

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: изучить диаграмму железо–цементит, ее структуры и фазы; рассмотреть превращения в сплавах с различным содержанием углерода при нагреве и охлаждении; применить правило фаз Гиббса и правила отрезков; уяснить теоретическое и практическое значение диаграммы для материаловедения.

Материальное обеспечение: диаграмма железо–цементит, плакаты, методические указания, литература.

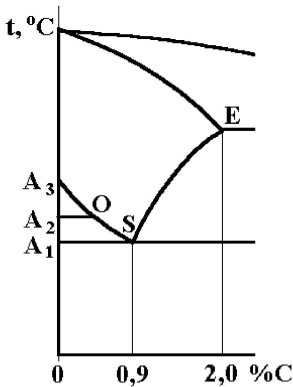


Рис. 1. Важнейшие линии диаграммы Fe-C по Д.К. Чернову.

Диаграмма состояния железо–углерод дает представление об областях существования сталей и чугунов, их строении и превращениях в зависимости от температуры и содержания углерода. Начало изучению этой диаграммы было положено русским ученым Д.К. Черновым в 1868 году работой "Критический обзор статей Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные исследования Д. К. Чернова по этому же предмету". В этой работе Д. К. Чернов впервые в мире указал на существование в стали критических точек и их зависимость от содержания уг-

лерода, дал первые представления о диаграмме железо–углерод. Позже Д. К. Чернов графически изобразил часть этой диаграммы (рис.1).

Ф. Осмонд определил положение критических точек при помощи пирометра, изобретенного А. Ле-Шателье, и описал превращения, происходящие в стали при переходе через критические точки. Превращения в стали при нагреве были изучены металлографическим методом Р. Аустенном, А. Ле-Шателье, А. А. Байковым, Н. Т. Гудцовым и другими учеными.

К концу позапрошлого столетия диаграмма железо–углерод была построена П. Геренсом. После этого уточнялись только положения критических точек и содержание углерода в различных структурах.

1. ЖЕЛЕЗО И ЕГО СВОЙСТВА

Русское название элемента №26 связано, по-видимому, с санскритским корнем "жель", означающим "блестеть", "пылать".

В земной коре содержится 5,1% железа. Поскольку этот элемент довольно легко вступает в реакции, мы почти никогда не встречаем его в чистом виде; окислы и сульфиды железа – основа его минералов. Те "железные" предметы, которые окружают нас, изготовлены из стали и чугуна – сплавов железа с углеродом.

Распространенность и относительная простота извлечения из руд сделали железо доступным уже в древности: железный век пришел на смену бронзовому во II тысячелетии до нашей эры.

В те времена и еще много веков спустя железо получали так называемым сыродутным методом. Сыродутные печи устраивали прямо на земле, обычно на склонах оврагов и канав. Они имели вид трубы, которую наполняли древесным углем и железной рудой. Уголь зажигали, и ветер поддерживал горение угля. Железная руда восстанавливалась, и получалась мягкая крица – железо с включениями шлака. Такое железо называлось сварочным, в нем содержалось немного углерода и примесей, перешедших из руды. Крицу ковали, куски шлака отваливались, и под молотом оставалось железо, пронизанное шлаковыми нитями. Из него отковывали различные изделия.

Век сварочного железа был долгим, однако, людям древности и раннего средневековья было знакомо и другое железо: булатные сабли, толедские клинки, миланские доспехи, а может быть, и меч Роланда, разрубавший, по преданию, не только латы, но и мечи противников. Дамасскую сталь делали на Востоке еще во времена Аристотеля в IV веке до н.э. Но технология ее производства, как и процесс изготовления булатных клинков, держались в секрете.

С появлением мехов для раздувания огня в сыродутных горнах появились печи нового типа – так называемые "волчьи ямы", которые выкапывались в земле, и домницы, которые возвышались над землей. К XIV–XV векам появились первые доменные печи высотой до 3 м и более.

Подлинный поворот от домницы к домне произошел лишь в 80-х годах XVIII века, когда одному из демидовских приказчиков пришла в голову мысль подавать дутье в доменную печь не через одно сопло, а через два, расположив их по обеим сторонам горна. Число сопел или фурм росло, дутье становилось все более равномерным, увеличивался диаметр горна, повышалась производительность печей.

Дальнейшее совершенствование получения чугуна в доменных печах связано с заменой древесного угля на кокс, с подачей горячего дутья и заменой части кокса природным газом.

Процесс производства стали сводится в сущности к выжиганию из чугуна углерода и вредных примесей, к окислению их кислородом воздуха. Сталь в настоящее время получают в конвертерах, мартеновских печах, электропечах и другими методами. И у стали и у чугуна основным компонентом является железо.

