

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

Нижнетагильский технологический институт (филиал)

Кафедра металлургической технологии

О. И. Шевченко

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Методические указания к выполнению лабораторных и практических
работ по курсам «Материаловедение», «Металловедение».

*Утверждено методическим советом Нижнетагильского технологического
института (филиал) УрФУ в качестве учебно-методического пособия для
направления **22.03.02- Металлургия***

РАЗМЕЩЕНО В ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ НТИ (филиал) УрФУ

Нижний Тагил
2017

УДК 66.017 (075.8)

ББК 30.3 я 73

Ш 37

Рецензент: доцент кафедры общего машиностроения НТИ (ф) УрФУ,
канд. техн. наук Г. Е. Трекин.

Шевченко О.И.

Ш 37 Исследование структуры углеродистых сталей. Методические указания к выполнению лабораторных и практических по курсам «Материаловедение», «Металловедение» [Электронный ресурс]: / составитель Шевченко О.И. М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетаг. технолог. ин-т (фил). – Нижний Тагил : НТИ (ф) УрФУ, 2017. – 25 с.

В пособии содержится теоретический материал, методические указания к выполнению практических занятий по курсам «Материаловедение», «Металловедение».

Данные методические указания предназначены для направления
22.03.02- Металлургия.

УДК 66.017 (075.8)

ББК 30.3 я 73

© Шевченко О.И. 2017

© ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Нижнетагильский технологический институт (филиал), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СПЛАВАХ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ	5
2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ $Fe - C$, ЛИНИИ И ТОЧКИ ДИАГРАММЫ	6
3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ	7
4. ФАЗОВАЯ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ.....	10
5. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	16
6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ.....	19
7. ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	21
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	23
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ. Образец титульного листа.....	25

ВВЕДЕНИЕ



Среди диаграмм состояния металлических сплавов самое большое значение имеет диаграмма состояния системы Fe - C. Это объясняется тем, что в технике наиболее широко применяют железоуглеродистые сплавы. Имеются две диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов: метастабильная, характеризующая превращения в системе Fe – Fe₃C (цементит), и стабильная, характеризующая превращения в системе Fe – C (рис. 1).

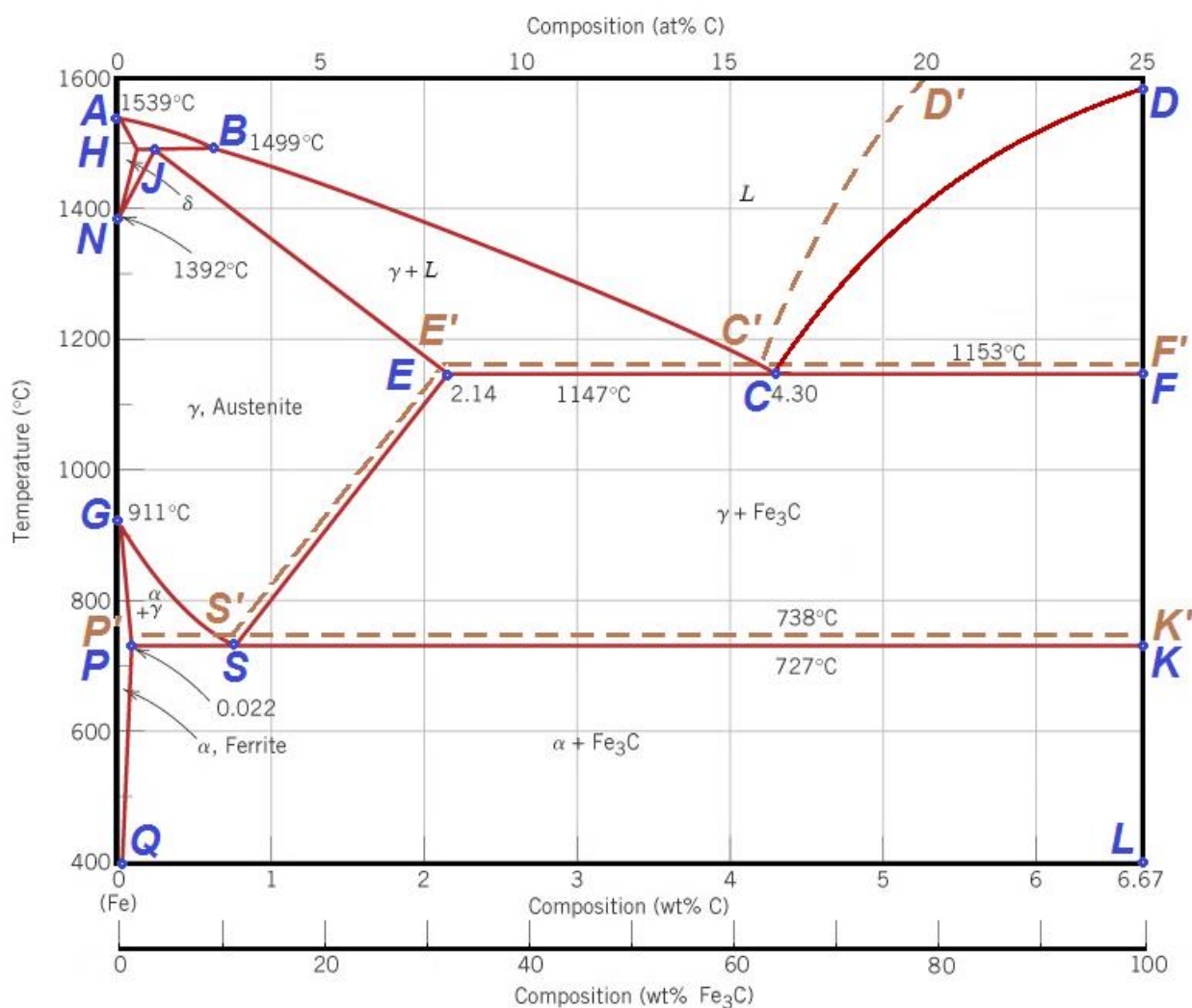
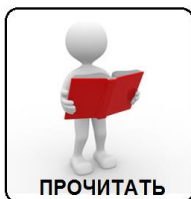


Рис. 1. Диаграмма состояния системы железо – углерод

На то, что система *Fe – C* является более стабильной, чем система *Fe – Fe₃C*, указывает тот факт, что при нагреве до высоких температур цементит распадается на железо и графит, т. е. переходит в более стабильное состояние.

1. КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СПЛАВАХ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ



Железо с температурой плавления 1539°C имеет две модификации – α и γ . Модификация Fe_{α} существует от комнатной температуры до 911°C и имеет ОЦК решетку с периодом $0,286\text{ нм}$. Важной особенностью Fe_{α} является его ферромагнетизм ниже температуры 768°C , называемой точкой Кюри, которую обозначают как A_2 . Выше точки Кюри железо становится парамагнитным. При температуре 911°C $\alpha\text{-Fe}$ переходит в $\gamma\text{-Fe}$ с ГЦК решеткой. Эта модификация существует в интервале $911 - 1392^{\circ}\text{C}$. ГЦК решетка более компактная, чем ОЦК. В связи с этим при $Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$ объем железа уменьшается приблизительно на 1% . При температуре 1392°C $\gamma\text{-Fe}$ переходит в $\delta\text{-Fe}$ снова с решеткой ОЦК. Обычно температуру полиморфного превращения $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ обозначают как критическую точку A_3 , а температуру превращения $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ при 1392°C как точку A_4 .

Углерод существует в двух модификациях: графита и алмаза. При нормальных условиях стабилен графит, алмаз представляет собой его метастабильную модификацию. При высоких давлениях и температурах стабильным становится алмаз.

Фазы в сплавах $Fe - C$ представляют собой **жидкий раствор, феррит, аустенит, цементит и свободный углерод** в виде графита.

