**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ**

**ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет: «Технология машиностроения»

Кафедра: «Машины и автоматизация сварочных процессов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к курсовой работе на тему: «АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ»

по дисциплине « Теоретические основы образования сварного соединения» для подготовки

бакалавров по направлению 150301 – Машиностроение, профиль «Оборудование и технология сварочного производства»

Ростов – на – Дону – 2020 г.

Составитель: проф., Д.Т.Н. Полетаев Ю.В.

Методические указания к курсовой работе на тему: «Анализ диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов и химических соединений» по дисциплине: «Материалы и их поведение при сварке»/ Донской государственный технический университет, Ростов – на – Дону,2020.

Печатается по решению методической комиссии факультета «Машиностроительные технологии и оборудование»

Научный редактор: проф., Д.Т.Н. А.А. Чуларис

© Полетаев Ю.В.,2020

© ДГТУ, 2020

**СОДЕРЖАНИЕ**

Предисловие………………………………………………………………………4

1.Курсовая работа на тему «Анализ диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов и химических соединений»…………………………………………….5

1.1. Общие положения………………………………………………………… 5

1.2. Содержание, объем и последовательность выполнения задания……… 7

1.3. Пример выполнения задания………………………………………………8

1.4. Варианты индивидуальных заданий……………………………………...12

1.5. Справочные материалы……………………………………………………14

1.6. Список литературы………………………………………………………...32

1.7. Контрольные вопросы……………………………………………………..32

1.8. Построение и рубрикация индивидуального задания…………………...33

1.9. Защита курсовой работы…………………………………………………..34

Приложение А………………………………………………………………35

**ПРЕДИСЛОВИЕ**

Основные промышленные способы сварки сопровождаются нагревом металлов и сплавов в широком интервале температур и последующим охлаждением нагретых зон с разными скоростями. Подобное тепловое воздействие способствует заметным структурным изменениям у металлов и возникновению значительных сварочных напряжений и деформаций. Условия протекания сложных структурных и фазовых изменений имеют определяющее значение для прочности, пластичности, вязкости, жаропрочности, коррозийной стойкости и других свойств. Структурные и фазовые превращения наряду с диффузионными процессами при сварке являются более сложными, чем при термической обработке металлов. Тем не менее, диаграммы состояния наглядно характеризуют процессы плавления, затвердевания, структурного и фазового изменения сплавов различных систем при термо-деформационном воздействии сварки. Диаграмма состояния позволяет выбирать условия термической обработки, сварки, ковки и других технологических операций.

Следует отметить, что высокие скорости сварочного нагрева и охлаждения, температуры определяют состав и структурно-фазовое состояние металла сварного соединения и направленность диффузионных процессов. В зоне термического влияния помимо процессов фазовых и структурных превращений могут протекать процессы рекристаллизации и полигонизации.

Особое значение все приведенные факторы имеют для сварных соединений легированных и высоколегированных сталей.

В методических указаниях изложены методы анализа фазовых и структурных превращений двухкомпонентных сплавов при нагреве и охлаждении в широком интервале температур; расчета количества и состава основных фаз и сплавов.

Указания содержат примеры решения и варианты индивидуальных заданий.

**1.КУРСОВАЯ РАБОТА НА ТЕМУ: «АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ «**

**1.1 Общие положения**

В промышленности чаще всего применяют не чистые металлы, а сплавы двух или нескольких элементов на основе (т.е. преимущественном содержании) какого-либо одного металла (компонента).

Металлическими сплавами называют вещества полученные сплавлением двух или более элементов и обладающих металлическими свойствами. Сплавы полученные методами спекания, электролитического осаждения, возгонки т.п. называются псевдо - сплавами.

Системой называют совокупность веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях. Системы бывают простые (состоят из одного компонента) и сложные. Сложная система включает несколько компонентов и представляет все возможные количественные сочетания их при различных температурах.

Фазой называют однородную часть системы, отделенную от других составляющих (фаз) поверхностью раздела при переходе через которую химический состав или структура вещества изменяется скачком.

Стали – сплавы на основе железа содержат углерод, марганец, кремний, а в специальных случаях никель, хром, молибден и другие элементы. Атомы железа составляют обычно более 90% и только у отдельных сталей со специальными свойствами – более 60%.

Большое значение имеют сплавы на основе алюминия, содержащие магний, медь, цинк и другие элементы, сплавы на основе меди с добавлением цинка, олова, алюминия и др., сплавы на основе титана, содержащие железо и др.

Путем термообработки можно в широких пределах изменять физические и механические свойства большинства промышленных сплавов. Возможность изменения свойств сплавов путем термообработки, их свариваемость, структура и свойства сварных соединений и, что очень важно, возможность получения надежного соединения при сварке сплавов на основе разных металлов определяются природой сплавов, их строением, фазовым состояние и составом, изменениями, происходящими при нагреве и охлаждении как в процессе термообработки, так и сварки.

Как правило элементы образующие металлический сплав, в жидком состоянии полностью взаимно растворимые, т.е. образуют однородный материал со статистически равномерно распределенными в объеме атомами элементов. Однако имеется ряд металлов, не смешивающихся друг с другом даже в жидком состоянии. Такие элементы естественно не могут образовывать сплавов, свариваемых методами сварки плавлением, а их сварка давлением в твердом состоянии – сложная задача. При переходе жидкого однородного сплава в твердое состояние в нем могут происходить различные изменения, связанные с превращениями металла, представляющего основу сплава и взаимодействием между элементами, составляющими сплав

Это взаимодействие может быть связано с тем, что элементы добавки в твердом состоянии полностью или частично растворяются в металле-основе. При этом, предел насыщения раствора может быть ограниченным и меняться с изменением температуры. В ряде случаев составляющие сплава образуют механические смеси либо самих компонентов сплава, либо ограниченных по концентрации твердых растворов. Составляющие сплава могут образовывать химические соединения, которые, в свою очередь, могут оставаться свободными, а могут взаимодействовать с основой, в частности растворяться в ней. Могут быть и другие формы взаимодействия составляющих сплавов в твердом состоянии. Важно то, что каждая из них по-своему влияет на свойства сплава, и особенно на структуру и свойства сварного соединения в целом.

Сплавы двух или нескольких элементов после перехода из жидкого состояния в твердое могут находиться: 1) в виде твердых растворов, 2) в виде механической смеси отдельных составляющих и 3) в виде химических соединений. Кроме того, могут быть и промежуточные состояния, а также сочетания в одном сплаве указанных состояний. Характер взаимодействия элементов (компонентов) образующих сплав, имеет большое значение для сварки. Лучше всего должны свариваться сплавы, компоненты которых образуют непрерывный ряд твердых растворов, хуже – с ограниченными твердыми растворами, затем с химическими соединениями и не взаимодействующие.

Диаграммы состояния характеризуют процессы затвердевания и структурного изменения сплавов различных систем и дают наглядное представление о фазах в любом сплаве данной системы. Диаграмма состояния показывает устойчивые состояния, то есть состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии.

Диаграммы состояния на практике используют два выбора условий термической обработки сплавов, их ковки, штамповки, сварки и тому подобное.

Целью работы является закрепление и углубление знаний студента по методам анализа диаграмм состояния системы сплавов, их структурно-фазовым превращениям при нагреве и охлаждении, условиям формирования физико-механических свойств исследуемого сплава.

**1.2. Содержание, объем и последовательность выполнения задания**

Исходными данными для задания служат: индивидуальный вариант задания, лекционный материал, лабораторные работы и рекомендуемая литература [1.6.1 – 1.6.6].

Работа состоит из графической части объемом 1-2 листа формата А4 и расчетно-пояснительной записки объемом 2-4 листа, формата А4.

Графическая часть включает:

а) общий вид диаграммы состояния системы сплавов, с указанием заданного сплава;

б) кривую охлаждения заданного сплава с указанием реакций превращения;

в) схему кинетики структурных превращений сплава при охлаждении.

Расчетно-пояснительная записка по содержанию должна соответствовать примеру рассмотренному в подразделе 1.3 настоящих методических указаний.

