистый содержит цементит в виде глобулей (зернышек) в ферритной основе (матрице). Пластинчатый перлит образуется при ускоренном непрерывном охлаждении, а для

получения зернистого перлита требуются особые условия – очень медленное охлаждение или длительная выдержка при температуре 727 °С (т.н. отжиг на зернистый перлит). Твердость пластинчатого перлита НВ 2000... 2500, а зернистого - 1600... 2200 МПа.

ЛЕДЕБУРИТ (Л) – *эвтектическая* смесь, которая образуется из жидкой фазы (из расплава) с концентрацией углерода 4,3 % при температуре 1147 °С. В диапазоне температур 1147...727 °С ледебурит состоит из двух фаз – аустенита и цементита. При температуре ниже 727 °С аустенит внутри ледебурита превращается в перлит. Таким образом, ниже 727 °С ледебурит также представляет механическую смесь, но состоящую уже из перлита и цементита (а по фазам – из феррита и цементита). Содержание углерода в ледебурите всегда постоянно и составляет 4,3 %. Твердость ледебурита достигает НВ 7000 МПа.

### **3. ХАРАКТЕРНЫЕ ТОЧКИ, ЛИНИИ И ОБЛАСТИ НА ДИАГРАММЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»**

Как было отмечено выше, углерод в железоуглеродистых сплавах может находиться в связанном виде (в основном – в виде цементита), или в свободном – в виде графита. В природе графит является стабильной модификацией углерода (он не превращается с течением времени); цементит же является нестабильной (метастабильной) фазой и при определенных внешних условиях (температура, время) распадается с образованием железа и чистого углерода в виде графита. Между тем, при сравнительно быстром нагреве и охлаждении железоуглеродистых сплавов в процессе кристаллизации, как правило (а в сталях – всегда), образуется цементит, а не графит. Поэтому наибольшее применение в практике нашла диаграмма состояния системы «железо-цементит». Она и рассматривается в настоящей работе. Наряду с этой диаграммой часто рассматривают диаграмму системы «железо-графит», отличающуюся от первой незначительными разницеми температур первичной и



вторичной кристаллизации. В настоящее время в литературе довольно часто показывают обе эти диаграммы. Диаграмму системы «железо-цементит» называют метастабильной и показывают сплошными линиями; диаграмму «железо-графит» называют стабильной и показывают пунктирными линиями.

Диаграмма состояния системы «железо-цементит» показана на рис. 2. По горизонтальной оси откладывается содержание углерода в сплаве в процентах, по вертикальной оси – температура. Иногда на оси вместо содержания углерода показывают содержание цементита, причем содержанию углерода 6,67 % (крайняя правая точка) соответствует содержание в сплаве цементита 100 %. Для перевода содержания углерода в содержание цементита исходят из того, что в сплаве 0,1 % углерода соответствует 1,5 % цементита.

Сплавы с содержанием углерода до 2,14 % называют сталями, а свыше 2,14 % до 6,67 % - чугунами.

Характерные точки диаграммы отмечены буквами латинского алфавита в соответствии с международным обозначением.

Каждая точка на диаграмме характеризуется строго определенным составом при соответствующей температуре (табл.1).

Особенностью железоуглеродистых сплавов является то, что превращения в них происходят не только при кристаллизации жидкого сплава, но и в твердом состоянии вследствие полиморфных переходов модификаций железа при изменении температуры. На диаграмме (рис.2) показаны следующие линии:

**ABCD** – линия ЛИКВИДУС показывает температуры начала затвердевания сплавов. При температурах выше температур, определяемых этой линией, все сплавы находятся в жидком состоянии, представляющем собой раствор углерода в железе (жидкая фаза).

**АНЖЕСФ** – линия СОЛИДУС. При температурах ниже температур, определяемых этой линией, все сплавы находятся в твердом состоянии.

**AB** – линия температур начала выделения из жидкого раствора

кристаллов феррита.

**BC** и **CD** линии температур начала первичной кристаллизации аустенита (BC) и цементита (CD).

**АН** – линия температур окончания затвердевания сплавов, образующих феррит. По ней определяют состав феррита, кристаллизующегося при температурах, определяемых линией АВ.