Феррит (обозначают Φ или α) – твердый раствор внедрения углерода в Fe_{α} . Различают низкотемпературный и высокотемпературный феррит. Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите составляет лишь $0,02\%$, в высокотемпературном – $0,1\%$. Столь низкая растворимость углерода в Fe_{α} обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК решетке. Значительная доля атомов углерода вынуждена размещаться в дефектах (вакансиях, дислокациях). Феррит – мягкая, пластичная фаза с механическими свойствами: $\sigma_s = 300\text{ МПа}$; $\delta = 40\%$; $\psi = 70\%$; $KCU = 2,5\text{ МДж/м}^2$; твердость – $80 \div 100\text{ НВ}$.

Аустенит (обозначают A или γ) – твердый раствор внедрения углерода в Fe_{γ} . Он имеет ГЦК решетку, межатомные поры в которой больше, чем в ОЦК решетке, поэтому растворимость углерода в Fe_{γ} больше – $2,14\%$. Аустенит пластичен, но тверже феррита ($160 - 200\text{ НВ}$) при $20 - 25^{\circ}\text{C}$.

Цементит (обозначают C или Fe_3C) – карбид железа (почти постоянного состава) Fe_3C , содержит $6,67\%$ C и имеет сложную ромбическую решетку. При нормальных условиях цементит тверд (800 НВ) и хрупок. Он слабо ферромагнитен и теряет ферромагнетизм при 210°C . Температуру плавления цементита трудно определить в связи с его распадом при нагреве. При нагреве лазерным лучом она установлена равной 1260°C .

Графит – углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Имеет гексагональную кристаллическую решетку. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок.

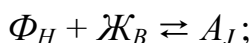
2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ $Fe - C$, ЛИНИИ И ТОЧКИ ДИАГРАММЫ

Диаграмма состояния $Fe - Fe_3C$ (см. рис. 1) характеризует фазовый состав и превращения в системе $Fe - Fe_3C$. Особенность диаграммы – наличие на оси составов двух шкал, показывающих содержание углерода и цементита. Координаты характерных точек диаграммы следующие: точка A ($1539^{\circ}C$) определяет температуру плавления, точка N ($1392^{\circ}C$) и G ($911^{\circ}C$) соответствуют температурам полиморфных превращений железа. Точки H (0,1 % C) и P (0,02 % C) характеризуют предельную концентрацию углерода в высокотемпературном и низкотемпературном феррите. Точка E (2,14 % C) определяет наибольшую концентрацию углерода в аустените.

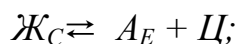
Превращения в сплавах системы $Fe - Fe_3C$ происходят как при затвердевании жидкой фазы, так и в твердом состоянии. Первичная кристаллизация идет в интервале температур, определяемых на линиях ликвидус ($ABCD$) и солидус ($AHJECFD$). Вторичная кристаллизация вызвана превращением железа одной модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите; при понижении температуры эта растворимость уменьшается. Избыток углерода из твердых растворов выделяется в виде цементита. Линии ES и PQ характеризуют изменение концентрации углерода в аустените и феррите соответственно. Цементит имеет почти неизменный состав (вертикальная линия $DFKQ$). Выделяющийся из расплава цементит называют *первичным*, из аустенита – *вторичным*, из феррита – *третичным*. Соответственно на диаграмме состояния CD – линия выделения первичного цементита, ES – линия выделения вторичного цементита (принято критические точки, соответствующие линии ES , обозначать A_{cm}); PQ – линия выделения третичного цементита.

В системе $Fe - Fe_3C$ происходят три изотермических превращения:

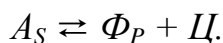
- перитектическое превращение на линии HJB ($1499^{\circ}C$):



- эвтектическое превращение на линии ECF ($1147^{\circ}C$):



- эвтектоидное превращение на линии PSK ($727^{\circ}C$):



Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется *ледебуритом*, эвтектоидная смесь феррита и цементита – *перлитом*. Эвтектоид – перлит (0,8 % C) и эвтектику – ледебурит (4,3 % C) рассматривают как самостоятельные структурные составляющие, оказывающие заметное влияние на свойства сплавов. Перлит чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей: $\sigma_b = 800...900$ МПа; $\sigma_{0,2} = 450$ МПа; $\delta \leq 16$ %; твердость 180...220 HB. При охлаждении ледебурита до температур ниже линии PSK входящий в него аустенит превращается в перлит, и при 20 – 25°C ледебурит представляет собой смесь

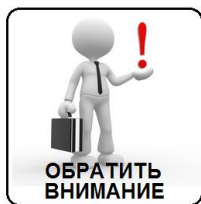
цементита и перлита (*превращенный ледебурит*). В этой структурной составляющей цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости ($> 600\text{ HB}$) и хрупкости. Присутствие ледебурита в структуре сплавов обуславливает их неспособность к обработке давлением, затрудняет обработку резанием.

Железоуглеродистые сплавы подразделяют на две группы: стали, содержащие от 0,02 до 2,14 % С и чугуны, содержащие выше 2,14 % С. Различают *доэвтектоидные стали*, расположенные по составу левее точки S диаграммы, т. е. между точками P и S , и *заэвтектоидные стали*, находящиеся правее точки S , т. е. между точками S и E диаграммы. Сплав железо – углерод, отвечающей точке S , называется *эвтектоидной сталью*. Чугун может быть *доэвтекктическим*, расположенным по составу между точками E и C диаграммы, и *заэвтекктическим*, лежащим по составу между точками C и F диаграммы. Отметим, что на практике содержание углерода в заэвтекктических чугунах обычно не превышает 5 %. Чугун, состав которого отвечает составу точки C , называется *эвтекктическим*.

Структура чугунов может формироваться как по метастабильной, так и по стабильной диаграмме железо – углерод, Чугуны, структура которых образуется по метастабильной диаграмме $Fe - C$, называют *белыми чугунами*, а чугуны, кристаллизующиеся по стабильному варианту диаграммы $Fe - C$, – *серыми чугунами*.

Эти названия чугуны получили по виду излома. Излом белых чугунов блестящий, кристаллический, а у серых чугунов – матовый, что обусловлено наличием в их структуре графита.

3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ



Кристаллизация чистого железа протекает изотермически при 1539°C , а сплавов железа с углеродом – в интервале температур. В сплавах с содержанием углерода до 0,5 % при охлаждении происходит кристаллизация δ -твердого раствора (рис.2) причем ***сплавы, содержащие до 0,1 % углерода, не имеют перитектического превращения, а сплавы, содержащие от 0,1 до 0,5 % углерода, имеют перитектическое превращение.***

Сплав 1. Содержание углерода 0,01 % (рис.2.). Выше точки 1 , лежащей на линии ликвидуса AB , сплав находится в жидком виде. В точке 1 из жидкого сплава, начинается кристаллизация δ -твердого раствора. Процесс заканчивается в точке 2 , и дальше полностью застывший сплав в состоянии δ -твердого раствора охлаждается без всяких превращений до тех пор, пока не придет в точку 3 линии HN .

При температуре точки 3 δ -твердый раствор начинает перестраиваться в γ -твердый раствор, причем состав первых кристаллов образовавшегося

аустенита определяется точкой b на линии JN .

В интервале температур между точками 3 и 4 этот переход δ -твердого раствора в аустенит будет продолжаться. При этом состав кристаллов аустенита будет определяться при любой искомой температуре на линии JN в непрерывном изменении от точки b до точки 4.

Состав остающихся кристаллов δ -твердого раствора будет соответственно изменяться по линии HN в направлении от точки 3 к точке N . В точке 4 (A_4) процесс перехода $\delta \rightarrow \gamma$ закончится и дальше сплав с содержанием 0,01 % углерода будет охлаждаться в состоянии аустенита.

