

В.К. Аркадьев

Электромагнитные процессы в металлах

Часть 1. Постоянное электрическое и магнитное поле

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
В11

В11 **В.К. Аркадьев**
Электромагнитные процессы в металлах: Часть 1. Постоянное электрическое
и магнитное поле / В.К. Аркадьев – М.: Книга по Требованию, 2015. – 230 с.

ISBN 978-5-458-57839-4

ISBN 978-5-458-57839-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2015

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2015

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

Эти явления в ферромагнитных телах трактуются при помощи введенной автором комплексной проницаемости, применение которой теперь стало общепринятым. Подробно разработанная теория поведения в магнитном и электрическом полях цилиндрических проволок и жести позволяет дать удобные для практических вычислений диаграммы.

Здесь же дается понятие об общем электромагнитном спектре вещества, в частности, о магнитных спектрах ферромагнитных металлов и тел.

Руководство не предполагает большого знакомства с векторными обозначениями и потому не может пользоваться векторным анализом со всей строгостью и последовательностью. Здесь используются векторные обозначения только там, где это удобно и может быть полезно для мало знакомых с векторным языком. В частности, в целях простоты изложение обходится без жирных и других шрифтов, что в данном случае не вызывает недоразумений. Терминология согласована со стандартами (ОСТ).

Многое другое, что является здесь новым или своеобразным, будет замечено и учтено теми, кто занимается близкими вопросами.

В. Аркадьев.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие	3
-----------------------	---

ГЛАВА I

Краткие сведения из металлографии

1. Структура металлов	9
2. Кристаллическое вещество	—
3. Строение кристаллов	10
4. Строение сплавов	11
5. Взаимоотношение компонент в сплавах	12
6. Графическое изображение состава сплавов	13
7. Диаграммы состояния сплавов	—
8. Механическая и тепловая обработки	14
9. Применение чистых металлов и сплавов в электротехнике	15

ГЛАВА II

Поле вектора плотности электрического тока

10. Ток и плотность тока	16
11. Поле плотности электрического тока	18
12. Сопротивление промежутка между двумя телами	19
13. Частичные проводимости и частичные сопротивления промежутка	22
14. Электрические изображения	23
15. Тепловые, гидродинамические и другие аналогии	25
16. Поле точечных зарядов. Закон Кулона	28
17. Емкость промежутка	31
18. Применение аналогий	33
19. Частные случаи проводников тока	—
20. Проводящий цилиндр в полупроводящей среде (линия с утечкой)	36
21. Поле плотности тока около прямой проволоки	37
22. Сопротивление проволоки соленоида	39
23. Топография электрического поля	41

ГЛАВА III

Магнитное поле тока

24. Основные магнитные явления	42
25. Магнитное поле токов	44
26. Аналогия между магнитным полем тока и полем электрического заряда	47
27. Векторный потенциал магнитного поля тока	48
28. Векторный магнитный потенциал плоского и прямого тока	49
29. Поле цилиндрического соленоида	50
30. Магнитное поле внутри проводников	52
31. Поле вне соленоида	53
32. Взаимодействие двух соленоидов	54
33. Магнитный закон Кулона	—
34. Электромагнитные единицы	55

ГЛАВА IV

Свойства металлических проводников электричества

§ 35. Закон Ома в металлах	59
§ 36. Удельная электропроводность чистых металлов	60
§ 37. Зависимость электропроводности от температуры	63
§ 38. Влияние упругих деформаций на электропроводность	65
§ 39. Электропроводность сплавов	66
§ 40. Числовые данные	69
§ 41. Теория электропроводности металлов	70