**JE** – линия солидуса аустенита, начало кристаллизации которого определяется линией ABC.

**HJB** – линия температур перитектического превращения при 1499 °C :  $Fe_3(C)_H + Ж_B \rightarrow Fe_\gamma(C)_J$ .

Точка	Температура при нагреве, °C	Предельная концентрация углерода, %	Характеристика точки
A	1539	0	Температура плавления железа
B	1499	0,51	Состав жидкой фазы при перитектической реакции
C	1147	4,3	Состав эвтектики - ледебурита
D	1260	6,67	Температура плавления цементита
E	1147	2,14	Предельная растворимость углерода в $\gamma$ -железе
J	1499	0,16	Состав аустенита при перитектической реакции
H	1499	0,1	Состав феррита при перитектической реакции
N	1399	0	Превращение $\delta$ -железа в $\gamma$ -железо
G	911	0	Превращение $\alpha$ -железа в $\gamma$ -железо
S	727	0,8	Состав эвтектоида - перлит
P	727	0,025	Предельная растворимость углерода в $\alpha$ -железе
Q	20	0,01	Минимальная растворимость углерода в $\alpha$ -железе

Табл.1. Характерные точки диаграммы состояния системы железо-углерод

**HN** – линия предельной растворимости углерода в  $\delta$ -железе. В то же время эта линия показывает начало перехода в  $\gamma$ -железо при охлаждении или конец этого превращения при нагреве.

**JN** – линия конца перехода  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо при охлаждении или начала этого превращения при нагреве.

**ECF** – линия эвтектического превращения:  $\text{Ж}_C \rightarrow \text{Fe}_\delta(\text{C})_p + \text{Fe}_3\text{C}$ . Она обозначает температуру образования эвтектики (ледебурита) и температуру конца первичной кристаллизации сплавов, содержащих углерода более 2,14 %.

**GS** и **ES** – линии температур начала вторичных превращений (перекристаллизации). Линия **ES** также является линией предельной растворимости углерода в  $\gamma$ -железе в интервале температур от 1147 до 727 °С. Линия **GS** показывает также температуры начала полиморфного превращения  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо (выделение феррита из аустенита при охлаждении и конец обратного превращения при нагреве). Температуры превращений на линии **ES** обозначаются как критические точки  $A_{\text{ст}}$ , а на линии **GS** –  $A_3$ .

**PG** – линия температур конца первичной перекристаллизации аустенита в феррит (линия изменения растворимости углерода в феррите).

**PSK** – линия эвтектоидного превращения аустенита состава, соответствующего составу в точке **S** ( $C=0,8$  %) при температуре 727 °С:  $\text{Fe}_\gamma(\text{C})_s \rightarrow \text{Fe}_\alpha(\text{C})_p + \text{Fe}_3\text{C}$ . Температуры превращений по этой линии обозначаются  $A_1$ .

**PQ** – линия температур начала кристаллизации третичного цементита из феррита (линия переменной растворимости углерода в феррите при температуре от 727 °С до комнатной).

На диаграмме обозначены также следующие области и соответствующие им фазы:

- 1) область выше линии **ABC** – однородный жидкий сплав железа с углеродом;
- 2) **ABH** - жидкий сплав и  $\delta$ - феррит;
- 3) **BCEJ** - жидкий сплав и аустенит;
- 4) **DCF** - жидкий сплав и цементит (первичный);
- 5) **AHN** -  $\delta$ - феррит;
- 6) **HJN** -  $\delta$ -феррит и аустенит;

- 7) NJESG – аустенит;
- 8) EFKS – аустенит и цементит (вторичный);
- 9) GSP – аустенит и феррит;
- 10) QPG – феррит;
- 11) PKLQ – феррит и цементит (вторичный и третичный).

### **Контрольные вопросы**

1. В каких координатах строится диаграмма состояния системы железо-углерод?
2. Что можно определить с помощью диаграммы состояния системы железо-углерод?
3. Какие фазы и структуры образуются при сплавлении железа с углеродом?
4. Какие превращения происходят при охлаждении и нагреве железоуглеродистых сплавов в твердом состоянии?
5. Что понимается под критическими точками, характерными для железоуглеродистых сплавов?
6. Какие кристаллические структуры имеет железо?
7. Что такое фаза?
8. Дайте определение феррита, аустенита, цементита, перлита, ледебурита.
9. Какие сплавы называют сталями? Чугунами?
10. Что такое пластинчатый и зернистый перлит?
11. Может ли обычная конструкционная сталь иметь структуру аустенита при комнатной температуре? Почему?
12. Может ли сталь У8 иметь структуру перлита при 750 °С? Почему?