При выполнении работы студенту предстоит решить задачи в следующей последовательности:

а) дать общую характеристику заданной диаграммы состояния системы сплавов; охарактеризовать состав, свойства, назначение и область применения сплавов;

б) для заданного сплава, в соответствии с законом Гиббса, описать условия сосуществования устойчивых фаз и в соответствии с правилом отрезков (рычага) рассчитать количество обеих фаз и их концентрацию (для условий одновременного существования двух фаз);

в) для заданного сплава. Построить кривую охлаждения, записать реакции превращения на характерных участках и нарисовать схему кинетики структурных превращений сплава при охлаждении.

**1.3. Пример выполнения задания**

В соответствии с индивидуальным заданием предлагается выполнить анализ диаграммы состояния системы сплавов Pb-Sb и состояния сплава, содержащего 5% сурьмы (рис.1)

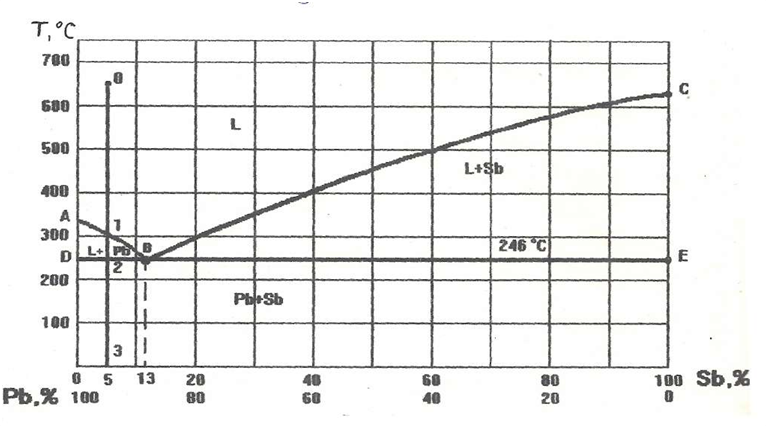


Рисунок 1. Диаграмма состояния системы сплавов «Pb – Sb»

Показанная на рис 1. диаграмма состояния системы сплавов «Pb-Sb» относится к диаграммам состояния 1 типа, которые характеризуют системы, компоненты (свинец-сурьма) которых в жидком состоянии полностью взаимно растворяются, а в твердом состоянии образуют механическую смесь кристаллов обоих компонентов. Можно увидеть, что начало затвердевания различных сплавов системы происходит при различных температурах, а окончание затвердевания – при одной температуре **Т=246** для всей системы сплавов и что только у одного сплава **(13% Sb)** и у чистых компонентов – по одной критической точке, каждая из которых отвечает температуре полного затвердевания. Выше линии ликвидуса **АВС все сплавы находятся в жидком состоянии.** Ниже линии солидус **ДВЕ** все сплавы находятся в твердом состоянии. В точке В при содержании **13% Sb** и при температуре 246 кристаллизация свинца и сурьмы происходит одновременно, по эвтектической реакции, с образованием тонкой механической смеси кристаллов компонентов (двух фаз). Сплавы, содержащие меньше 13% Sb называются доэвтектическими, а больше 13% -заэвтектическими.

Применительно к системе сплавов «свинец-сурьма», отметим следующее:

1) по линии АВ диаграммы (см. рис.1) начинается выпадение кристаллов свинца;

2) в области диаграммы ABD находятся кристаллы свинца и жидкий раствор, концентрация которого около линии BD приближается к эвтектической;

3) по линии BD затвердевает весь оставшийся маточный раствор эвтектического состава;

4) ниже линии BD находятся твердые доэвтектические сплавы, состоящие из кристаллов свинца и эвтектики;

5) по линии ВС начинается выпадение кристаллов сурьмы;

6) в области диаграммы СВЕ находятся кристаллы сурьмы и жидкий раствор, концентрация которого около линии ВЕ приближается к эвтектической;

7) по линии ВЕ затвердевает весь оставшийся маточный раствор эвтектического состава;

8) ниже линии ВЕ находятся твердые заэвтектические сплавы, состоящие из кристаллов сурьмы и эвтектики.

При нагревании сплавов вначале по линии солидуса (DЕ) расплавляется эвтектика, в которой при дальнейшем нагревании постепенно растворяются кристаллы свинца (у доэвтектических сплавов) или сурьмы (у заэвтектических сплавов); растворение заканчивается по линии ликвидуса (АВС), выше которой находятся жидкие растворы системы сплавов.

Проследим процесс кристаллизации сплава (5% Sb + 95% Pb) и получающуюся в результате структуру. Доэвтектический сплав, содержащий 5% Sb, выше первой критической точки 1 (см. рис.1) находятся в жидком состоянии. Если сплав медленно охлаждать, то кривая охлаждения для него будет иметь вид, показанный на рис.2.

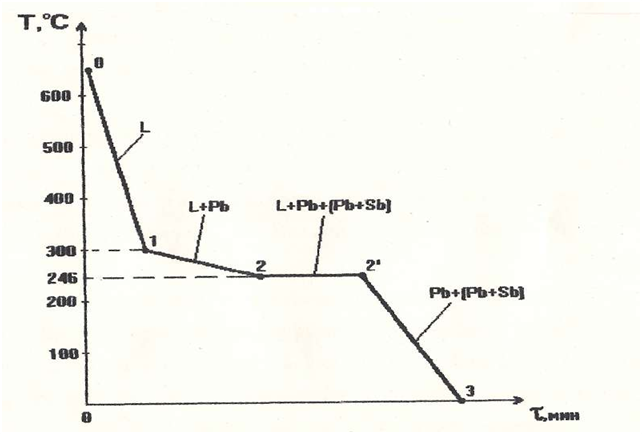


Рисунок 2. Кривая охлаждения сплава содержащего 5% Sb и 95% Pb

На этой кривой участок 0-1 соответствует охлаждению жидкого сплава, участок 1-2 – выделению кристаллов Pb, участок 2-2′ - совместному выделению кристаллов Sb и Pb и участок 2′ - 3 –охлаждению твердого сплава.

Действительно, при температуре выше точки 1, сплав содержащий 5% Sb находится в жидком состоянии (рис.3). При охлаждении в точке 1 из жидкого сплава выпадают центры кристаллизации чистого свинца, так как свинец в этом сплаве находится в количестве, избыточном по сравнению с эвтектическим составом. При дальнейшем охлаждении между точками 1 и 2 продолжается рост имеющихся кристаллов свинца и выпадение новых, поэтому количество свинца в жидком (маточном растворе) постепенно уменьшается, и около точки 2 маточный раствор имеет эвтектический состав – (Pb+ Sb). В точке 2, при маточной температуре 246 происходит кристаллизация всего оставшегося маточного раствора эвтектического состава. Ниже точки 2′ сплав находится в твердом состоянии и представляет смесь кристаллов избыточного свинца и эвтектики (Pb+ Sb) (см.рис. 3).

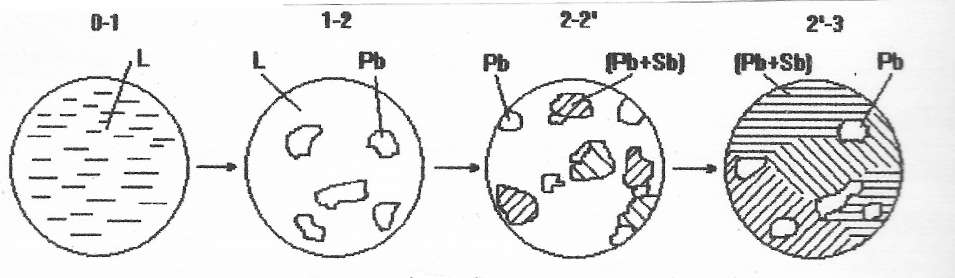


Рисунок 3. Строение сплава в разные моменты охлаждения.

Выше изложенное подтверждается результатами расчета в соответствии с правилом фаз. Кристаллизация сплава протекает при переменной температуре (от точки 1 до точки 2). В данном случае компонентов К=2, число фаз f=2 (жидкость и кристаллы свинца) и число степеней свободы будет равно:

С =К- f +1=2-2+1=1.

Это означает, что при каждой температуре, на участке 1-2, фазы имеют определенную концентрацию. Одновременная кристаллизация сурьмы и свинца (участок 2-2′) должна протекать при постоянной температуре 246, так как при температуре имеются три фазы (жидкость, кристаллы сурьмы и свинца) и число степеней свободы равно нулю:

С =К- f +1=2-3+1=0.