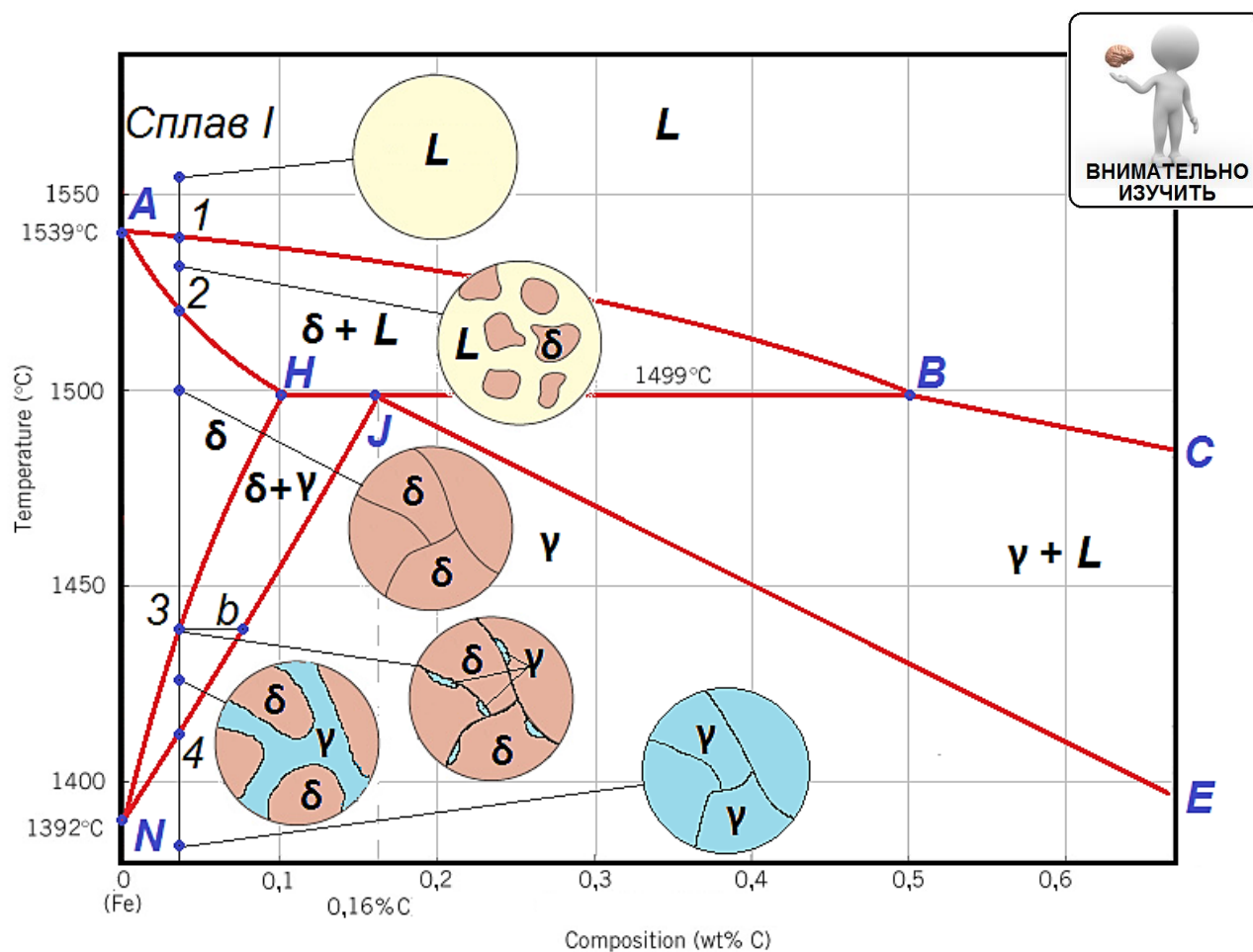


Рис.2. Схема кристаллизации δ -твердого раствора

Сплав II. Содержание углерода 0,13 % (рис.3.). Кристаллизация сплава начнется в точке 1 с выделением кристаллов δ -твердого раствора. С дальнейшим охлаждением продолжается процесс кристаллизации, причем состав жидкой фазы будет непрерывно изменяться по линии ликвидуса от точки 1 к точке B, а состав кристаллов δ -твердого раствора будет одновременно изменяться по линии AN к точке H.

Вместе с изменениями химического состава жидкой и твердой фаз будут изменяться и их весовые количества. Так, например, при некоторой промежуточной температуре t_1 сплав будет состоять из жидкой фазы состава точки c и твердой фазы состава точки a , находящихся между собой в равновесии.

Когда сплав достигнет температуры 1499°C, т. е. точки 2, он будет претерпевать перитектическое превращение. При этой температуре жидкая фаза состава точки *B* будет реагировать с δ -твердым раствором предельной насыщенности, состава точки *H*, в результате чего образуется некоторое количество новой твердой фазы – аустенита, состава точки *J*.

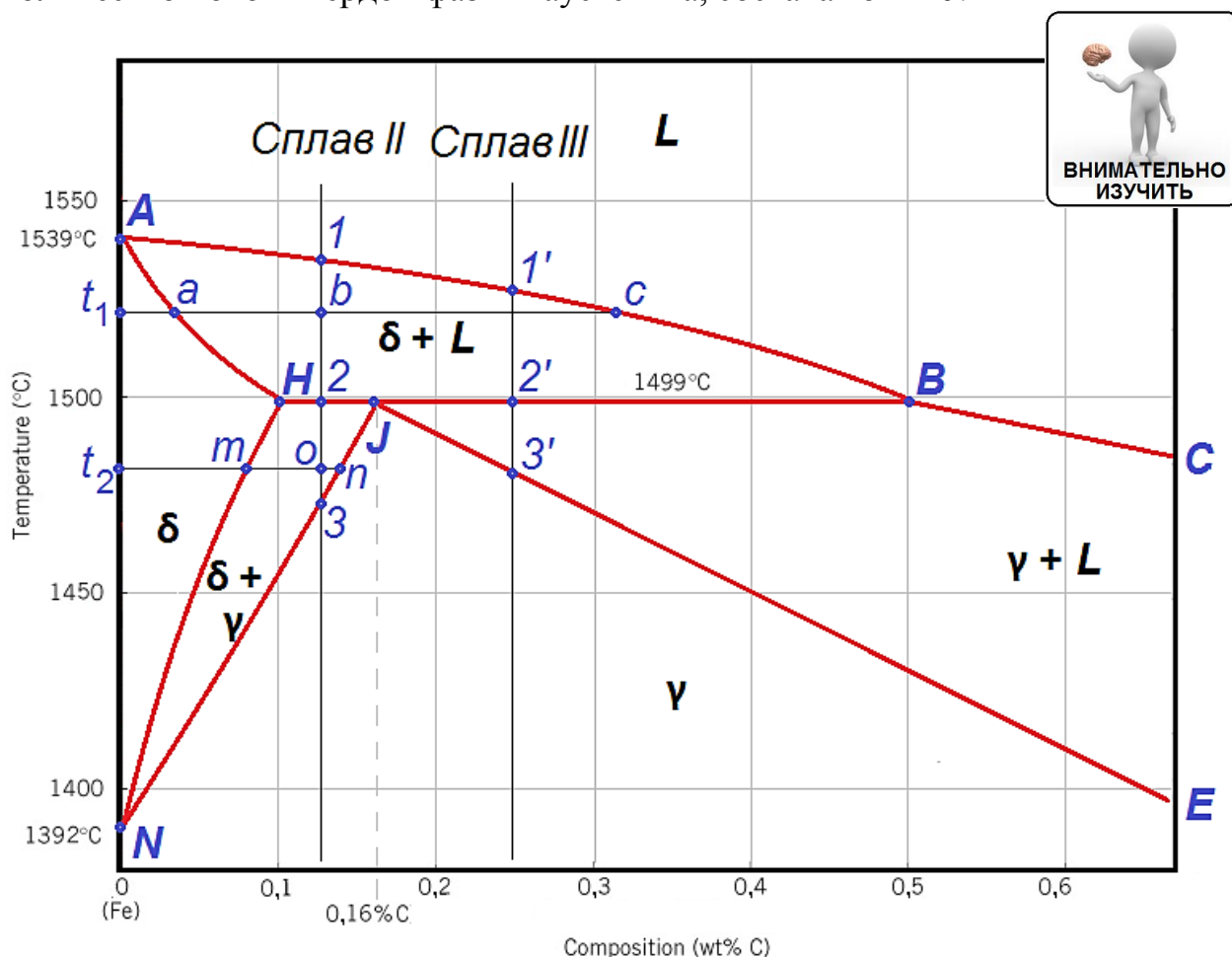


Рис.3. Затвердевание с перитектической реакцией в сталях

Так как во время протекания перитектической реакции сплав состоит из трех фаз (жидкий сплав, δ -твердый раствор и аустенит), то по правилу фаз система не должна иметь ни одной степени свободы, так как

$$C = K - \Phi + 1 = 2 - 3 + 1 = 0.$$

Поэтому линия *NB* является горизонтальной, т. е. все эти три фазы находятся при постоянной температуре.