ГЛАВА V

Свойства ферромагнитных веществ

§ 42. Понятие о поляризации	71
§ 43. Намагниченность и индукция	72
§ 44. Способы измерения намагниченности тел	74
§ 45. Когда намагниченность есть функция поля?	78
§ 46. Цикл гистерезиса	80
§ 47. Магнитная аккомодация и магнитная тенденция	82
§ 48. Работа намагничивания	84
§ 49. Частные циклы. Коэффициент возврата	88
§ 50. Дифференциальная и обратимая проницаемость	91
§ 51. Ступенчатое намагничивание	93
§ 52. Влияние механических факторов на намагничивание. Магнетострикция	95
§ 53. Влияние температуры на магнитное состояние ферромагнетика	97
§ 54. Зависимость намагниченности от времени	100
§ 55. Намагничивание в слабых и сильных полях. Эмпирические формулы	101
§ 56. Эллипс и двуугольник как петля гистерезиса	105
§ 57. Магнитные кристаллы	108
§ 58. О теории ферромагнетизма	109
§ 59. Пространственные характеристики технических материалов	112

ГЛАВА VI

Теория электрической и магнитной поляризации тела

§ 60. Дополнительное поле	114
§ 61. Намагничивание вещества и тела	117
§ 62. Условия однородности поляризации в однородном поле	119
§ 63. Магнитные коэффициенты вещества и материала	—
§ 64. Магнитные коэффициенты тела и формы	120
§ 65. Постоянство проницаемости тела	123
§ 66. Намагничивание тел, обладающих гистерезисом. Остаточная намагниченность тела	124
§ 67. Поле внутри магнита	127
§ 68. Кривая намагничивания в координатах: м. д. с. — поток	129
§ 69. Общие свойства эллипсоида	130
§ 70. Коэффициенты эллипсоида	132
§ 71. Явления в телах, находящихся в электрическом поле	136
§ 72. Некоторые общие теоремы магнетостатики. Теоремы подобия	138
§ 73. Магнитные изображения	140
§ 74. Теория изображений в случае среды конечной проницаемости	143

ГЛАВА VII

Тела с неоднородной поляризацией

§ 75. Основные особенности неоднородно намагниченных тел	145
§ 76. Размагничивающий фактор неоднородно намагниченных тел. Его опытное определение	147
§ 77. Намагничивание цилиндра	148
§ 78. Размагничивающий фактор цилиндра	150

§ 79. Дроссельная проницаемость цилиндров из железных проволок	157
§ 80. Намагничивание призм, полых и коротких цилиндров. Полая сфера . . .	161
§ 81. Торонд	163
§ 82. Разрезанный торонд. Теорема Дюбуа	165
§ 83. Размагничивающий фактор подковообразного магнита	169
§ 84. Некоторые случаи неоднородного поля	170
§ 85. Намагничивание в неоднородном поле	171

ГЛАВА VIII

Механические силы, энергия и работа магнитного поля

§ 86. Пондеромоторное действие однородного поля	175
§ 87. Действие неоднородного поля на свободное тело	176
§ 88. Засасывающее действие кругового тока	177
§ 89. Работа намагничивания тела	179
§ 90. Использование магнитной энергии	180
§ 91. Энергия магнита	181
§ 92. Работа электромагнита	184
§ 93. Механическая сила, действующая на якорь	185
§ 94. Поляризованные электромагниты	189
§ 95. Топография магнитного поля	190

ГЛАВА IX

Магнетостатика кернов и постоянных магнитов

§ 96. Поведение железа в сердечниках катушек	192
§ 97. Условия максимума временной намагниченности	195
§ 98. Остаточная намагниченность магнита	200
§ 99. Производная кривая размагничивания	202
§ 100. Магнитная прочность и упругость магнита	203
§ 101. Основные задачи расчета прямых магнитов	205
§ 102. Диаграмма размагничивания. Перенос начала координат	208
§ 103. Общая диаграмма магнитов	209
§ 104. Испытание подковообразных магнитов	210
§ 105. Влияние якоря на остаточную намагниченность	212
§ 106. Вычисление магнитного проникания между полюсного пространства . . .	—
§ 107. Основные задачи расчета подковообразных магнитов	215
§ 108. Выбор арматуры магнита	217
§ 109. Устойчивость магнитов и старение их	219
Приложение. Термины, обозначения и определения в области ферромагнитных явлений	222
Алфавитный указатель	226

ГЛАВА ПЕРВАЯ

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОГРАФИИ

§ 1. Структура металлов

Для правильного понимания тех действительных условий, в которых протекают описываемые далее электрические, магнитные и электромагнитные процессы, необходимо хорошо представлять себе структуру той среды, где эти процессы происходят. Поэтому изложению теории электромагнетизма необходимо предпослать несколько кратких сведений из металлографии.