Это состояние трехфазного (нонвариантного) равновесия, то есть такое равновесие может быть лишь при определенной (постоянной) температуре и составе фаз. На участке 2′-3 происходит охлаждение при переменной температуре двухфазного твердого сплава, а число степеней свободы будет равно:

С =К- f +1=2-2+1=1.

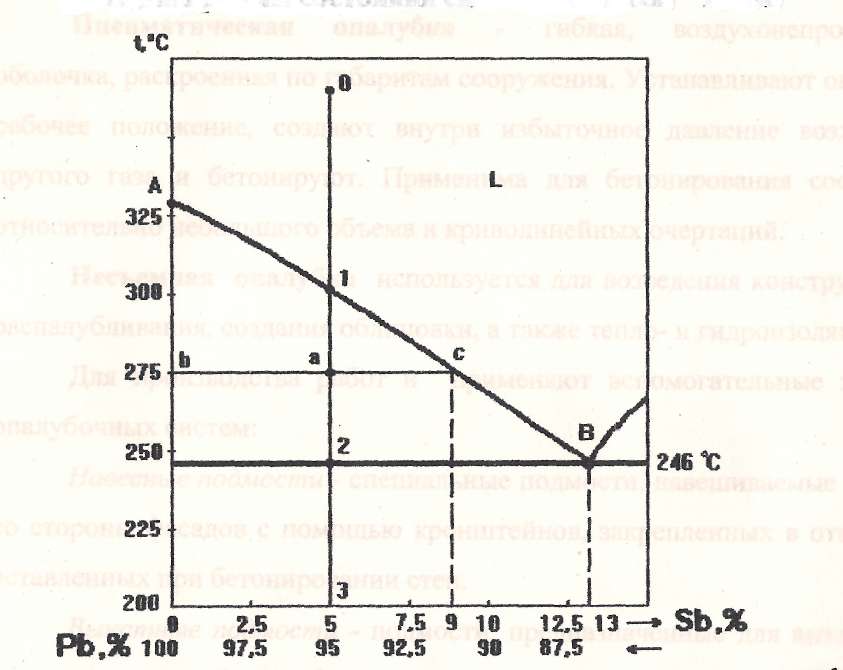
 В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию. Для этого воспользуемся правилом рычага (отрезков). Например, в точке **а,** при температуре t=275 (рис.4) сплав находится в двухфазном состоянии (жидкость и кристаллы (Pb ). Концентрация жидкого раствора в любой точке отрезка 1-2 определяется проекцией данной точки на линию ликвидуса; так, в точке 1 маточный раствор будет содержать 5% Sb, в точке **а** – 9.0% Sb, а в точке 2 – 13% Sb.

Рисунок 4. Часть диаграммы состояния системы сплавов « Pb+ Sb».

Таким образом, состав маточного раствора данного сплава при затвердевании определяется точками на линии ликвидуса в зависимости от температуры. Соотношение жидкой и твердой фаз в точке а определяется плечами горизонтального рычага, проведенного через данную точку. Так, вес жидкой фазы соответствует плечу ba, вес твердой фазы – плечу ас рычага bс, а вес всего сплава –длине рычага bс.

В качестве масштаба можно использовать шкалу процентного содержания сурьмы. Пользуясь этой шкалой, находим, что жидкая фаза в точке **а** составляет 5/9, а твердая – (1-5/9) или 4/9 от веса сплава. При дальнейшем охлаждении количество жидкой фазы будет уменьшаться, и к точке 2 составит 5/13 от всего сплава, то есть содержание эвтектики в данном сплаве составит 5/13 веса сплава. Если обозначить через Q вес взятого сплава, через QL - вес жидкой фазы, а через Qs – вес твердой фазы, то по правилу рычага можно написать следующие соотношения:

**1.4. Варианты индивидуальных заданий**

Перечень индивидуальных заданий на тему «Анализ диаграммы состояний двухкомпонентных сплавов и химических соединений» приведен в табл. 1. Номер варианта задания совпадает с порядковым номером студента в списке группы.

Таблица №1. Варианты индивидуальных заданий

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № варианта | Диаграмма состояний сплавов (рисунок) | Исследуемый сплав | Литература\*,  страница |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Cu – Ag (рис. 5) | 4% Ag | [1.6.1],91 |
| 2 | Fe – C (рис. 7)  Fe – C (рис.7) | 0,25%C | [1,6,1],149 |
| 3 | 0,45%C |
| 4 | 0,8%C |
| 5 | 0,015%C |
| 6 | Fe – P (рис. 8) | 2%P | [1,6,1],164 |
| 7 | Cu – Zn (рис.16) | 45%Zn | [1,6,1], 513 |
| 8 | Fe-C (рис. 7) | 0,15%C | [1.6.1],149 |
| 9 | Al – Cu (рис. 9) | 1%Cu | [1,6,1],520 |
| 10 | Cu – Sn (рис.18) | 20%Sn | [1,6,1] ,517 |
| 11 | Cu – S (рис. 10) | 1%S | [1,6,1],5 |
| 12 | Fe – C (рис. 7) | 0,3%C | [1.6.1],149 |
| 13 | Fe – S (рис.17) | 20%S | [1.6.1],165 |
| 14 | Fe – Si (рис. 11) | 1%Si | [1.6.1],307 |
| 15 | Fe – Ni ( рис.19) | 10% Ni | [1.6.1], 305 |
| 16 | Cu – Pb (рис. 12) | 20%Pb | [1.6.1],511 |
| 17 | Fe – Mo (рис.15) | 5% Мо | [1.6.1], 307 |
| 18 | Fe – C (рис. 7) | 0,7%C | [1.6.1],149 |
| 19 | Al – Fe (рис. 13) | 15%Fe | [1.6.1],306 |
| 20 | Fe – C (рис. 7)  Fe – C (рис. 7) | 1%C | [1.6.1],149 |
| 21 | 2,14%С |
| 22 | 3,0%С |
| 23 | 4,3%С |
| 24 | Fe – Ni (рис.19) | 10%Ni | [1.6.1],305 |
| 25 | Fe – Mn (рис.20) | 20%Mn | [1.6.1],306 |
| 26 | Fe – Cr (рис.21) | 30% Cr | [1.6.1],307 |
| 27 | Fe – C (рис. 7) | 5,5%C | [1.6.1],149 |
| 28 | Cu – Al (рис.22) | 6%Al | [1.6.1],520 |
| 29 | Cu – Be (рис.23) | 3% Ве | [1.6.1],521 |
| 30 | 7% Ве |

\*- Указано по списку литературы. Вес исследуемого сплава Q=100 кг

**1.5. Справочные материалы**

Диаграмма состояния сплавов из двух компонентов, обладающих полной растворимостью в жидком состоянии и ограниченной растворимостью в твердом состоянии характерна для системы сплавов «медь — серебро ( Cu-Ag)».Линия AВС (рис. 5) — ликвидус; выше этой линии находятся жидкие растворы" (ж. р.);

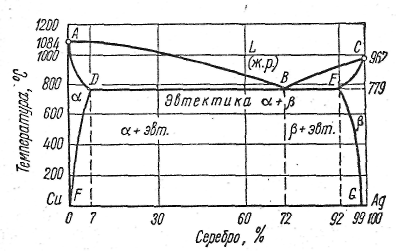


Рисунок 5. Диаграмма состояния системы сплавов « Cu-Ag».

Верхняя часть диаграммы показывает, что оба компонента взаимно растворимы, но в ограниченной доле: предельная концентрация раствора (серебра в меди)— 7%, а раствора (меди в серебре) — 8%. При большей концентрации по линии DЕ образуется эвтектика растворов Кривые DF и EG показывают, что при охлаждении ниже линии эвтектики (DЕ) происходит постепенный распад твердых растворов при температуре 0° раствор не существует, а раствор имеет концентрацию 1% .(в сплавах, содержащих более 1% меди).