Железо, как и любой другой металл, не бывает абсолютно чистым. В нем всегда есть примеси. Для научных целей в настоящее время применяют железо высокой чистоты, содержащее 0,01% примесей и меньше. Техническое железо имеет в своем составе до 0,02% углерода и около 0,1% примесей других элементов. Данные, приводимые ниже, будут относиться к техническому железу.

Железо – химический элемент VIII группы системы Д.И. Менделеева, порядковый номер 26, атомная масса 55,85. Это серебристо-белый вязкий металл.

Железо имеет четыре аллотропические модификации – α , β , δ и γ (рис.2). Температура кристаллизации (плавления) железа равна $1535 \pm 5^{\circ}\text{C}$. При температуре 1539°C охлаждаемое железо из жидкого состояния переходит в твердое. Это превращение происходит потому, что система стремится, чтобы ее свободная энергия была по возможности меньше, т.е. процесс кристаллизации подчиняется закону

$$F = E - TS,$$

где F – свободная энергия системы;

- E – внутренняя энергия системы;
- T – абсолютная температура;
- S – энтропия.

Графическая зависимость свободной энергии от температуры показана на рис.3. При $T > T_0$ железо в жидком состоянии имеет меньшую свободную энергию, чем в твердом, при $T < T_0$ – наоборот. При $T = T_0$ свободная энергия жидкого и твердого состояний равны. При температуре T_0 железо кристаллизуется (плавится). Следовательно, T_0 и есть критическая температура кристаллизации (плавления). Для того чтобы происходили кристаллизация или плавление, необходимы переохлаждение или перегрев.

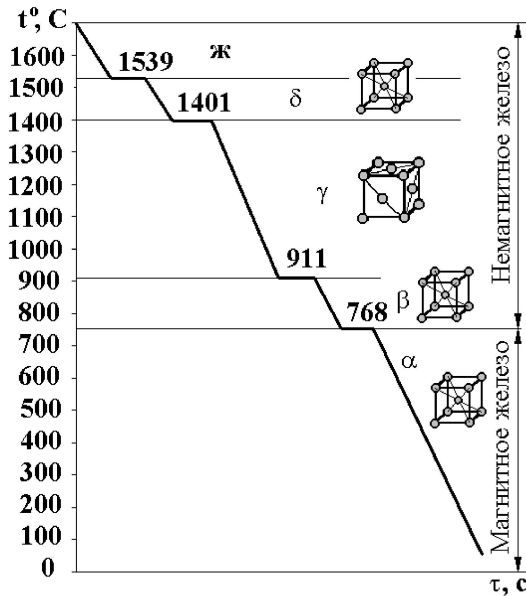


Рис. 2. Кривая охлаждения железа.

При температуре 1539°C жидкое железо при охлаждении превращается в кристаллическое δ -железо. Его кристаллическая решетка – объемноцентрированный куб (ОЦК), параметр решетки $a = 0,293\text{нм}$. В δ -железе растворяется до $0,1\%$ углерода.

При температуре 1401°C δ -железо превращается в γ -железо. Кристаллическая решетка γ -железа – гранецентрированный куб (ГЦК),

$a = 0,366\text{нм}$, γ -железо растворяет до 2,14% углерода, оно устойчиво до 911°С .

При температуре 911°С γ -железо превращается в β -железо. Как и δ -железо, оно имеет ОЦК - решетку, $a=0,290\text{ нм}$.

При 768°С β -железо превращается в α -железо, также имеющее ОЦК - решетку, $a=0,288\text{ нм}$. Растворимость углерода в α -железе составляет 0,02% при 727°С и около 0,006% – при комнатной температуре.

Кристаллические решетки δ -, β -, и α -железа одинаковы (ОЦК) и отличаются только величиной параметра a . Все эти модификации иногда называют α -железом. В дальнейшем можно считать, что железо имеет две аллотропические модификации – α и γ .

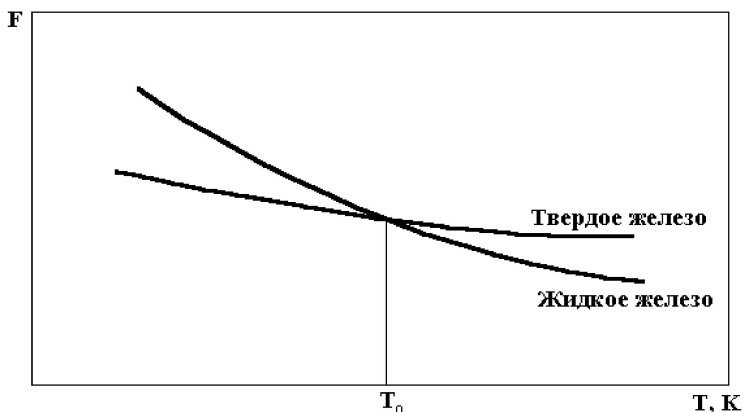


Рис. 3. Зависимость свободной энергии системы от температуры.