К моменту прихода сплава к точке 2 количество жидкой фазы состава точки *B* было пропорционально отрезку *H2*, а твердого раствора состава точки *H* – пропорционально отрезку *B2*.

Перитектическая реакция сплава *II* (как и для всякого другого сплава с содержанием углерода от 0,1 % до 0,16 %) окончится тем, что жидкая фаза будет израсходована полностью и исчезнет из системы, а δ -твердый раствор частично останется неиспользованным.

По окончании реакции сплав будет состоять из двух фаз: δ -твердого

раствора состава точки H и аустенита состава точки J . Когда сплав станет двухфазным, у него появится одна степень свободы и система будет охлаждаться дальше от точки 2 к точке 3.

В этом интервале температур δ -твердый раствор будет постепенно переходить в аустенит вследствие перестройки железа- δ в железо- γ , причем первый (δ -твердый раствор) будет менять свой состав по линии HN , а второй (аустенит) по линии JN . Количество δ -твердого раствора, естественно, будет все время уменьшаться, а количество аустенита увеличиваться.

В точке 3 (A_4) процесс перекристаллизации закончится полностью и дальше сплав с содержанием углерода 0,13 % будет охлаждаться в состоянии аустенита.

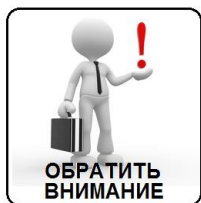
Сплав III. Содержание углерода 0,25 % (рис.3). В сплаве начнется кристаллизация в точке $1'$. Чем больше углерода содержится в сплаве (до 4,3 %), тем при более низкой температуре он начинает кристаллизоваться. Между точками $1'$ и $2'$, как и в первых двух разобранных выше сплавах, из жидкой фазы выделяются кристаллы δ -твердого раствора. При температуре 1499°C сплав будет также претерпевать перитектическое превращение, аналогично рассмотренному ранее в сплаве II.

В сплаве III ввиду иного соотношения количеств имеющихся в системе фаз, где уже в избытке имеется жидкая фаза, перитектическое превращение окончится тем, что δ -твердый раствор будет весь израсходован и уйдет из системы, а останутся вновь образованная твердая фаза – аустенит состава точки J и неполностью израсходованная жидкая фаза состава точки B .

С дальнейшим понижением температуры от точки $2'$ жидкий сплав кристаллизуется; с непосредственным выделением кристаллов аустенита, состав которого будет непрерывно изменяться от точки J (0,16 % C) к точке $3'$. В точке $3'$ сплав полностью закристаллизуется и будет находиться в состоянии аустенита. Схема формирования структуры сплавов II и III типична для перитектических составов и подробно изложена в [6].

Первичная кристаллизация сплавов, содержащих от 0,5 до 2,14 % углерода, не представляет каких-либо затруднений для разбора, потому что является обычной кристаллизацией твердых растворов [7].

4. ФАЗОВАЯ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ



Процессы фазовых превращений, идущих в твердом состоянии сплавов, называют *перекристаллизацией*.

Область $NJESG$ (см.рис.1) включает в себе сплавы в состоянии твердого раствора углерода в γ -железе, т. е. аустенит. Аустенит в сплавах, содержащих до 0,5 % C, образовался из δ -твердого раствора, а аустенит с содержанием от 0,5 до 2,14 % C сам кристаллизовался из жидкого сплава. Несмотря на различное происхождение, аустенит везде имеет одинаковую природу и свойства.

Аустенит с содержанием углерода 0,8 % при температуре 727°C испытывает эвтектоидное превращение. Однако есть небольшая подгруппа сплавов, не испытывающих эвтектоидного превращения. Это сплавы с содержанием углерода до 0,02 %, которые называют *техническим железом*.

Перекристаллизация всех доэвтектоидных сталей (сплавов железа с углеродом, содержащих углерод от 0,02 до 0,8 % С) начинается с полиморфного превращения аустенита в феррит. Температура превращения снижается, чем выше содержание углерода в стали. В чистом виде превращение $\gamma\text{-Fe}$ в $\alpha\text{-Fe}$ происходит при температуре 911°C, а сплаве с 0,8 % С оно снижается до 727°C.

Ввиду того, что феррит практически почти не растворяет в себе углерода, то концентрация углерода в аустените с понижением температуры будет увеличиваться. Это происходит до тех пор, пока оставшаяся порция аустенита не примет концентрацию, равную 0,8 %. И только в этом одном сплаве, содержащем 0,8 % С, превращение γ в α совершается при постоянной температуре.

Перекристаллизация всех заэвтектоидных сплавов (с % от 0,8 до 2,14 % С) начинается с выделения из аустенита вторичного цементита вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените при понижении температуры. Это выделение цементита так же, как и феррита в доэвтектоидных сталях, продолжается при понижении температуры до тех пор, пока концентрация углерода в аустените не достигнет 0,8 %.

Перекристаллизация в доэвтектоидных и в заэвтектоидных сплавах заканчивается одинаковой для всех этих сплавов второй стадией распада аустенита. Она заключается в эвтектоидном распаде последних порций аустенита, с концентрацией углерода в 0,8 % при постоянной температуре 727°C с образованием механической смеси двух фаз: феррита и цементита.

Ниже линии *PSK* происходит выделение цементита из феррита, из-за изменения растворимости углерода в феррите по линии *PQ*.

Сплав IV. Содержание углерода 0,01 %. При охлаждении сплава IV процесс распада аустенита с выделением первых кристаллов феррита начнется в точке 1 на линии *GS*. С дальнейшим понижением температуры происходит нарастающий процесс образования феррита, а количество остающегося аустенита соответственно уменьшается, причем он обогащается одновременно углеродом.

Следовательно, состав аустенита изменяется теперь все время по линии *GS*, скользя от точки 1 вправо – вниз. В точке 2 на линии *PG* полностью закончится процесс перехода аустенита в феррит с той же исходной концентрацией, т. е. с 0,01 % С. В интервале температур между точками 2 и 3 феррит находится в ненасыщенном состоянии. Начиная с точки 3 линии *PQ*, феррит оказывается предельно насыщенным углеродом, избыток которого вследствие уменьшения растворимости при понижении температуры начинает выделяться в виде третичного цементита. Выделение цементита продолжается при дальнейшем охлаждении. В итоге сплав IV после полного

охлаждения будет состоять из смеси феррита с цементитом, причем количество цементита будет крайне малым, в чем легко убедиться при помощи правила рычага. Конечная структура сплава: феррит и третичный цементит в виде прослоек по границам зерен, выделения которого ухудшают технологическую пластичность.

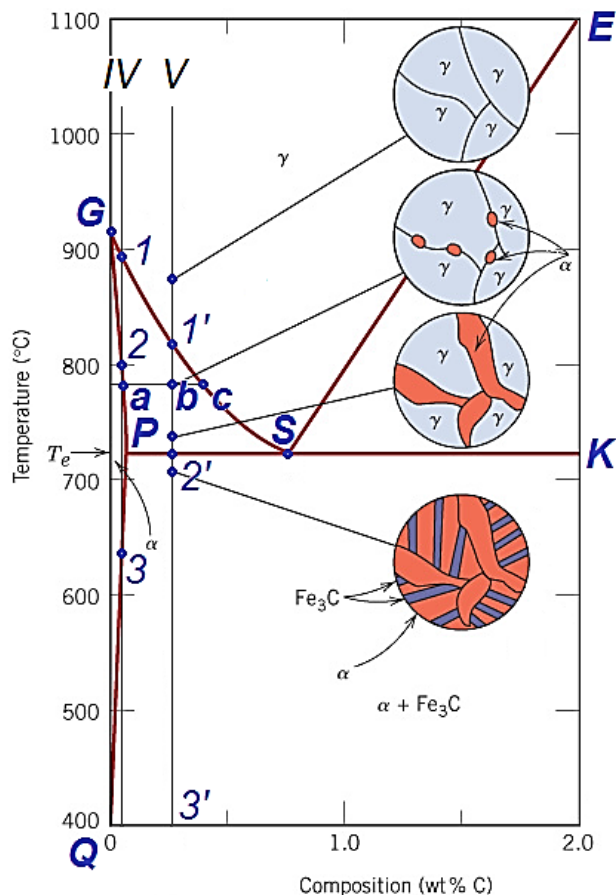


Рис. 4. Схема вторичной кристаллизации доэвтектоидных сплавов $Fe-C$.