Диаграмма состояния сплавов из двух компонентов, обладающих полной растворимостью в жидком состоянии, но нерастворимые в твердом состоянии и образующие устойчивые химические соединения компонентов, показана на рис.6 . Это диаграмма состояния системы сплавов

«магний — кальций (Мg — Са)». Химическое соединение Мg4Са3 можно  
рассматривать как новый, третий компонент, который делит диаграмму состояния ( Мg — Са) на две диаграммы типа I: (Мg —- Мg4Са3 ) и (Мg4Са3 — Са,). Каждая из них подобна системе «свинец— сурьма». Для первой линия АВС — ликвидус, линия FG — солидус. По линии АВ начинается выпадение кристаллов магния; по линии ВС — выпадение кристаллов соединения Мg4Са3. В точке В одновременно кристаллизуются Мg и Мg4Са3, образуя эвтектику

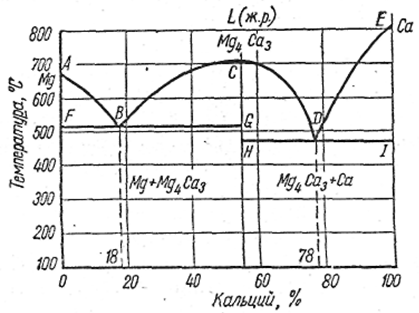


Рисунок 6. Диаграмма состояния системы сплавов »Мg — Са».

Доэвтектические сплавы этой системы представляют собой смесь кристаллов магния и эвтектики, а заэвтектические сплавы - смесь кристаллов соединения Mg4Ca3 и эвтектики.

Представленная на рис.7 диаграмма состояния «железо-цементит» лишь часть диаграммы в области между железом и химическим соединением железа с углеродом - цементитом Fе3С, образуемым при концентрации углерода 6,67%.

В системе сплавов этих двух компонентов —Fе—Fе3С имеются  
следующие фазы: 1. Ж — жидкий раствор углерода в железе (при растворении цементит диссоциирует на железо и углерод).  
2. - аустенит — твердый раствор углерода в е. 3. -феррит —твердый раствор углерода ве . 4. Ц — цементит - химическое соединение углерода с железом — карбид железа Fе3С. Кроме цементита при определенных условиях остывания или нагрева в высокоуглеродистых сплавах либо вместо цементита либо наряду с ним может присутствовать графит Г - свободный углерод.

Помимо твердых растворов и химического соединения в сплавах имеются механические смеси. В области высоких концентраций углерода образуется эвтектика - ледебурит *Л* (при кристаллизации из жидкого состояния) и эвтектоид - перлит *П* (при вторичной кристаллизации). Цементит в рассматриваемых сплавах может быть первичным — *Ц1,* выделяется при кристаллизации из жидкого состояния (линия *СD),* вторичный — *Ц2,* выделяется при вторичной кристаллизации в твердом состоянии (линия *ОЕ)* и третичный - *Ц3* выделяется при распаде пересыщенного γ -твердого раствора (линия *РQ).* Температуры и концентрации характерных точек на диаграмме приведены в табл. 2.

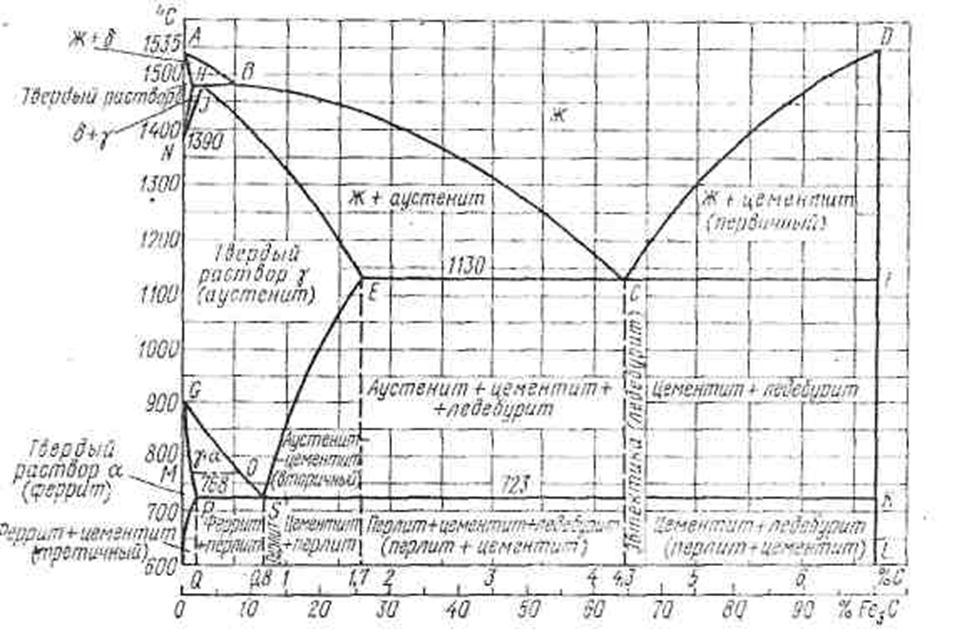


Рисунок 7. Диаграмма состояния сплавов железа с углеродом в области между железом и цементитом (химическим соединением железа с углеродом Fe3C).

Таблица 2. Температуры и концентрации характерных точек на диаграмме.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Показатель | A | B | C | D | E | F | G |
| Содержание углерода, % | 0 | 0,51 | 4,3 | 6,67 | 2,14 | 6,67 | 0 |
| Температура, | 1539 | 1499 | 1147 | 1600 | 1147 | 1147 | 911 |
| Показатель | H | J | K | N | P | S | Q |
| Содержание углерода, % | 0,1 | 0,16 | 6,67 | 0 | 0,02 | 0,8 | 0,006 |
| Температура, | 1499 | 1499 | 727 | 1392 | 727 | 727 | 600 |

Диаграмма состояния сплавов железо-фосфор приведена на рис.8.

Руды железа, а также топливо и флюсы содержат какое-то количество фосфора, которое в процессе выплавки чугуна и стали остается в них. При выплавке стали в основных мартеновских печах из металла удаляется большая часть фосфора. Сталь, выплавленная в основной мартеновской печи, содержит немного фосфора (0,02—0,04 *%),* а в электропечи менее 0,02 *%.* Уменьшить содержание до 0,01 *%* и меньше металлургическими приемами затруднительно и это достигается при использовании исходной высокочистой шихты (например, железо *ПВ).* Диаграмма состояния «железо – фосфор» приведена на рис. *8, а.*

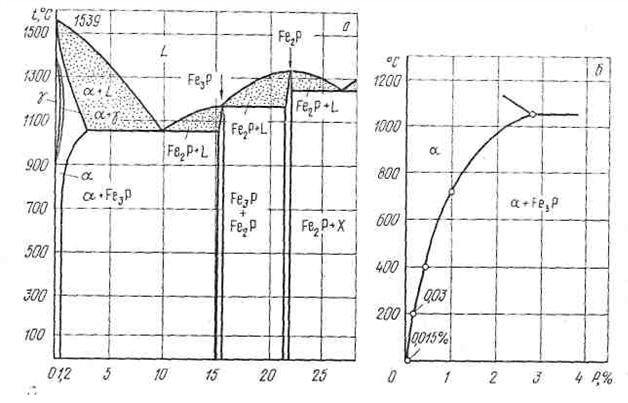
**

Рисунок 8. Диаграмма состояния « Fe-P»:

Р в -железе

Растворимость фосфора при высокой температуре достигает *1,2%,* но она резко снижается при понижении температуры (рис.8*, б)* и согласно последним исследованиям при 200 °С и ниже она составляет всего лишь 0,02—0,03%.Однако это количество фосфора обычно присутствует в стали. Отсюда можно заключить, что фосфор целиком растворяется в α -железе. Тем не менее, углерод и легирующие элементы уменьшают растворимость фосфора, однако, металлографическими методами избыточные соединения не обнаруживаются. Поэтому и в этих случаях фосфор находится в растворе, но такой раствор является пересыщенным.

Современными методами исследования было показано, что находящийся в растворе фосфор неравномерно распределяется и обогащает (сегрегирует) границы зерен. Малая скорость диффузии фосфора в железе практически исключает выделение фосфидных выделений из раствора. Фосфидные включения в виде, так называемой, *фосфидной эвтек­тики (стэдит)* наблюдается в фосфористых чугунах, содержащих фосфора 0,1*% .* Упрочняющая термическая обработка алюминиевых сплавов основана на изменении растворимости соединений в основном алюминиевом растворе, а конкретно для сплавов Аl-Си на изменении растворимости соеди­нения СuА12 в алюминии.