Низкотемпературное α -железо (до температуры 768°С) магнитно, а β -, δ -железо (высокотемпературное α -железо) и γ -железо – немагнитны.

Техническое железо имеет следующие механические свойства: твердость по Бринеллю $\text{НВ} = 600 \dots 800\text{ МПа}$, предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{в}} = 200 \dots 250\text{ МПа}$, предел текучести $\sigma_{\text{т}} = 140 \dots 160\text{ МПа}$, относительное удлинение $\delta = 40 \dots 50\%$, относительное сужение $\psi = 70 \dots 80\%$, ударная вязкость $\text{КСУ} = 2 \dots 3\text{ МДж/м}^2$.

2. УГЛЕРОД И ЕГО СВОЙСТВА

Углерод встречается в природе как в свободном состоянии, так и в соединениях. В свободном состоянии элементарный углерод известен как графит или алмаз.

В виде органических углеродистых и углеводородистых соединений углерод входит в состав растений, хлопчатобумажных тканей, тел живых организмов и животных, белков, крахмала, воздуха, воды, почвы, природного газа, нефти, масел, скипидара, воска, смол, полимеров, каменного угля, сланцев и т.д.

В виде неорганических соединений углерод образует окислы, карбиды, карбонаты, сероуглерод, цианистые соединения и др. Наибольшая часть углерода земной коры содержится всего в двух неорганических соединениях: известняке CaCO_3 и доломите $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$.

Углерод является одиннадцатым по распространенности на земле элементом. Не случайно, в связи с многообразием различных углеродосодержащих соединений авторы популярных книг об элементе №6 называют его "неисчерпаемый".

Углерод – один из немногочисленных элементов "без рода, без племени". История общения человека с этим элементом уходит в доисторические времена. Имя первооткрывателя углерода неизвестно, неизвестно и то, какая форма элементарного углерода – графита или алмаза – была открыта раньше. И то и другое случилось слишком давно. Определенно утверждать можно лишь одно: до графита и до алмаза было открыто вещество, которое еще несколько десятилетий назад считали третьей, аморфной формой элементарного углерода – каменный и древесный уголь.

В действительности каменный и древесный уголь не являются чистым углеродом. В углях есть и водород, и кислород, и следы других элементов. Их можно удалить, но и тогда углерод угля не станет самостоятельной модификацией элементарного углерода. Это было установлено лишь во второй четверти двадцатого века. Структурный анализ показал, что "аморфный" углерод каменного и древесного угля – это по существу тот же графит. А значит, никакой он не аморфный, а кристаллический, только кристаллы его очень мелкие, в них больше дефектов и примесей.

После этого стали считать, что углерод на земле 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. Это используют при получении синтетических алмазов.

В ноябре 1954 года американская фирма "Дженерал электрик" сообщила, что сотрудники этой фирмы Банди, Холл и другие получили искусственные алмазы в виде мелких черных кристаллов. Процесс велся под давлением порядка 100000 атмосфер и при 2000⁰ С, катализатором был тантал, а если говорить точнее, то алмаз из графита получали на тонкой пленке карбида тантала, образовавшейся в процессе синтеза. С этого времени начинаются интенсивные работы по промышленному синтезу алмазов в разных странах.

В октябре 1961 года в СССР по отечественной технологической схеме было получено 2000 карат синтетических алмазов. Промышленный синтез алмазов – большое достижение науки и техники. Ученые шли к нему многие десятилетия.

Немаловажной вехой в осознании возможности образования алмазов вне земной коры послужило обнаружение алмазных крупинок в метеорите, упавшем 10 сентября (по старому стилю) 1886 года возле деревни Новый Урей Краснослободского уезда Пензенской губернии. Три осколка этого метеорита массой 1762,3; 105,45 и 21,95 грамма хранятся в Горном музее Санкт-Петербурга.

В начале девяностых годов XIX столетия профессор Петербургской военно-медицинской академии К.Д. Хрущов предпринял попытку повторить "эксперимент" природы, приводящий к появлению в метеоритах алмазных крупинок. Вот выдержка из доклада К.Д. Хрущова, сделанного им 4 марта 1893 года на заседании Санкт-Петербургского императорского минералогического общества: "На основании находок в метеорите можно было прийти к мысли, что под сильным давлением углерод может выделяться из раствора в металле в виде алмаза. Мы проделали такой опыт. Насытив кипящее серебро углеродом, которого растворилось шесть процентов, я быстро охладил массу. Давление в ее середине не могло не повыситься под действием корки, сразу же затвердевшей снаружи. Последовавшее затем растворение получившегося слитка показало, что часть выделившегося углерода имеет свойства алмаза. Порошок его состоит из прозрачных бесцветных кристаллических осколков и пластинок, сильно преломляющих свет, совершенно изотропных, царапающих корунд и сгорающих в углекислоту с незначительным остатком золы".