Все металлы состоят из зерен кристаллического вещества.

Для исследования атомной структуры кристаллических зерен пользуются методами рентгеновского анализа, а для исследования кристаллической структуры металлов применяют микроскоп. С этой целью на образце металла или на исследуемом изделии шлифуют небольшую поверхность, которой последующей полировкой придают зеркальный блеск. После этого поверхность („шлиф“) обрабатывают тем или иным химическим реактивом. В зависимости от ориентации осей кристаллического зерна, лежащего у поверхности шлифа, реактив на него подействует различным образом: если плоскости спайности параллельны шлифу, то они будут обработаны равномерно и останутся зеркальными, если же плоскости спайности образуют с поверхностью металла угол, то поверхность будет выедена реактивом ступенчатообразно. Под микроскопом она будет казаться матовой или черной. Таким образом получают фигуры травления, по которым можно судить о форме и величине зерен, об их однородности и числе различных компонент, образующих сплав. Фотографиями шлифов мы пользуемся при описании свойств металлов и их сплавов.

§ 2. Кристаллическое вещество

Кристаллическое вещество представляет собой твердое однородное тело, свойства которого неодинаковы по разным направлениям.

Под однородным телом мы понимаем тело, совершенно одинаковое во всех своих частях. Однако некоторые свойства такого тела в разных направлениях могут быть различны: например, теплопроводность, твердость, диэлектрический коэффициент. Это есть анизотропность кристаллического вещества, его „тензорность“. В нем мы обнаруживаем некоторые основные направления, которые называем осями.

Осями роста называются те направления, в которых происходит рост кристалла при образовании его в жидкости (в растворе или в расплавленной массе). Вначале образуются центры кристаллизации, около которых начинается выделение твердого вещества с разной скоростью по

разным направлениям. В результате тело растет, ограниченное поверхностями,двигающимися из центра наружу с определенными относительными скоростями. Эти плоскости и образуют грани кристалла, сообщающие ему форму многогранника.

Если центров кристаллизации в жидкости немного, то каждый кристалл вначале развивается самостоятельно: он растет до тех пор, пока в растворе не понизится концентрация растворенного вещества. Если же в кристалл может перейти вся жидкость, что бывает при образовании кристаллов из расплавленной массы, то рост их идет до тех пор, пока соседние кристаллы не придут в соприкосновение. Поэтому образовавшиеся при охлаждении кристаллы оказываются ограниченными поверхностями случайных очертаний.

В отличие от свободно выросших кристаллов, которые имеют поверхность вполне определенной формы, кристаллические тела, свободный рост граней которых остановлен соприкосновением с другими кристаллами, называются кристаллитами. Таковы кристаллические зерна, образующиеся при застывании расплавленного металла.

В зависимости от числа образовавшихся центров кристаллизации получается материал крупнозернистого или мелкозернистого строения.

Свойства кристаллитов, из которых состоит металл, определяют свойства последнего. В телах, состоящих из большого количества кристаллитов, различие свойств в разных направлениях исчезает, и тело получает название квазиизотропного или псевдоизотропного.

§ 3. Строеие кристаллов

С псевдоизотропными телами на практике мы чаще всего имеем дело. Для понимания поведения и свойств псевдоизотропных тел необходимо знать свойства отдельных кристаллов, из которых они состоят. Поэтому изучению свойств отдельных металлических кристаллов придают очень большое значение. В настоящее время мы умеем получать кристаллы металлов достаточно больших размеров, чтобы можно было изучать их свойства в разных направлениях и разными методами. Такие кристаллы могут иметь разную форму. Их теперь умеют получать в виде пластинок, длинного стержня (однокристалльные проволоки) или тела иной формы; например, можно приготовить однокристалльный шар диаметром в несколько сантиметров. Благодаря этому нам теперь известны характеристики многих металлических кристаллов.