Как видно из рис.9, медь растворяется при комнатной температуре в количестве около 0,2%, а максимальная растворимость при эвтектической температуре 548 °С равна 5,7 %. Любой сплав, содержащий до 5,7 % Сu, можно перевести в однофазное состояние соответствующим нагревом. Это состояние фиксируется быстрым охлаждением. Необходимая скорость охлаждения при закалке определяется скоростью выпадения избыточных фаз из переохлажденного и пересыщенного твердого раствора. Для этой цели строят диаграммы изотермического превращения переохлажденного твердого раствора (С-образные диаграммы). Согласно этой диаграмме максимальная скорость превращения наблюдается вблизи 300 СС. Полученный таким образом твердый раствор при содержании в нем меди более 0,2 % является пересыщенным. В таком пересыщенном и неустойчивом твердом растворе происходят изменения, в конечном итоге приводящие к выделению соединения СuА12 и сохранению в растворе лишь соответствующего равновесной системе количества меди (0,2%). Этот процесс называется старением. Если этот процесс происходит при комнатной температуре, то он называется естественным старением, а если при искусственном повышении температуры – то искусственным старением. Таким образом, видно, что термическая обработка алюминиевых сплавов состоит из двух циклов – закалки и старения. Старение охватывает все процессы, происходящие в пересыщенном твердом растворе, процессы, подготавливающие выделение, и непосредственно процессы выделения. Превращение, при котором происходят только процессы выделения, называется дисперсионным твердением (без сложных подготовительных процессов, о которых речь идет дальше).

На рис. 9.1, а и б представлена структура отожженного сплава Al+4%Cu. На фоне алюминиевого твердого раствора (почти чистого алюминия) видны включения CuAl2. На рис.9.1, в приведена микроструктура того же сплава после закалки. Структура состоит из гомогенного твердого раствора. Нагрев до температуры закалки привел к полному растворению включений CuAl2, а охлаждение при закалке зафиксировало (насколько можно судить по микроструктуре) пересыщенный твердый раствор

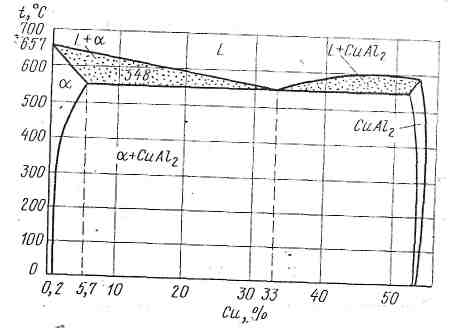


Рисунок 9. Диаграмма состояния «Al-Cu».

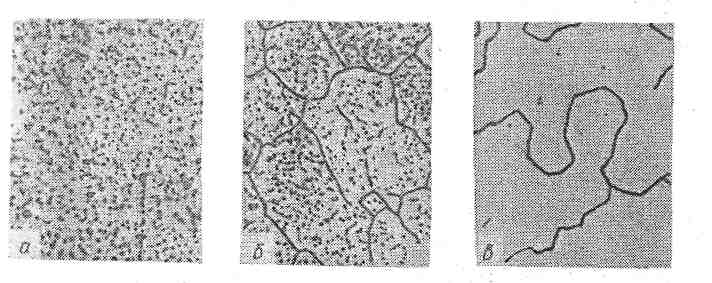


Рисунок 9.1. Структура сплава Al+4%Cu: - в отожженном состоянии, х900; - то же, х120; в- в закаленном состоянии, х100

На Рис. 10 показана диаграмма состояния «медь-сера». Сера является примесью уменьшающей электропроводность меди. Сера нерастворима в меди, однако образует богатые медью эвтектики, содержащие 0,77 % S. Температура плавления эвтектики Т=1067 выше температуры горячей обработки меди. Поэтому сера не вызывает красноломкости*.*

На рис. 11 показана диаграмма состояния Fe – Si. Кремний имеет решетку алмаза. Растворимость кремния в железе при 20 составляет около 15%. Кремний, повышая температуру точки А3, снижает А4 и полностью выклинивает - область 2% Si. Следовательно, ферритными являются все сплавы, содержащие более 2% (практически более 2,5%).

Кремний образует с железом ряд соединений-силицидов, условное обозначение их (греческими буквами) указано на диаграмме.

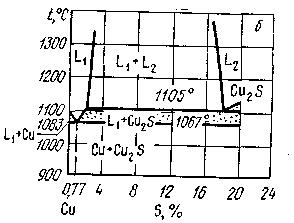
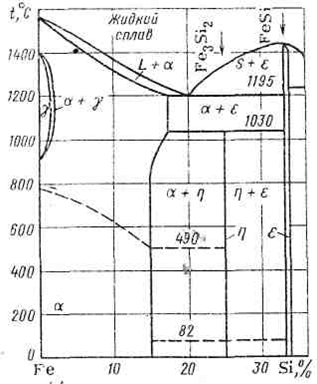
** 

Рисунок 10. Диаграмма состояния «Cu-S». Рисунок 11 Система «Fe-Si»

Вреднейшей примесью меди является свинец. Этот элемент почти нерастворим в меди и образует легкоплавкую эвтектику в системе Cu-Pb, содержащую 99,94% Pb (рис.12 ).

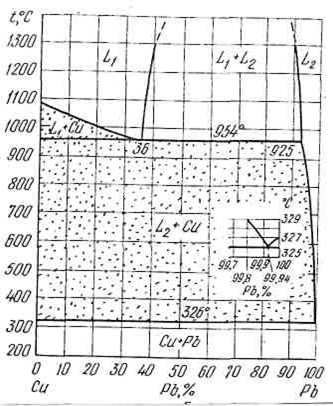


Рисунок 12. Диаграмма системы » Cu-Pb».

Кристаллизация сплавов меди со свинцом фактически заканчивается при температуре плавления Т=327, а структура сплава состоит из ранее выделившихся кристаллов меди, вокруг которых расположены в виде оболочки свинец. Вследствие этого нагрев сплава выше температур плавления компонентов сопровождается нарушением связи между первичными кристаллами меди (красноломкость). Прокатка такого сплава невозможна из-за его красноломкости. Свинец вызывает красноломкость при наличии его в сотых долях процента.

На рис. 13 приведена часть диаграммы алюминий-железо для сплавов, богатых алюминием. Железо практически нерастворимо в алюминии при эвтектической температуре 655 , поэтому даже при очень низком содержании железа,около 0,03%, образуется эвтетика Al+Al3 Fe. Она содержит

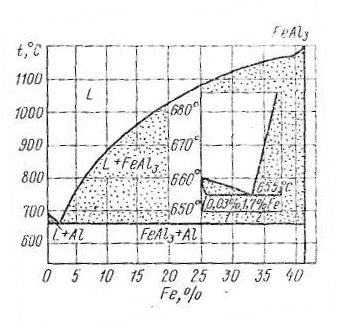
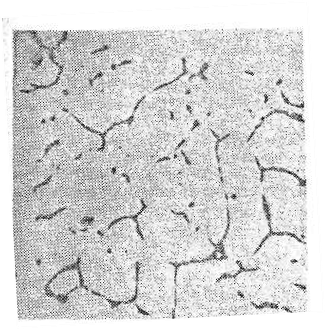
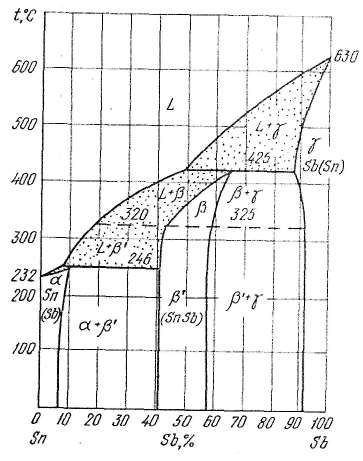
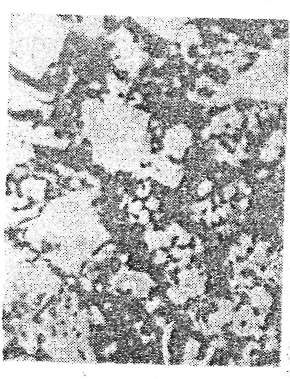
   
 а) б)

Рисунок 13. Часть диаграммы состояния сплавов Al - Fe (а) и структура литого технического алюминия (темные включения Al3 Fe ) x200 (б) .

только при 1,7% Fe (или 7% Al3 Fe). Из-за малого содержания железа в эвтектике при микроисследовании типичная структура эвтектики не наблюдается – она коалесцирует. Структура сплавов Al - Fe состоит из алюминия и темных включений Al3 Fe. Для легкоплавких подшипников применяют сплавы системы Sn –Sb (рис.14).