В том же 1893 году другой ученый, парижский профессор-химик Анри Муассан проделал такой же опыт, как и Хрущов (Муассан закончил свою работу несколько раньше, именно ему принадлежит первая публикация).

Располагая лучшим из возможных по тому времени источником нагрева – изобретенной им электрической дуговой печью, – Муассан решил растворить углерод (сахарный уголь) в кипящем железе. Кипящее железо с растворенным в нем углеродом быстро охладили в воде. Когда бесформенный слиток был растворен в кислотах, из него выделили несколько крупинок. Они тонули в жидкости с плотностью $\rho=3\text{г/см}^3$, царапали рубин и корунд, почти целиком сгорали в кислороде. Таковы два происшествия из истории искусственных алмазов.

Углерод содержится во многих природных соединениях и существенно влияет на свойства материалов. В сталях и чугунах он образует карбиды, имеющие очень высокую химическую стойкость и исключительную твердость. Таких элементов-карбидообразователей тринадцать: железо, марганец, молибден, титан, тантал, вольфрам, ванадий, хром, ниобий, технеций, гафний, рений, цирконий. Карбид железа (цементит) является компонентом диаграммы состояния сплавов железо–цементит. Цементит имеет очень высокое значение твердости $HV>8000\text{МПа}$ (напильник из стали У12 имеет твердость $HV\approx 6500\text{МПа}$), содержит 6,69% С, имеет $t_{\text{пл}}\approx 1550^\circ\text{C}$, точку Кюри $t_{\text{к}}=210^\circ\text{C}$.

Если углерод в железоуглеродистых сплавах находится в виде графита, то, учитывая, что графит имеет незначительную твердость, низкий коэффициент трения скольжения, хорошую электропроводность, теплостойкость и целый ряд других специфических свойств, он передает эти свойства материалам, которые его содержат. Поэтому графит входит в состав графитизированных сталей, серых чугунов, порошковых антифрикционных материалов.

3. СТРУКТУРНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Феррит (Ф) – это твердый раствор внедрения углерода в железе. Углерода в феррите мало (до 0,02%), поэтому феррит можно считать технически чистым железом. Кристаллическая решетка феррита –

ОЦК. Механические свойства феррита те же, что и технического железа.

Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода (до 2,14%) в железе. Аустенит, как и железо, имеет гранцентрированную кубическую кристаллическую решетку (ГЦК). Под микроскопом он имеет вид светлых зерен с характерными двойниками. Получить аустенит в углеродистых сталях при комнатной температуре нельзя. Возможно получение аустенита при комнатной температуре только в специальных высоколегированных соединениях.

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом Fe_3C , или карбид железа. Цементит – самая твердая ($HB > 8000$ МПа), прочная ($\sigma_b \approx 20000$ МПа) и очень хрупкая структура ($\delta \approx 0$ %, $KCU \approx 0$ МДж/м²). Кристаллическая решетка цементита сложная, она состоит из ряда октаэдров, оси которых расположены под некоторыми углами друг к другу. Внутри октаэдров располагается углерод. Температура плавления цементита около $1550^{\circ}C$. До $210^{\circ}C$ цементит магнитен, выше – немагнитен.

Перлит (П) – эвтектоидная (механическая) смесь феррита и цементита. Он образуется из аустенита при температуре $727^{\circ}C$ и содержании углерода 0,8%. Перлит может иметь пластинчатую или зернистую форму цементита. В зависимости от строения перлита изменяются и его свойства: пластинчатый перлит тверже, прочнее, но хрупче зернистого. Перлит имеет $HB = 1600 \dots 2300$ МПа, $\sigma_b = 6000 \dots 800$ МПа, $\delta = 15 \dots 20$ %.

Ледебурит (Л) – эвтектическая (механическая) смесь аустенита и цементита при температурах выше $727^{\circ}C$ и перлита и цементита (феррита и цементита) при температурах ниже $727^{\circ}C$. Образуется ледебурит при температуре $1147^{\circ}C$ и содержании углерода 4,3%. Ледебурит имеет следующие механические свойства: $HB \approx 700$ МПа, $\sigma_b \approx 1000$ МПа, $\delta \approx 1 \dots 2$ %, $KCU \approx 0$ МДж/м².

Графит (Г) – одна из разновидностей углерода, имеет гексагональную кристаллическую решетку, электропроводен, химически стоек, теплостоек. Твердость, прочность и пластичность графита очень малы и близки к нулю, температура плавления около $3500^{\circ}C$. Эта структурная составляющая имеется в серых, ковких и высокопрочных чугунах соответственно в пластинчатой, хлопьевидной и шаровидной формах.

4. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗО–ЦЕМЕНТИТ

Диаграмма состояния сплавов железо–цементит в интервале концентрации углерода от железа ($C=0\%$) до цементита ($C=6,69\%$) представлена на рис. 4, а. По оси абсцисс на этой диаграмме показана концентрация углерода в массовых процентах, а по оси ординат – температура в градусах Цельсия. Для перевода концентрации углерода в концентрации цементита нужно содержание углерода умножить на 15.

Для построения диаграммы железо–цементит необходимо знать критические температуры. Их определяют различными методами: термическим, электрическим, магнитным и другими, так как при помощи одного какого-либо метода нельзя, а иногда и невозможно точно определить критические точки.

Линия ABCD диаграммы является линией **ликвидус**, выше которой находится только жидкий сплав, а линия ANJECF – линией **солиду**, ниже которой находится только твердый сплав.

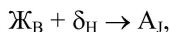
Сплавы железа с углеродом, содержащие до 0,02% C, называют **техническим железом**; содержащие 0,02...2,14% C – **сталими**; 2,14...6,69% C – **чугунами**.

Эвтектоидная сталь содержит 0,8% C, **доэвтектоидные стали** – 0,02...0,8% C, **заэвтектоидные** – 0,8...2,14% C. **Эвтектический чугун** содержит 4,3% C, **доэвтектические чугуны** – 2,14...4,3% C, **заэвтектические** – 4,3...6,69% C.

В железоуглеродистых сплавах имеются четыре фазы: жидкий сплав (*Ж*), феррит (*Ф*), аустенит (*А*) и цементит (*Ц*). Одновременно в любой точке диаграммы могут существовать не больше трех фаз.

На диаграмме имеются три горизонтальные линии (HJB, ECF, PSK), указывающие на протекание нольвариантных реакций.

На линии HJB при температуре 1499⁰C происходит **перитектическая** реакция:



т.е. жидкий сплав концентрации точки В реагирует с железом концентрации точки Н и дает новую фазу – аустенит концентрации точки J. Кроме того, в зависимости от содержания в сплавах углерода могут быть избыточные фазы: δ -железо или жидкость. Эта реакция протекает в сплавах, содержащих до 0,5% углерода.

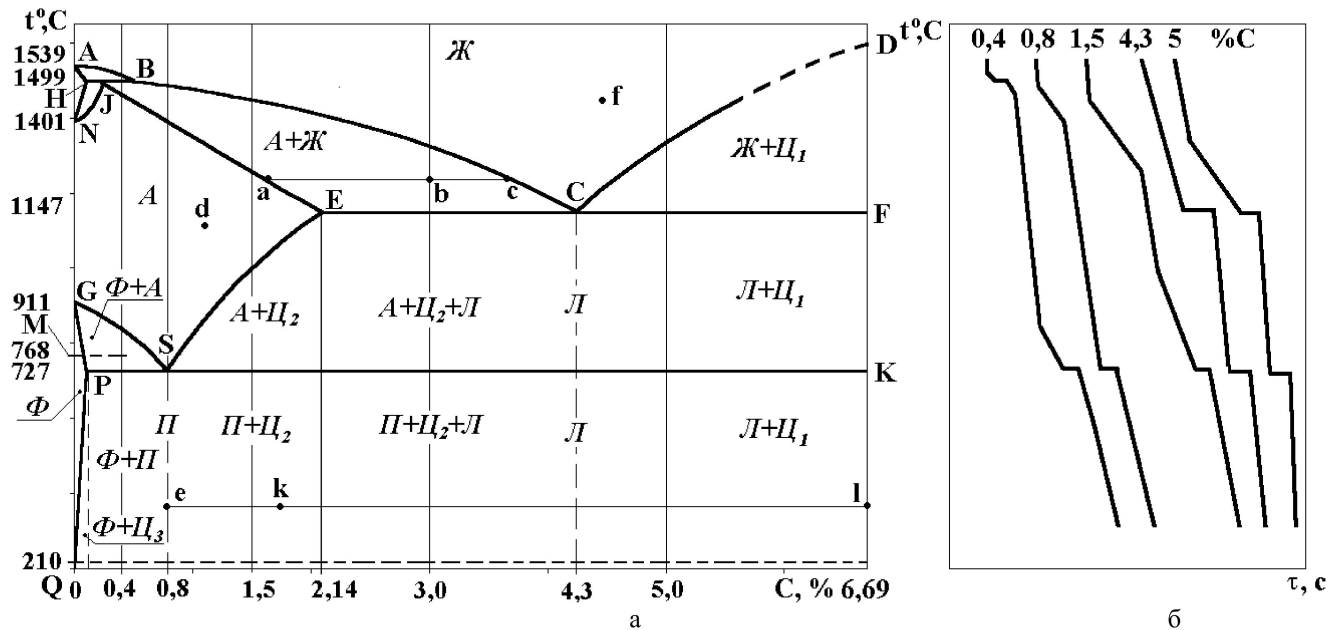


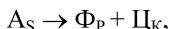
Рис. 4. Диаграмма железо – цементит (а) и кривые охлаждения некоторых железоуглеродистых сплавов (б).