Сплав V. Содержание углерода 0,35 %. Процесс перекристаллизации начнется при температуре точки I' на линии GS с выделением феррита из аустенита. При дальнейшем понижении температуры этот процесс перехода аустенита в феррит будет нарастать. При этом состав феррита будет изменяться по линии PG , а состав аустенита по линии GS , т. е. аустенит будет заметно обогащаться углеродом. Количество аустенита, естественно, все время будет уменьшаться, а количество феррита увеличиваться.

Применив правило фаз

$$C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1,$$

видим, что в системе может изменяться одна степень свободы (например, температура) и число фаз между линиями GS и PSK остается неизменным, т. е. равным двум.

Этот процесс перестройки аустенита в феррит будет продолжаться до тех пор, пока аустенит, изменяя свой состав по линии GS , не придет в точку S , т. е. достигнет концентрации 0,8 % углерода при температуре $727^\circ C$ (а

феррит 0,02 % С).

При постоянной температуре 727°C аустенит состава точки *S* оказывается предельно насыщенным как ферритом, так и цементитом, в результате чего он (аустенит) распадается на механическую смесь этих двух фаз: феррита и цементита (точка *A₁*).

При эвтектоидной реакции по правилу фаз число степеней свободы системы равно нулю:

$$C = K - \Phi + 1 = 2 - 3 + 1 = 0,$$

так как в равновесии находятся одновременно три фазы: аустенит состава точки *S*, феррит состава точки *P* и цементит состава точки *K*.

Превращение окончится тем, что весь аустенит полностью распадется и сплав, будет состоять из механической смеси двух фаз: феррита и цементита. По окончании превращения аустенита можно по правилу рычага подсчитать количество этих фаз.

Как только одна из фаз (аустенит) исчезает из системы, сплав, имея только одну степень свободы, получает возможность охлаждаться далее при наличии двух фаз.

Сплав с 0,35 % С в состоянии смеси феррита и цементита при дальнейшем охлаждении почти не будет испытывать никаких фазовых превращений, за исключением выделения цементита (третичного) из феррита за счет уменьшения растворимости углерода в феррите с понижением температуры по линии *PQ*.

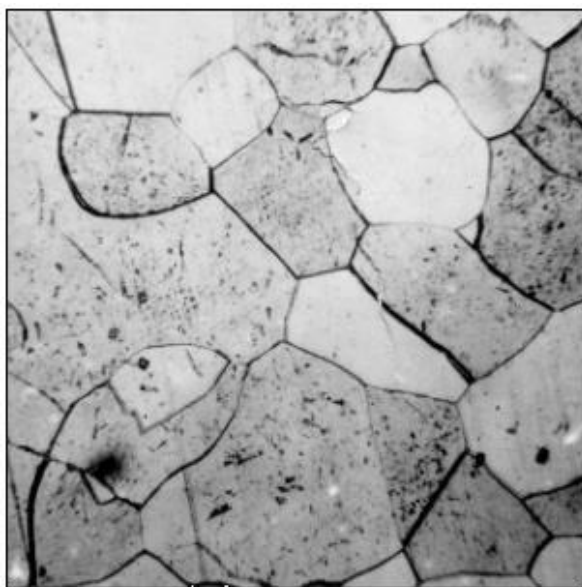
Количественное соотношение между структурными составляющими (феррита и перлита) в доэвтектоидных сталях определяется содержанием углерода. Чем ближе содержание углерода к эвтектоидной концентрации (0,8 %), тем больше в стали содержится углерода, тем больше в структуре перлита (и меньше феррита) и, следовательно, выше прочностные свойства стали (рис.5).

Сплав VI. Содержание углерода 0,8 % (рис.6). Сплав, совпадая по концентрации углерода с точкой *S* (0,8 % С), относится к эвтектоидной стали. Процесс распада аустенита в сплаве VI начнется и закончится при постоянной температуре 727°C на линии *ES*.

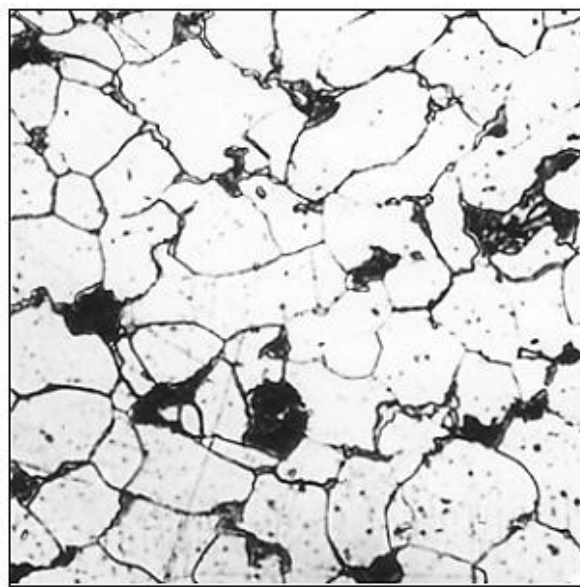
Сплав VII. Содержание углерода 1,10 % (рис.6). Этот сплав, находясь по концентрации углерода правее точки *S* (0,8 % С), относится к группе заэвтектоидных сталей.

Процесс распада аустенита в сплаве VI начнется при температуре точки *I* на линии *ES* (точка *A_{cm}*). При данной температуре аустенит с 1,10 % углерода оказывается предельно насыщенным углеродом и при дальнейшем понижении температуры будет выделять из себя вторичный цементит. Следовательно, содержание углерода в аустените, начиная с точки *I*, при дальнейшем охлаждении будет уменьшаться, изменяясь по линии *ES*.

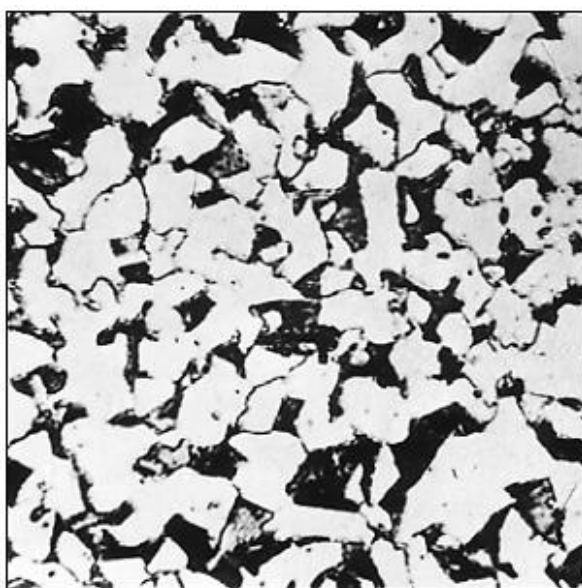
Выделение цементита происходит до момента прихода сплава в точку 2, т. е. до температуры 727°C.