а) б)

Рисунок 14. Диаграмма состояния сплавов Sn –Sb (а) и микроструктура баббита Б83 x100 (б).

В системе «Sn –Sb» олово имеет низкую твердость (5 НВ). Оптимальной композицией будет сплав, состоящий из 13% Sb и 87% Sn, имеющий двухфазную структуру *+* , где - твердый раствор на базе олова (мягкая основа), *-* твердый раствор на базе интерметаллидного соединения SnSb (твердые включения). Оловянно- сурьмянные баббиты (Б83 и Б89) являются наилучшими сплавами. Оловянная основа вязкая и пластичная и менее склонна к усталостному разрушению.

Система «железо-молибден» (рис.15). Молибден имеет кубическую объемно-центрированную решетку, однако атомные размеры молибдена иные, чем у хрома и железа, поэтому молибден образует с –железом не неограниченные (как хром), а ограниченные твердые растворы.

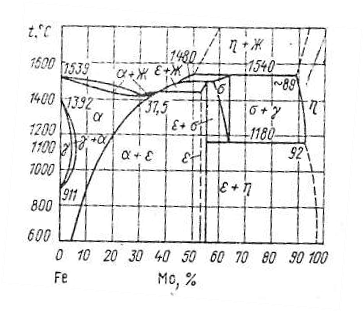
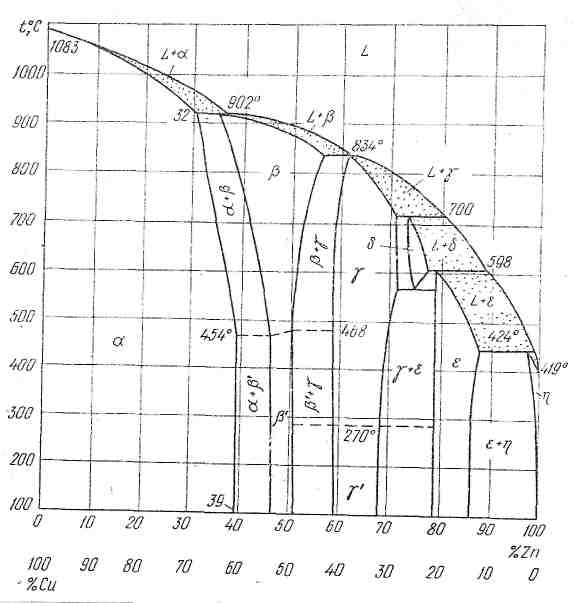
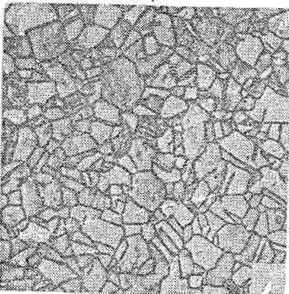
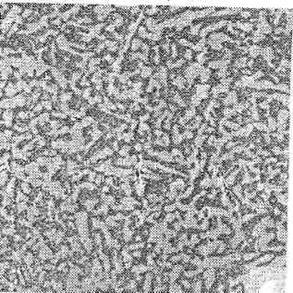


Рисунок 15. Диаграмма системы сплавов «Fe-Mo».

Растворимость молибдена в Fe*а* составляет 5% при 20 ; максимальная растворимость 26% (при 1450). Молибден повышает точку А3 и понижает А4 выклинивая полностью эту область при 3,5% Мо [2% (атом.)].

 Практическое применение имеют медные сплавы с содержанием цинка до 45%, которые называются латунями. Диаграмма состояния «Cu-Zn» показана на рис.16. Сложная, на первый взгляд, диаграмма фактически составлена из пяти простых перитектических диаграмм.

 б)

 в)

а)

Рисунок 16. диаграмма состояния » Cu-Zn» (а) и микроструктура латуни х200:; .

У сплавов меди и цинка в твердом состоянии возможно образование шести фаз. Рассмотрим их:

*-* твердый раствор цинка в меди: растворимость цинка в меди при комнатной температуре равна 39%, она не изменяется практически до 454 и убывает до 32%, при 902 .

- твердый раствор на базе соединения CuZn с электронным типом связи имеет простую кубическую объемноцентрированную решетку. Упорядоченное расположение атомов сохраняется лишь при температурах не выше 454-468. При более высокой температуре атомы меди и цинка в объемно-центрированной решетке располагаются статистически. Упорядоченный *в*- твердый раствор обозначается через *в′;* - твердый раствор на базе соединения Cu5Zn8 электронного типа () имеет сложную кубическую решетку. Температура упорядочения этой фазы равна 270.

8 – твердый раствор на базе соединения CuZn8 электронного типа () с гексагональной плотноупакованной решеткой.

- твердый раствор; природа химического соединения, лежащего в основе этого твердого раствора, не установлена.

η – твердый раствор меди в цинке. При комнатной температуре практически применяемые латуни либо состоят из одних -кристаллов, либо являются смесью (Рис. 16б и 16в).

Сера. Как и фосфор, сера попадает в металл из руд, а также из печных газов - продукта горения топлива (SO2). В основном мартеновском процессе и при выплавке стали в основной электрической печи сера удаляется из стали.

Обычно содержание серы для высококачественной стали не должно превышать 0,02-0,03%. Для стали обычного качества допускают более высокое содержание серы: 0,03-0,04%. Обработкой жидкого металла синтетическими шлаками можно уменьшить содержание серы до 0,005%. Сера нерастворима в железе (рис.17) и любое ее количество образует с железом сернистое соединение – сульфид железа FeS, который входит в состав эвтектики, образующейся при 988.

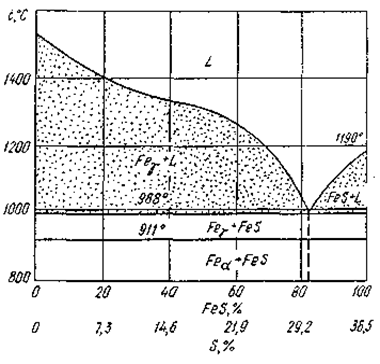


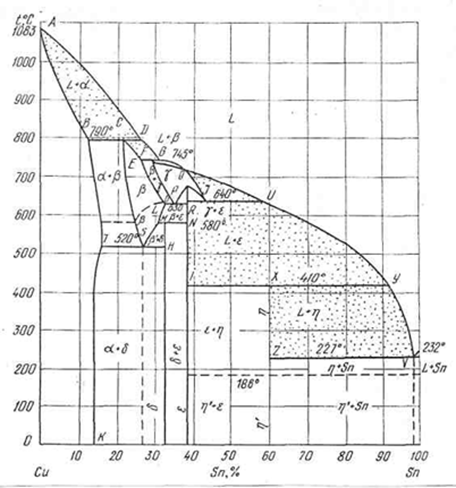
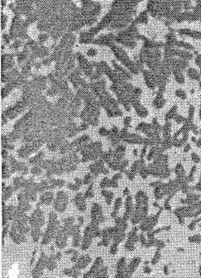
Рисунок 17. Диаграмма состояния «Fe-S».

Наличие легкоплавкой и хрупкой эвтектики, расположенной как правило, по границам зерен, делает сталь хрупкой при 800 и выше, т.е. в районе температур красного каления. Явление это носит название красноломкости.

Обычно сернистая эвтектика Fe+FeS, присутствующая в небольшом количестве, коалесцирует, т.е. феррит эвтектики объединяется с ферритом основной массы металла, а соединение FeS располагается вокруг зерен. Такая форма включений серы является особенно вредной, так как при горячей обработке давлением получаются надрывы и трещины.

При изучении строения медно-оловянистых сплавов (оловянистых бронз) следует в первую очередь обратиться к системе « Cu-Sn» (рис. 18).

Диаграмма » Cu-Sn», как и «Cu-Zn», представляет собой комбинацию нескольких перитектических диаграмм. В системе Сu-Sn в твердом состоянии возможно образование следующих фаз: α -твердый раствор олова в меди; Sn-почти чистое олово. Растворимость меди в олове, вероятно, меньше 0,01% и на диаграмме не указана; твердый раствор на базе -электронного соединения Сu6Sn. Пунктирная линия показывает процесс упорядочения; -электронное соединение Сu31Sn8; -твердый раствор на базе химического соединения меди и олова. Кристаллическая структура его подобна ; -электронное соединение Сu8Sn; -химическое соединение Сu6Sn5.