На линии ECF при температуре 1147⁰C и содержании углерода 4,3% протекает **эвтектическая** реакция:



т.е. жидкий сплав концентрации точки С кристаллизуется в аустенит концентрации точки Е и цементит концентрации точки F, образуется ледебурит. Эта реакция протекает во всех сплавах, содержащих больше 2,14% углерода.

На линии PSK при температуре 727⁰C и содержании углерода 0,8% протекает **эвтектоидная** реакция:



т.е. аустенит распадается на феррито-цементитную смесь (перлит), имеющую под оптическим микроскопом вид перламутра. Практически у всех промышленных железоуглеродистых сплавов имеется перлитное превращение.

Рассмотрим несколько кривых охлаждения железоуглеродистых сплавов (рис. 4, б). У сплава с содержанием 0,8% углерода ниже линии BC начинается процесс кристаллизации, т.е. из жидкого сплава кристаллизуется аустенит. Кристаллизация заканчивается на линии солидус (АНJECF). Ниже этой линии до точки S в сплаве превращений нет. При достижении температуры 727⁰C (точка S) аустенит превращается в перлит. Это эвтектоидное (перлитное) превращение происходит кристаллизационно-диффузионным путем. Ведущей фазой является цементит. По границам зерен аустенита появляются центры кристаллизации цементита. К этим центрам из близлежащих слоев аустенита диффундируют атомы углерода и образуют пластинки цементита. Аустенит обедняется углеродом. Обедненный углеродом аустенит (γ -железо) превращается в феррит (α -железо). Таким образом получается хорошо построенная (механическая) смесь феррита и цементита, которая называется перлитом.

Кривые охлаждения доэвтектоидных сталей ($C < 0,8\%$) имеют некоторые различия. Прежде всего, при температуре 1499⁰C протекает перитектическая реакция, ниже линии GS из аустенита кристаллизационно-диффузионным путем выделяется феррит. В результате выделения феррита аустенит (по первому правилу отрезков) обогащается углеродом. При понижении температуры до 727⁰C в оставшемся аустените содержится 0,8% углерода. Аустенит превращается в перлит. Таким образом, в доэвтектоидных сталях структура состоит из феррита и перлита.

На кривых охлаждения заэвтектоидных сталей ($C > 0,8\%$) при температурах ниже линии SE из аустенита выделяется избыточный вторичный цементит. Обоedнение аустенита углеродом можно проследить, применяя первое правило отрезков. При 727°C аустенит имеет $0,8\%$ углерода и превращается в перлит, как и в доэвтектоидных сплавах. Структурными составляющими заэвтектоидных сталей являются перлит и вторичный цементит.

Рассмотрим процесс кристаллизации чугунов, т.е. сплавов, содержащих $2,14...6,69\%$ углерода. Эвтектический сплав с $4,3\%$ углерода выше температуры точки C находится в жидком состоянии. При 1147°C происходит эвтектическое (ледебуритное) превращение, и из жидкого сплава одновременно кристаллизуются аустенит и цементит, т.е. образуется эвтектическая (механическая) смесь – ледебурит. При температурах ниже 1147°C из аустенита, входящего в ледебурит, выделяется вторичный цементит, как и в заэвтектоидных сталях. При температуре 727°C в аустените остается $0,8\%$ углерода, и аустенит превращается в перлит. Таким образом, при температурах ниже 727°C ледебурит состоит из перлита и цементита.

В доэвтектических чугунах ($C < 4,3\%$), начиная с температуры линии ликвидус (BC), кристаллизуется аустенит. Оставшийся жидкий сплав, согласно первому правилу отрезков, обогащается углеродом. При температуре 1147°C в оставшемся жидком сплаве находится $4,3\%$ углерода. Этот сплав кристаллизуется в ледебурит. При температурах ниже 1147°C из структурно свободного аустенита и аустенита, входящего в ледебурит, выделяется вторичный цементит. Аустенит обедняется углеродом. При 727°C он содержит $0,8\%$ углерода и превращается в перлит. Таким образом, при температуре ниже 727°C структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита.

В заэвтектических чугунах ($C > 4,3\%$) отличие в процессе кристаллизации состоит в том, что из жидкого сплава в первую очередь кристаллизуется цементит первичный. В остальном нет никакого отличия от кристаллизации эвтектических и доэвтектических чугунов: на линии ECF образуется ледебурит, а на линии PSK – перлит.