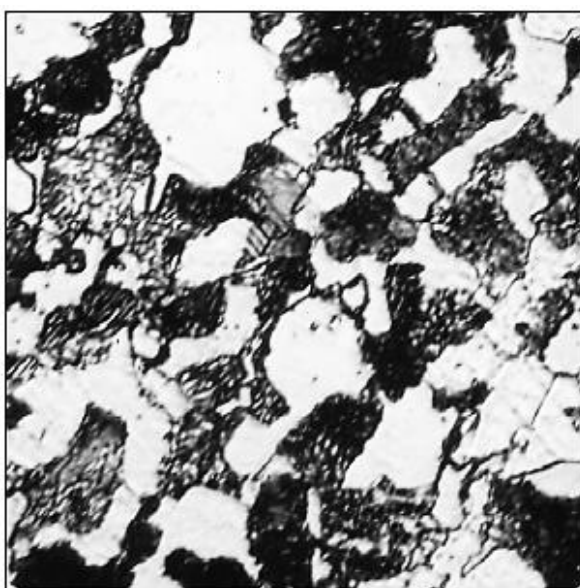
а



б



в



г

Рис.5. Структура сплавов $Fe-C$ доэвтектоидного состава. а.- техническое железо от 0,006% до 0,02% С, феррит + цементит_{III} ($\times 300$) – светлые зерна феррита с выделением по границам прослоек третичного цементита, б.- г.- доэвтектоидные стали, с содержанием углерода более 0.02%. Феррит + перлит (феррит – белого цвета, перлит – темного цвета), доля перлита возрастает с увеличением содержания углерода.

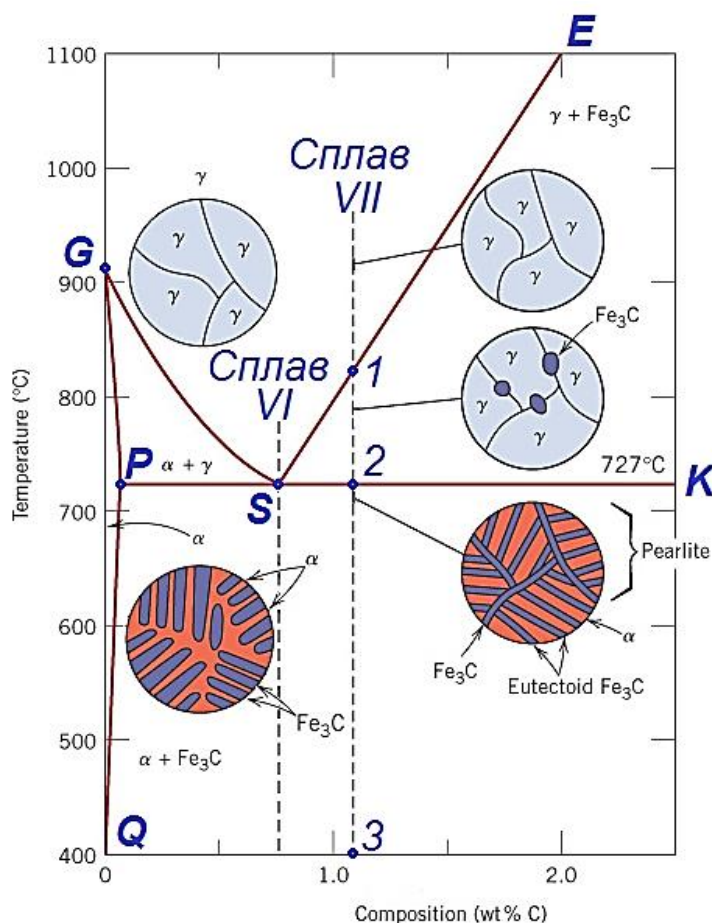


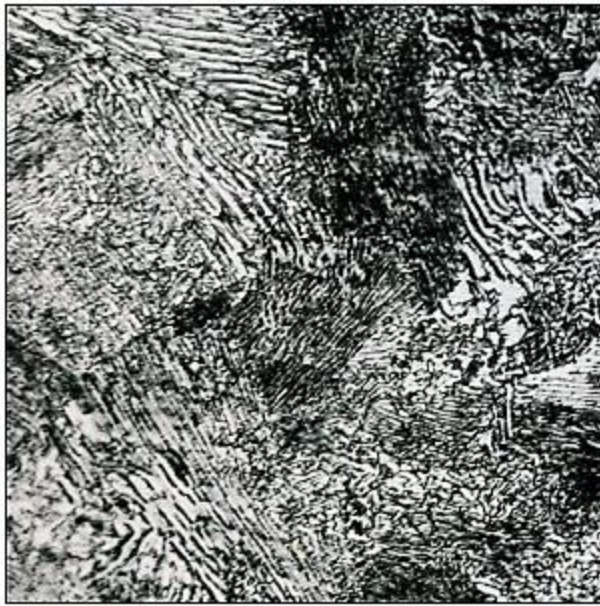
Рис. 6. Схема вторичной кристаллизации эвтектоидной и заэвтектоидных сталей.

При достижении точки 2 сплав состоит из двух фаз (точнее сказать, при подходе к точке 2): аустенита – состава точки *S* и цементита в следующих количественных соотношениях:

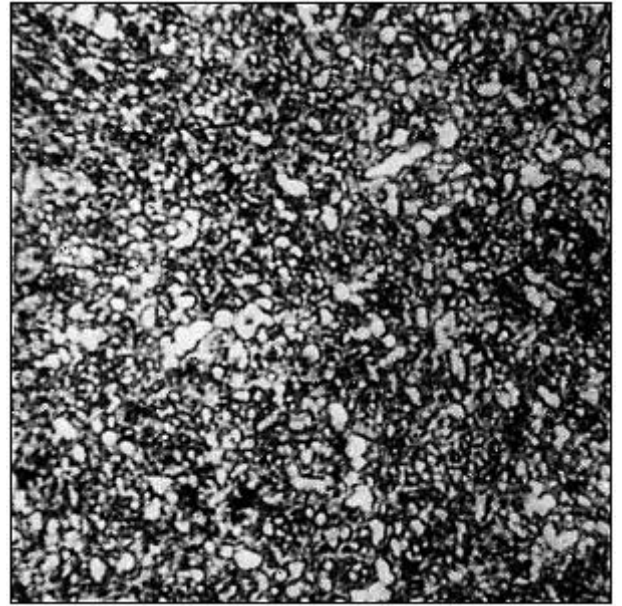
$$Q_{\text{ц}} = S2/SK \cdot 100 \% ; \quad Q_{\text{А}} = K2/SK \cdot 100 \% ;$$

При температуре 727°C происходит эвтектоидный распад аустенита (A_1) на механическую смесь, состоящую из феррита и цементита, и в итоге этого превращения сплав будет состоять как обычно, из этих двух фаз.

Выделение некоторого количества цементита из феррита по линии *PQ* при дальнейшем охлаждении сплава от точки 2 до точки 3, как и в доэвтектоидных сталях, не внесет существенных изменений в состав сплава после его полного охлаждения. Конечная структура заэвтектоидной стали приведена на рис. 7 – наряду с перлитом присутствует белая сетка вторичного цементита. В чисто перлитной стали, а также и в заэвтектоидных сталях с помощью специальной термообработки, можно получить особую структуру так называемого зернистого цементита. Инструментальная сталь перед ее механической обработкой и окончательной термообработки обычно имеет структуру зернистого цементита.



а.



б.



в.

Рис. 7. Структура эвтектоидной и заэвтектоидных сталей ($\times 300$). а.- 0,8% С, перлит пластинчатый; б.- 0,8% С, перлит зернистый; в.- 1,1% С, перлит + цементит_ц (светлая сетка цементита междузернами перлита)

5. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ОХЛАЖДЕНИЯ

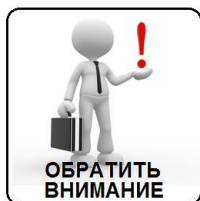
При построении кривых охлаждения необходимо пользоваться правилом фаз:

$$c = k - f + 1,$$

где c – вариантность системы (число степеней свободы), k – число компонентов, f – число фаз.

Количество компонент в данной системе всегда равно 2 – это железо и углерод. Количество фаз находят используя диаграмму (см.рис.1)

Не следует путать фазы со структурными составляющими, так как последние могут быть однофазными и многофазными, а одна и та же фаза может входить в разные составляющие. Например, в доэвтектических чугунах при комнатной температуре цементит вторичный, цементит перлита и цементит ледебурита является одной и той же фазой. Структура этого чугуна – перлит + ледебурит + цементит, а фазовый состав – феррит + цементит.