а) б) в)

Рисунок 18. Диаграмма состояния «Cu-Sn» (а) и структура литой бронзы с 6% Sn, х200; б- после отжига; в- до отжига*.*

Структура литых медно-оловянистых сплавов значительно отичается от равновесного состояния, поэтому уже в сплавах, содержащих 5% Sn и более, в литом состоянии обнаруживается -фаза в виде эвтектоидной составляющей (эвтектоид образуется при 520 °С и имеет концентрацию 26,8 % Sn).

Отожженная бронза с содержанием до 14 % Sn должна состоять по структуре из однородного - твердого раствора (рис.18,б). В литом же виде структура бронзы, содержащей до 5-6 *%* Sn, состоит из неоднородного твердого раствора *а,* имеющего, как у литого металла, дендритное строение (рис. *18 ,в).*

При содержании олова более 6 % наряду с неоднородным раствором внутри участков этого раствора, богатого оловом (светлых участков), располагается эвтектоид +.

Наличие хрупкой δ- фазы исключает возможность прокатки, поэтому, за исключением бронз, содержащих небольшое количество олова (применяемых редко), бронза, обычно содержащая более, 5-6% Sn, не прокатывается и не куется и ее применяют в литом виде.

Система «железо-никель» (рис.19). Никель имеет гранецентрированную решетку с параметром, близким к Fe. Это обеспечивает образование непрерывного ряда твердых растворов между Fe и никелем.

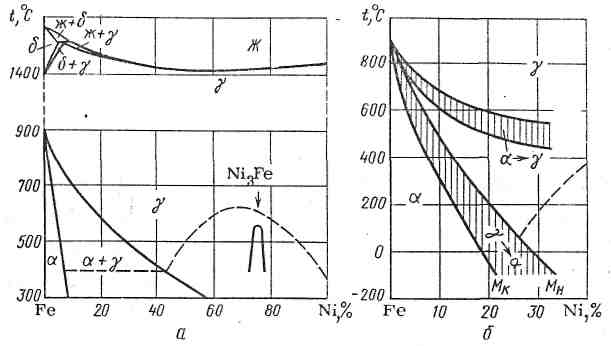


Рисунок 19.- Система сплавов «Железо – Никель».

Никель повышает точку А4 и при 1512 наступает нонвариантное равновесие . Никель понижает точку А3 и температуры превращения при нагреве и охлаждении фактически настолько сильно отличаются, что для практического использования диаграммы целесообразно указывать отдельно температурный интервал превращения при охлаждении () и при нагреве ). Поэтому, если взять, например, сплав с 20% Ni при 300-400, то при охлаждении он будет иметь практически стабильную -фазу, при нагреве при тех же температурах – практически стабильную -фазу. Поскольку никель резко понижает точку А3, то при 10% Ni и более температура превращения снижается до 500 °С и ниже. При этих температу­рах диффузия никеля сильно заторможена и обратное- превращение тоже про­исходит по мартенситному (бездиффузионному) механизму. В сплавах, богатых никелем, может образоваться упорядоченный твердый рас­твор с содержанием Ni3Fе. Температура упорядочения (точка Курнакова) для сплава с точным соотношением Ni3Fе (78% Ni) равна 503 °С.

Система «железо—марганец» (рис. 20).

Марганец имеет четыре аллотропические формы: (стабильное существование до 727°С), (727—1100 °С), (1100—1135 °С) и (1135—1245 °С). Mn имеет тетраго­нальную гранецентрированную решетку с параметрами близкими к параметру Fе. Поэтому Fе и Mn образуют непрерывный ряд твердых растворов (неограниченная растворимость). Наличие четырех модификаций у марганца приводит в Fе—Мn сплавах*,* богатых марганцем к различным фазовым превращениям; диаграмма состояния сплавов, богатых железом (Мn менее 40 %), аналогична диаграмме состояния Fе—Ni.

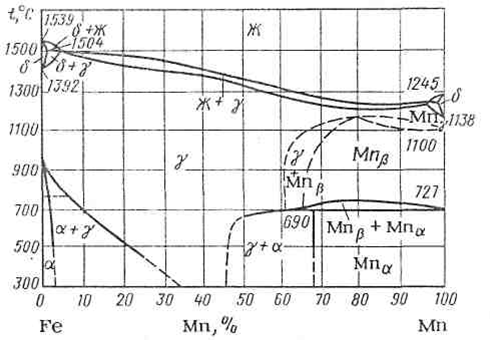


Рисунок 20. Система «Fe—Мп».

Марганец интенсивно снижает температуру превращения при 10% Мn и более начало превращения опускается до 700° и ниже. Поскольку для обычного превращения требуется диффузия обоих компонентов и так как диффузионная подвижность марганца, как и других элементов, образующих твердые растворы заме­щения мала, то ниже 700 , т. е. при содержании Мn более 10 % практически реали­зуется превращение по мартенситному типу. Метастабильная диаграмма системы Fе—Мn, т. е. когда превращения происходят по мартенситному механизму, для сплавов с 10 % Мn требуется быстрое охла­ждение. В сплавах «Fе-Мn» при определенных содержаниях марганца (12-29%) может существовать особая модификация твердого раствора, имеющая гексагональную плотноупакованную решетку (обозначаемую через ), существующую совместно с β -твердым раствором и даже с - и -твердыми растворами. В соответствии с диаграммой состояния в сплавах Fе-Мn могут иметь место такие превращения: в сплавах <12% Мn - обычное мартенситной –превращение. При нагревании- обратное превращение по мартенситной реакции. В сплавах, содержащих 12-29% Мn, превращение идет по другой мартенситной реакции (обратный переход ), причем в сплавах с 12—17% Мn -мартенсит превращается (частично) в -мартенсит при дальнейшем охлаждении.

Термической обработкой и пластической деформацией можно изменять количество , и фаз. Максимальное количество (без деформации) -фазы () образуется в чистых Fe-Mn сплавах при содержании Мn примерно 17%.

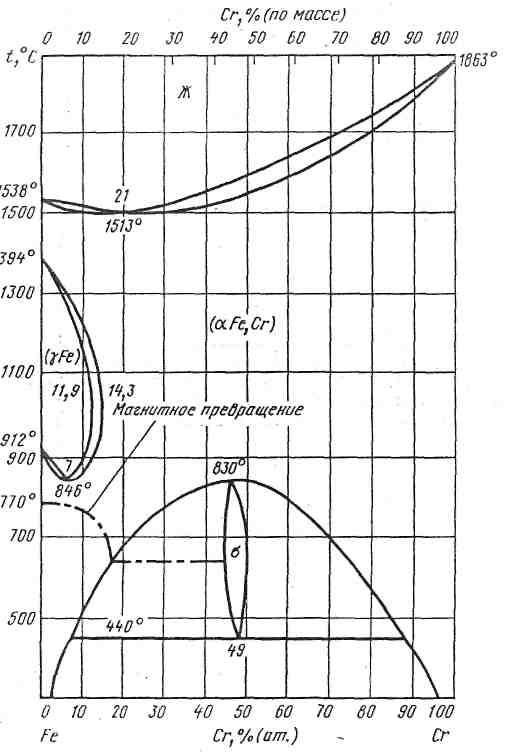
 Представленная на рис.21 диаграмма состояния «железо-хром» показывает, что Cr и Fe образуют непрерывные ряды растворов в жидком и твердом состояниях.

Рисунок 21. Система «Fe-Cr».

На линиях ликвидуса и солидуса имеется минимум при температуре 1513 и содержании около 21% Cr. В твердом состоянии в системе существуют следующие фазы: промежуточная фаза (FеСг), непрерывная область твердых растворов между Fе и Сг — (Fе, Сг) и ограниченная область твердого раствора на основе Fе. Максимальная растворимость Сг в (Fе) составляет 11,9 % (ат.). Граница двухфазной области между (Fе) и (Fе, Сг) имеет  
минимум при содержании 7% (ат.) Сг и температуре 830. Поданным различных литературных источников, точка минимума может располагаться при 7—8 *%* (ат.) Сг и 820—850 . Фаза образуется из (Fе, Сг) при содержании 48-19 % (ат.) Сг и температуре ниже 815-830°С и распадается при температуре 440-520 по эвтектоидной реакции на два твердых раствора, богатых Fе и Сг.   
Интервал гомогенности фазы *,* по данным различных исследователей, колеблется в пределах 42-51 % (ат.) Сг. Фаза имеет структуру типа(символ Пирсона *tР30,* пр.гр. *Р4.2/тпт).* Параметры решетки имеют следующие значения: *а* = 0,8794-0,881 нм, *с* = 0,4552-0,458 нм. Диаграмма состояния Сг-Fe часто используется при различных термодинамических расчетах.