На диаграмме железо–цементит можно выделить некоторые характерные критические точки, которые используются в материаловедении при рассмотрении вопросов теории и технологии термообработки сталей.

Точка A_0 – 210°C , магнитное превращение цементита, точка Кюри для цементита. При температуре ниже 210°C цементит магнитен, выше – немагнитен.

Точка A_1 – 727°C , происходит превращение аустенита в перлит при охлаждении и перлита в аустенит при нагреве. Эта точка соответствует линии PSK. При нагреве критическая точка A_1 обозначается A_{c1} , а при охлаждении – A_{r1} . В дальнейшем нужно помнить, что значок "с" около А обозначает нагрев, а "r" – охлаждение.*

Точка A_2 – 768°C , точка Кюри для железа, происходит переход магнитного железа в немагнитное при нагреве стали.

Точка A_3 – температуры на линии GS диаграммы, соответствуют полному переходу структуры доэвтектоидной стали в аустенит при нагреве или началу выделения феррита из аустенита при охлаждении.

Точка A_4 – 1401°C , это температура превращения δ -железа в γ -железо при охлаждении, соответствует точке N на диаграмме.

Точка A_m – температуры на линии SE диаграммы, соответствуют полному переходу структуры заэвтектоидной стали в аустенит при нагреве или началу выделения вторичного цементита из аустенита при охлаждении.

Фазовые и структурные превращения на линиях диаграммы железо–цементит при охлаждении сплавов:

BC – начало выделения аустенита из жидкости;

JE – конец выделения аустенита из жидкости;

CD – начало выделения первичного цементита из жидкости;

ECF – образование ледебурита из жидкости, линия эвтектического (ледебуритного) превращения, $t = 1147^{\circ}\text{C}$;

GS – начало выделения феррита из аустенита;

SE – начало выделения вторичного цементита из аустенита;

PSK – образование перлита из аустенита, линия эвтектоидного (перлитного) превращения, $t = 727^{\circ}\text{C}$.

Фазовые превращения в точках диаграммы при нагревании и охлаждении сплавов:

A – $t = 1539^{\circ}\text{C}$, температура плавления (кристаллизации) чистого железа);

* Критические точки A_r и A_c происходят от начальных букв французских слов: A – arrêt – остановка (площадка на кривой охлаждения и нагревания), r – refroidissement – охлаждение и c – chauffage – нагрев.

- С – $t = 1147^{\circ}\text{C}$, $C = 4,3\%$, плавление и образование ледебурита;
 D – $t \approx 1550^{\circ}\text{C}$, $C = 6,69\%$, температура плавления (кристаллизации) цементита;
 E – максимальное растворение углерода в аустените, $C = 2,14\%$,
 $t = 1147^{\circ}\text{C}$;
 S – минимальное растворение углерода в аустените, $C = 0,8\%$,
 $t = 727^{\circ}\text{C}$, образование перлита;
 G – превращение β -железа в γ -железо при нагревании, $t = 911^{\circ}\text{C}$;
 P – максимальное растворение углерода в α -железе, $C = 0,02\%$,
 $t = 727^{\circ}\text{C}$.

5. ПРАВИЛА ФАЗ И ОТРЕЗКОВ

Правило фаз (правило Гиббса) применяется для анализа кривых охлаждения сплавов и выражается математической зависимостью

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

где C – число степеней свободы, или вариантность системы;

K – число компонентов;

Φ – число фаз;

1 – внешний фактор (температура).

Напомним, что **компонентами** называются химические элементы, химические соединения и вещества, образующие систему. На диаграмме железо–цементит компонентами являются железо и цементит, и почти во всех точках диаграммы число компонентов $K=2$, за исключением сплавов с содержанием углерода 0% (чистое железо) и 6,69% (цементит).

Фаза – химически однородная часть сплава, отделенная от других частей поверхностью раздела. Фазами диаграммы являются железо, цементит, жидкий сплав, твердые растворы (феррит и аустенит).

Под **числом степеней свободы** системы понимаются внешние и внутренние факторы (температура, химический состав сплава, давление), которые можно менять без изменения числа фаз.

Возьмем на диаграмме железо–цементит некоторые точки и определим для них число степеней свободы.

В точке **d** имеется только одна фаза – аустенит: $C=2-1+1=2$. Значит, в определенном интервале можно изменять как температуру, так и химический состав сплава без изменения числа фаз. В точке **f** выше линии ликвидус также $C=2$.

В точке **b** из жидкого сплава кристаллизуется аустенит. Имеются, таким образом, две фазы – аустенит и жидкий сплав: $C=2-2+1=1$. Значит, в точке **b** число степеней свободы равно 1 и можно изменять один из факторов: температуру или химический состав сплава. Один из факторов в данном случае зависимый.