Зная количество фаз и количество компонент, можно определить число степеней свободы. На линиях эвтектического, эвтектоидного и перитектического превращений система $Fe - Fe_3C$ находится в трехфазном состоянии, которое согласно правилу фаз является для двухкомпонентных систем невариантной: $C=2-3+1=0$. Все превращения при $C = 0$ происходят при постоянных температурах, и на кривой охлаждения они характеризуются **горизонтальным участком**

В двухфазных областях диаграммы системы являются моновариантными: $C = 2-2+1=1$, превращения в сплавах в этих областях происходят в интервале температур. Выделение скрытой теплоты кристаллизации замедляет темп снижения температуры, поэтому участки кривых охлаждения в таких случаях будут **пологими (с меньшим наклоном)**. Начало и конец превращений, когда изменяется вариантность системы, фиксируют на кривых охлаждения перегибами

В однофазных областях системы биварианты: $C=2-1+1=2$. При этом с изменением температуры никаких превращений не происходит, и на кривых охлаждения будут **крутые участки (с большим наклоном)**.



Кривые охлаждения необходимо строить, начиная с жидкого состояния. На каждом участке кривой должны быть обозначены число степеней свободы ($C = \dots$) и структуру. На горизонтальных участках обозначают превращения, например, $A \rightarrow F + C$.

На рис. 8 приведен пример построения кривой охлаждения заэвтектоидной стали содержащей 1,5%С. Выше линии ликвидус сплав находится в жидком однофазном состоянии. В соответствии с правилом фаз ($C=2-1+1=2$, фаза - жидкий раствор) система в этой области бивариантна, фазовых превращений не происходит, и температура до точки 1 снижается достаточно интенсивно (крутой участок кривой охлаждения).

Процесс первичной кристаллизации в данном случае идет при понижении температуры, что согласуется с правилом фаз ($C=2-2+1=1$; фазы - жидкий раствор и аустенит). Таким образом, система в этой области моновариантна, в процессе превращения выделяется скрытая теплота кристаллизации, замедляющая снижение температуры, поэтому участок кривой охлаждения будет пологим. Первичная кристаллизация сплава заканчивается в точке 2.

В интервале между точками 2 и 3 сплав охлаждается, не претерпевая никаких превращений. Система при этом бивариантна ($C=2-1+1=2$; фаза - аустенит), участок кривой охлаждения будет крутым.

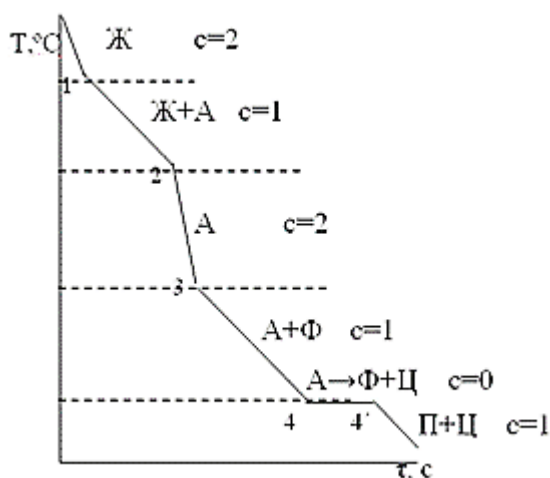


Рис. 8. Кривая охлаждения для стали, содержащей 1,5%С

При температуре, соответствующей точке 3, достигается предел насыщения аустенита углеродом. Ниже этой точки аустенит становится перенасыщенным. Избыточный углерод из зерен аустенита диффундирует к их границам и здесь выделяется в виде вторичного цементита. Процесс кристаллизации вторичного цементита, в соответствии с правилом фаз, протекает с понижением температуры сплава ($C=2-2+1=1$; фазы - аустенит и цементит). Таким образом, система моновариантна, выделяющаяся скрытая теплота кристаллизации замедляет снижение температуры, и участок кривой охлаждения будет пологим.

Концентрация углерода в аустените при этом изменяется согласно линии ES от точки 3 к точке S и достигает эвтектоидной (0,8%С) при температуре 727°C (точка 4). При этой температуре и концентрации аустенит превращается в перлит (эвтектоидное превращение): $A_s = F_p + C_k$

Согласно правилу фаз при эвтектоидном превращении система невариантна ($C=2-3+1=0$; фазы - аустенит, цементит, феррит), процесс идет при постоянной температуре, и на кривой охлаждения будет горизонтальный участок.

Ниже температуры 727°C в рассматриваемом сплаве практически не происходит превращений. По теоретическим данным, из феррита здесь выделяется третичный цементит, вследствие чего система будет моновариантной ($C=2-2+1=1$; фазы – феррит и цементит). Но феррит здесь содержится только в составе перлита, третичный цементит выделяется в незначительном количестве и металлографически не обнаруживается, так как сливается с цементитом перлита. Таким образом, в структуре стали данного состава при комнатной температуре наблюдаются зерна перлита, окаймленные тонкой сеткой вторичного цементита.

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Оборудование и материалы. Коллекция образцов углеродистых сталей с различным содержанием углерода. Полировальное оборудование. Набор реактивов для травления. Металлографический микроскоп. Диаграмма состояния сплавов системы $Fe - C$.

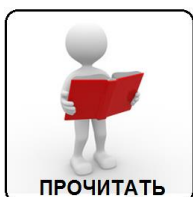
Порядок выполнения работы.



Пройти инструктаж по технике безопасности перед выполнением лабораторной работы.



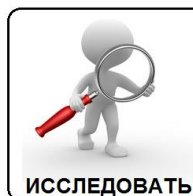
Получить коллекцию образцов углеродистых сталей с различным содержанием углерода и индивидуальное задание.



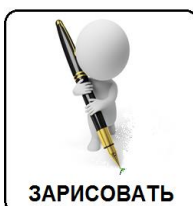
Прочитать материал разделов 1 -4.



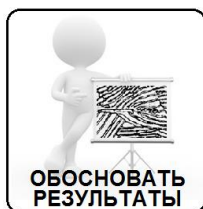
Подготовить образцы к металлографическому исследованию. Ознакомиться с инструкцией по работе на микроскопе. Подготовить микроскоп к работе.



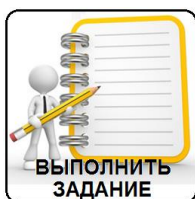
Провести металлографический анализ углеродистых сталей с различным содержанием углерода: доэвтектического, эвтектического и заэвтектического составов.



Схематично зарисовать структуру сталей с различным содержанием углерода. Подписать структурные составляющие сплава. Описать структуру. Рисунки и описание внести в отчет.



Сравнить эволюцию структуры при увеличении содержания углерода в стали. Чем отличается структура технического железа и сталей доэвтектического и заэвтектического составов? Обсуждение результатов внести в отчет.



Выполнить индивидуальное задание 1.

На диаграмме состояния обозначить линии ликвидус и солидус.

Для каждой области диаграммы записать фазовый состав.

Построить кривые охлаждения для чистых компонентов сплава.

Построить кривую охлаждения для сплава заданного состава.

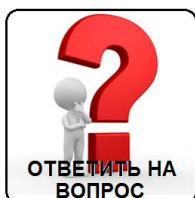
Описать кристаллизацию сплава заданного состава

Записать температуры начала и окончания затвердевания.

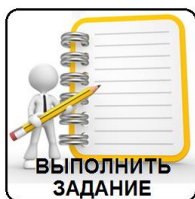
Состав первых кристаллов и последних порций жидкости.

В твердо-жидком состоянии при произвольной температуре указать составы и рассчитать количество каждой фазы.

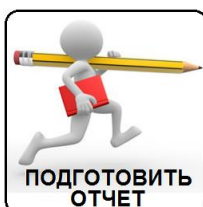
Зарисовать структуру сплава после охлаждения (подписать структурные составляющие, указать их состав)



Испытывает ли сплав фазовые и структурные превращения в твердом состоянии (если испытывает, то описать какие)?