Ценными механическими и технологическими свойствами обладают алюминиевые бронзы, содержащие 5…10%Al. Эти бронзы кристаллизуются в узком интервале температур (рис. 22), поэтому обладают высокой жидко-текучестью и дают концентрированную усадочную раковину.

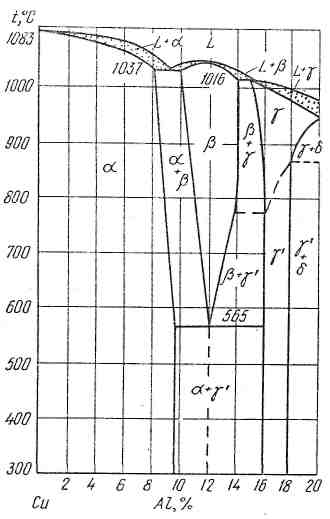


Рисунок 22. Система «Cu-Al».

Наряду с простыми алюминиевыми бронзами применяют сложные алюминиевые бронзы Состав и свойства некоторых алюминиевых бронз приведены в табл. 3.

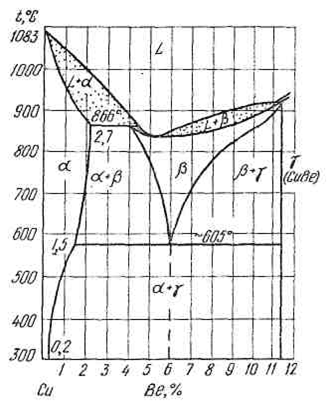
Бронзы, содержащие 10 % А1 и более, имеют в структуре эвтектоид *а+* , полученный в результате распада β -фазы.

При быстром охлаждении - фаза переохлаждается и распад ее сопровождается образованием более дисперсных частиц *а+* (т. е. эвтектоидная смесь по мере увеличения скорости охлаждения становится более дисперсной и твердой). Скорость распада твердого раствора зависит от температуры и может быть представлена С-образной кривой. Сходство термической обработки алюминиевых бронз с термической обработкой стали дополняется тем, что при охлаждении с критической скоростью -фаза превращается в игольчатую структуру. Превращение происходит по мартенситному типу.

Особый интерес представляет *бериллиевая бронза* (БрБ2 с 2 % Ве). Сплав с 2 % Ве, как видно из диаграммы рис. 23 дисперсионно- твердеющий. Рас­творимость бериллия в меди при комнат­ной температуре не превышает 0,2 %, но закалка с 800°С фиксирует пересыщен­ный раствор *.* Если закаленный сплав подвергнуть затем искусственному ста­рению при 300-350 , твердость повы­сится до 350—400 *НВ.*

Таблица 3.Химический состав и свойства бронз.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка бронзы | Содержание элементов,% | | | | Механические свойства (в отожженном состоянии) | |
| Al | Mn | Fe | Ni | 8.МПа | ,% |
| БрА7  БрАМц9-2  БрАЖН10-4-4 | 6-8  8-10  9,5-11 | -  1,5-2,5  - | -  -  3,5-5,5 | -  -  3,5-3,5 | 420  500  650 | 70  55  40 |

 Рисунок 23. Диаграмма системы сплавов «Cu-Be».

При старении бериллиевой бронзы частицы выделяющейся γ- фазы(CuВе) располагаются в матрице — пересыщенном β -твердом растворе не беспорядочно, а регулярно, образуя так называемую *модулированную* или *квазипериодическую структуру*. При образовании такой структуры частицы выделяющейся фазы размером 10нм формируют объемноцентрированную тетрагональную макрорешетку с параметрами а=20нм и с=100нм.

**1.6.Список литературы:**

1.6.1. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов/А.П. Гуляев.-М.: Металлургия,1986.- 580с.

1.6.2. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение. Учебник для вузов/ Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин.- М.: Металлургия,2000.- 390 с.

1.6.3. Арзамасов В.Б.,Волчков А.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебник для вузов/В.Б. Арзамасов, А.Н.Волчков.- М.: Академкнига, УПО, 2007.- 320с.

1.6.4. Рубанов В.В. Классификация и маркировка машиностроительных материалов. Раздел «Машиностроительные черные и цветные сплавы. Учебное пособие/ В.В. Рубанов .- Ростов н/Д, ДГТУ, 2010.-150с.

1.6.5. Марочник сталей и сплавов/ Под ред. Зубченко А.С.- М.: Машиностроение , 2003.-620с.

1.6.6. Марочник сталей и сплавов/ Под ред. Сорокина В.Г. - М.: Машиностроение,1989.-420с.

**1.7. Контрольные вопросы**

1. Что характеризует диаграмма состояния?

2. Что такое металлический сплав и псевдо-сплав?

3. Что такое фаза и система?

4. Дать характеристику сплавов:

- сплава - механическая смесь компонентов;

- сплава -химическое соединение компонентов.

5. Дать характеристику сплава – твердого раствора компонентов?

6. Что такое полиморфное превращение? Приведите примеры.

7. Что такое переохлаждение и перенагревание?

8. Чем отличается модификация Fe и Fe?

9. Условия образования ограниченного и неограниченного твердого раствора замещения?

10. Условия образования твердого раствора внедрения?

11. Что выражает закон Гиббса? Примеры.

12. Какие сплавы относятся к сплавам I типа?

13. Какие сплавы относятся к сплавам II типа?

14. Какие сплавы относятся к сплавам III типа?

15. Какие сплавы относятся к сплавам IV типа?

16. Что такое чугун и сталь?

17. Легирующие элементы в стали?

18. Примесные элементы в стали?

19. Цветные металлы. Классификация?

20. Медь и ее сплавы. Латуни?

21. Медь и ее сплавы. Бронзы?

22. Цинк и его сплавы?

**1.8. Построение и рубрикация индивидуального задания**

Структура выполненной курсовой работы должна быть следующей: титульный лист; содержание; общие положения; результаты выполненного задания; заключение; список литературы. Форма титульного листа (приложение А) является общепринятой в ДГТУ. Титульный лист заполняется шрифтом 3,5 или 5 мм по ГОСТ 2.304-81. Содержание должно включать наименование всех страниц, на которых размещается начало материала. Раздел 1 «Общие положения» является теоретической частью , позволяющий студенту получить необходимые знания для выполнения задания и защиты работы. Заключение фактически представляет выводы и предложения по работе. В список литературы включают все источники, которые следует располагать в порядке появления ссылок в тексте. При написании списка литературы и ссылок на него в тексте следует руководствоваться ГОСТ 7.1-81 и ГОСТ 7.32-91. Текст индивидуального задания должен быть оформлен в соответствии с установленными требованиями .

**1.9. Защита курсовой работы**

Защита является заключительным этапом работы студента. К защите представляется полностью выполненная и подписанная автором и руководителем курсовая работа. На защиту отводится до 20-25 минут, из них 10 минут на доклад, остальное время – для ответа на вопросы.

Студент должен научиться кратко и четко излагать свои мысли, вести деловую дискуссию. При оценке докладчика учитывается:

- полнота, качество и самостоятельность работы над рефератом;

- соответствие оформления реферата установленным правилам и требованиям;

**-** четкость доклада и ответов на вопросы.

Приложение А

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ

ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ

УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет: «Машиностроительные технологии и оборудование»

Кафедра: «Машины и автоматизация сварочных процессов»

РАСЧЕТНО - ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе на тему: «АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ»

Вариант №\_\_\_

по дисциплине « Материалы и их поведение при сварке» для подготовки

бакалавров по направлению 150301 – Машиностроение, профиль «Оборудование и технология сварочного производства»

Выполнил студент группы\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Ф.И.О

Проверил: проф., д.т.н. Полетаев Ю.В.

Ростов – на – Дону – 2020 г.