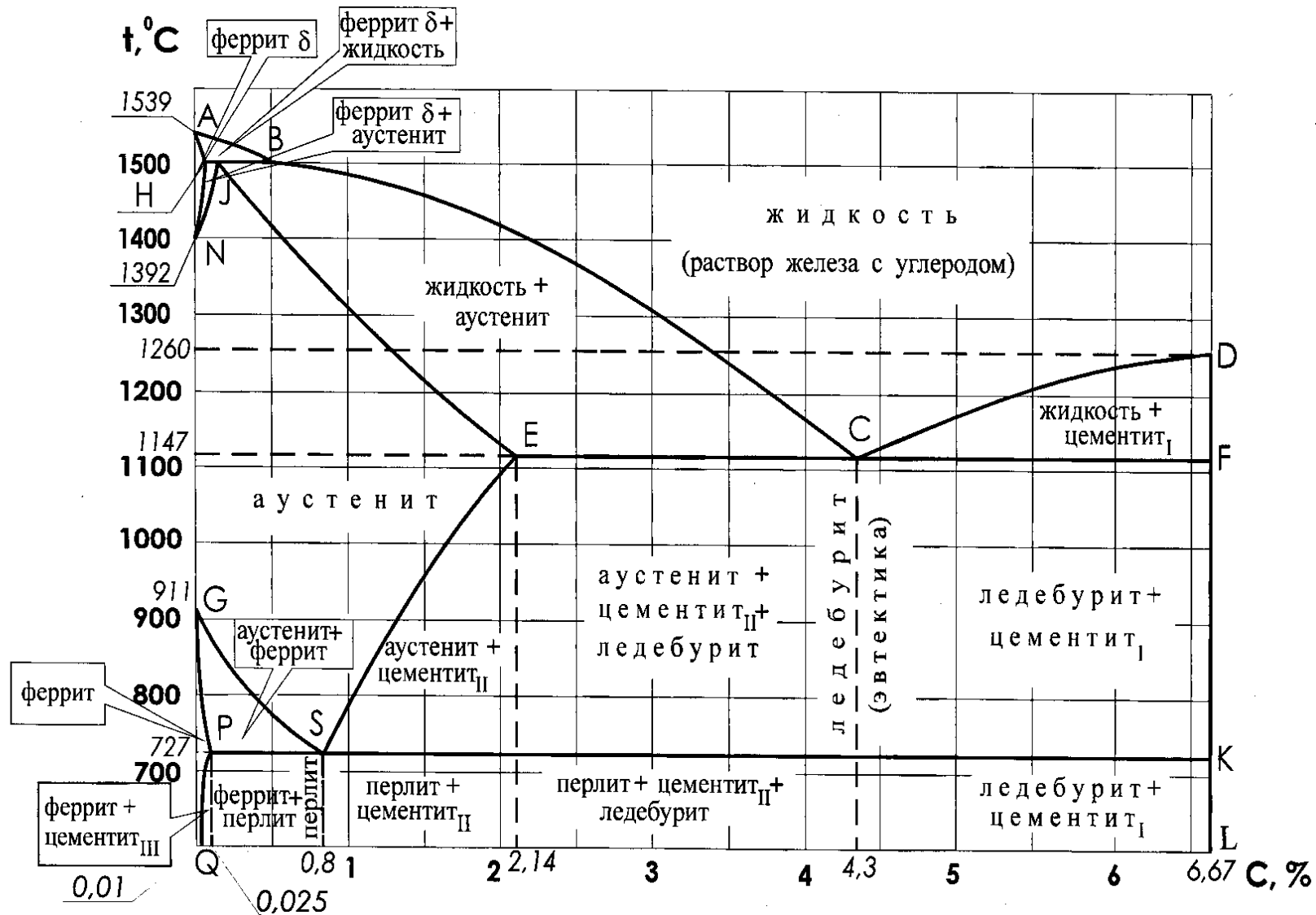


Рис. 2. Диаграмма состояния системы «железо-углерод»

## Список рекомендуемой литературы

- 1 Гуляев, А.П., Гуляев, А.А. Металловедение: Учебник для вузов [Текст]/ А.П. Гуляев, А.А. Гуляев, 7-е изд., перераб. и доп. М, ИД Альянс, 2011. – 644 с.
- 2 Материаловедение: учебник для вузов [Текст]/ Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.
- 3 Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов [Текст]/ Т.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. М.: Высш. шк., 2002. – 638 с.
- 4 Лахтин, Ю.М., Леонтьева, В.П. Материаловедение: учебник для вузов [Текст]/ Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева, М.: Альянс, 2011. – 448 с.

## Оглавление

Введение .....	1
1. Компоненты системы сплавов «железо-углерод» (Fe – C) .....	5
2. Фазы и двухфазные структурные составляющие .....	7
3. Характерные точки, линии и области на диаграмме состояния системы «железо-углерод» .....	9
Контрольные вопросы .....	12
Список рекомендуемой литературы .....	14