В точке **C** при содержании 4,3% углерода жидкий сплав превращается в ледебурит. Сплав имеет три фазы – жидкий сплав, аустенит и цементит: $C=2-3+1=0$. Это значит, что нельзя изменять внешние и внутренние факторы так, чтобы это не вызвало изменения числа фаз, иначе говоря, процесс происходит при постоянной температуре.

Применим к диаграмме железо–цементит первое и второе правило отрезков.

По первому правилу отрезков можно определить химический состав фаз или структур. Для этого через заданную точку проводим горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область. Проекция точек пересечения на ось концентраций показывают химические составы фаз. Например, в точке **b** (3,0% углерода) имеются две фазы – аустенит и жидкий сплав. Проекция точки **a** на ось концентраций дает содержание углерода в аустените (1,7%), а точка **c** – в жидком сплаве (3,8%).

По второму правилу отрезков можно определить количественное соотношение фаз или структур. Для этого через заданную точку проводим горизонтальную линию. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими химический состав фаз, обратно пропорциональны массе этих фаз. Для примера возьмем точки **b** и **k** и определим количественное соотношение фаз. В точке **b** (3,0% углерода) имеются аустенит и жидкий сплав. Отрезок $\langle ac \rangle$ характеризует массу всего сплава, отрезок $\langle ab \rangle$ – массу жидкого сплава, $\langle bc \rangle$ – массу аустенита:

$$\frac{m_A}{m_A + m_{\text{ж}}} = \frac{\langle bc \rangle}{\langle bc \rangle + \langle ab \rangle} = \frac{\langle bc \rangle}{\langle ac \rangle} = \frac{3,8 - 3,0}{3,8 - 1,7} = \frac{0,8}{2,1} = 0,38.$$

Значит, в точке **b** масса аустенита по отношению ко всему сплаву составляет 38%, а масса жидкого сплава – 62%.

В точке **k** (1,8% углерода) имеется перлит и цементит. Определим массу перлита по отношению к массе перлита и цементита:

$$\frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{ц}}} = \frac{\langle kl \rangle}{\langle kl \rangle + \langle ek \rangle} = \frac{\langle kl \rangle}{\langle el \rangle} = \frac{6,69 - 1,8}{6,69 - 0,8} = \frac{4,89}{5,89} = 0,83.$$

Значит, в точке k масса перлита по отношению ко всему сплаву составляет 83%, а масса цементита – 17%.

6. ЗНАЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ ЖЕЛЕЗО–ЦЕМЕНТИТ

Диаграмма железо–цементит имеет большое теоретическое и практическое значение.

Теоретическое значение диаграммы состоит в том, что она дает возможность судить о фазовых и структурных превращениях в железоуглеродистых сплавах при медленном нагреве и охлаждении. По диаграмме можно определять целесообразность применения определенных видов термической обработки различных железоуглеродистых сплавов. Как установил Н.С. Курнаков, по виду диаграммы можно судить о характере изменения различных свойств сплавов.

Практическое значение диаграммы состоит в том, что она позволяет назначать температуры нагрева деталей и инструментов при выполнении различных термических операций и обработки давлением железоуглеродистых сплавов.

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Вычертить кривую охлаждения чистого железа и дать характеристику α -, β -, γ - и δ -железа.
2. Дать определения и краткую характеристику структур железоуглеродистых сплавов.
3. Вычертить диаграмму железо–цементит.
4. Построить кривые охлаждения железоуглеродистых сплавов с определенным содержанием углерода (по заданию преподавателя) и проанализировать их с применением правила фаз.
5. Применить правила отрезков для точек (по указанию преподавателя) диаграммы железо–цементит.
6. Изложить теоретическое и практическое значения диаграммы.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определения и краткую характеристику структур железоуглеродистых сплавов.
2. Охарактеризуйте аллотропические формы α -, β -, γ - и δ - железа.

3. Назовите температуры критических точек A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_m .
4. Сущность правила граничных областей при простановке структур на диаграмме.
5. Как определить содержание углерода в доэвтектоидной стали, если известно соотношение феррита и перлита?
6. Правила построения кривых охлаждения железоуглеродистых сплавов.
7. Анализ кривых охлаждения с применением фаз Гиббса.
8. Применение первого и второго правил отрезков.
9. Теоретическое и практическое значение диаграммы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1986.
2. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Metallurgia, 1986.
3. Кондратьев Е.Т. Технология конструкционных материалов и материаловедение. М.: Колос, 1992.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990.
5. Некрасов С.С. и др. Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению. М.: Агропромиздат, 1991.
6. Солнцев Ю.П. и др. Металловедение и технология металлов. М.: Metallurgia, 1988.