Выполнить индивидуальное задание 2 (2.1 – 2.3)



Сделать общие выводы по лабораторной работе. Оформить отчет, состоящий из общей части и индивидуальных заданий участников.

7.ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Индивидуальное задание 1.

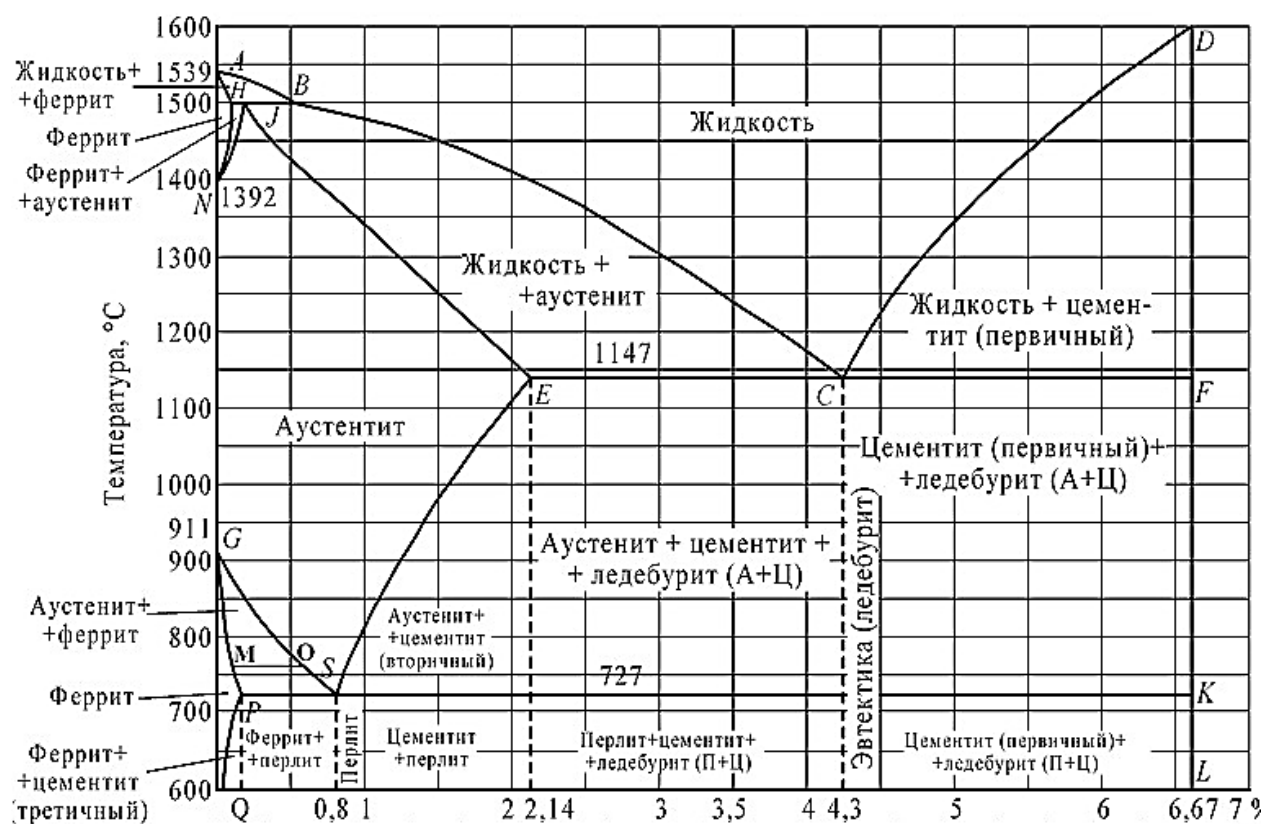


Рис.9

Таблица 1

№ варианта	Состав сплава	№ варианта	Состав сплава
1.	$Fe + 0.06\%C$	6.	$Fe + 0.5\%C$
2.	$Fe + 0.1\%C$	7.	$Fe + 0.65\%C$
3.	$Fe + 0.16\%C$	8.	$Fe + 0.8\%C$
4.	$Fe + 0.2\%C$	9.	$Fe + 1\%C$
5.	$Fe + 0.35\%C$		$Fe + 1.5\%C$

Индивидуальное задание 2.

Таблица 2

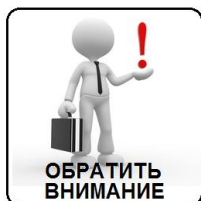
№ варианта													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ЗАДАНИЕ 2.1 Содержание углерода, %													
0,05	0,1	0,16	0,4	0,5	0,8	1,2	1,4	1,8	2,0	2,8	3,5	4,3	4,8
ЗАДАНИЕ 2.2 Температура t_l , °C													
550	800	1500	500	750	500	800	800	900	1300	1000	900	1100	1200
ЗАДАНИЕ 2.3 Количество структурных составляющих, %													
Ф=20, П=10	Ф=40, П=80	Ф=95, Ц=5	П=100	Ф=50, П=50	П=85, Ц=15	П=80, Ц=10, Л=10	П=60, С=5, Л=35	Л=100	Л=80, Ц=20	П=20, Л=75, Ц=5	Ф=70, П=30	П=60, Ц=40	П=5, Ф=95

2.1. Опишите превращения и постройте кривую охлаждения (с применением правила фаз) для сплава с заданным содержанием углерода.

2.2. Определите с помощью правила отрезков состав фаз (по углероду и железу) и их количество (%) для заданного сплава при температуре t_l .

2.3. Определить содержание углерода в сплаве по заданному количеству структурных составляющих

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



Всякая диаграмма состояния, в том числе и железо-углерод показывает условия равновесного сосуществования фаз во взятой системе компонентов.

Полное физико-химическое равновесие между фазами может быть достигнуто только в специальных лабораторных условиях, а на практике некоторым приближением к этому состоянию может быть случай чрезвычайно медленного охлаждения или нагрева сплава с весьма длительными выдержками во времени при любых искомым температурах. Поэтому фазовый состав и структура сталей полученных в условиях реальной термической обработки деталей может существенно отличаться от условий диаграммы состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. П. Гуляев. Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. - 7-е изд., перераб. и доп. - Москва : Альянс, 2011. - 644 с
2. Металловедение : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению "Металлургия" : [в 2-х т.]. - Москва : МИСиС Т. 1 : Основы металловедения / И. И. Новиков, В. С. Золоторевский, В. К. Портной [и др.] ; под общ. ред. В. С. Золоторевского. - 2009. - 496 с.
3. Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев, А.Б. Кутьин. Материаловедение: учебное пособие / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев, А.Б. Кутьин – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. - 339 с.
4. Callister William D. Materials science and engineering : an introduction / William D. Callister, Jr. – 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 975 p.
5. Phase Diagrams: Understanding the Basics (Peritectic Alloy Systems Chapter 6 / editor F.C. Campbell / ASM International, Materials Park, Ohio 44073-0002 – 2012. 464 p.
6. Шевченко О.И. Исследование сплавов с ограниченной растворимостью компонентов при наличии перитектического превращения. Методические указания к выполнению лабораторных и практических работ по курсу «Материаловедение» [Электронный ресурс]: / составитель Шевченко О.И. М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетаг. технолог. ин-т (фил). – Нижний Тагил : НТИ (ф) УрФУ, 2017. – 16 с.
7. Шевченко О.И. Исследование сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Методические указания к выполнению лабораторных и практических работ по курсу «Материаловедение» [Электронный ресурс]: / составитель Шевченко О.И. М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетаг. технолог. ин-т (фил). – Нижний Тагил : НТИ (ф) УрФУ, 2017. – 18 с.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
"Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина"
Нижнетагильский технологический институт (филиал)
Кафедра металлургической технологии

Оценка работы _____
«____» _____ 20__

ОТЧЕТ

По лабораторной/практической работе
Дисциплина «Материаловедение»

Тема _____

Преподаватель _____ И.О.Фамилия
проф., докт. техн.
наук

Студенты _____ И.О.Фамилия
_____ И.О.Фамилия
_____ И.О.Фамилия

Направление «Металлургия»
Группа ТВ-000000-НТ

Нижний Тагил, 20__