Всего существует шесть кристаллических систем.

1. Кубическая система. Кристаллы могут быть отнесены к трем равным прямоугольным осям.

2. Тетрагональная система. Прямоугольные оси, из которых две равны.

3. Ромбическая система. Три неравных прямоугольных осей.

4. Гексагональная система. Три равных оси, лежащих в одной плоскости под углом 60° , четвертая ось перпендикулярна к ним.

5. Моноклиническая система. Две оси образуют косой угол, третья перпендикулярна к ним.

6. Триклиническая система. Все три оси не перпендикулярны и не равны.

Кристаллы первых четырех систем могут обладать осями симметрии второго, третьего, четвертого или шестого порядка.

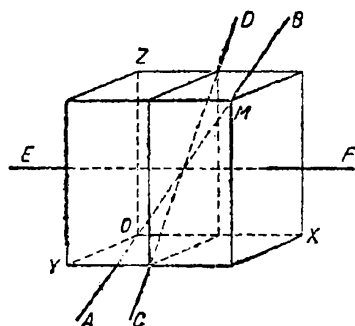
Кристаллы кубической системы обладают четырьмя осями симметрии третьего порядка. Рассмотрим куб (фиг. 1). Ось AB может быть проведена через четыре пары углов куба. При одном обороте куба около этой оси он трижды будет совпадать с самим собой. Это есть ось симметрии третьего порядка, тройная, или тригональная ось. При вращении около оси CD куб совпадает дважды с самим собой. Это ось симметрии второго порядка, двойная, или дигональная ось. При вращении куба около оси EF он совпадает с самим собой за один оборот четыре раза. Это тетрагональная ось.

Положение какой-либо линии в кристалле можно определить координатами ближайших друг к другу узлов кристаллографической решетки, через которые эта линия проходит. Для определения направления в кристалле один узел принимают за начало координат, а координаты второго узла дают в относительной мере. Часто их измеряют числом ребер элементарного параллелепипеда и обозначают в общем виде буквами h, k, l , которые называют показателями. Направление обозначается символом $[h\ k\ l]$, т. е. показателями в прямых скобках.

Так, если основным параллелепипедом является куб, то направление AB (фиг. 1) выразится символом $[111]$, так как координаты точки M суть $x=1, y=1, z=1$, направление EF — $[100]$, направление CD — $[0\bar{1}1]$ (черточка означает минус). Положение плоскостей в кристалле обозначается показателями нормали, проведенной к плоскости; показатели при этом заключают в круглые скобки. Так, грань, параллельная плоскости XY , обозначится (001) . Плоскость, параллельная треугольнику XYZ , но лежащая за началом O , изображится $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$.

В кристаллах гексагональной системы пользуются тремя горизонтальными осями X, Y и U , образующими углы в 120° , и одной вертикальной Z , перпендикулярной к ним. Вследствие этого положительные и отрицательные концы горизонтальных осей чередуются через каждые 60° . Для обозначения направлений ставят индексы в порядке X, Y, U и Z , обозначая их h, k, i и l . Например, плоскость трех горизонтальных осей выразится (0001) .

Физические свойства кристалла в направлении его осей мы будем обозначать буквой с символом, указывающим направление $[hkl]$, например, электропроводность σ по дигональной оси куба представится $\sigma_{[011]}$.



Фиг. 1. Оси симметрии куба. AB — тригональная ось, CD — дигональная ось, EF — тетрагональная ось.

§ 4. Строение сплавов

Чистый металл в твердом состоянии может состоять из кристаллов только одного рода. Он имеет вполне определенную температуру затвердевания и плавления. Наоборот, сплав, хотя бы двух металлов или металла с неметаллом, по структуре может быть значительно более сложным.

В затвердевшем сплаве мы можем обнаружить:

- 1) твердый раствор;
- 2) механическую смесь;

3) химические соединения металлов.

Твердыми растворами или смешанными кристаллами (Mischkristalle) называют кристаллы неопределенного химического состава, в которых чистые металлы образуют раствор. Некоторые сочетания металлов, как, например, медь и никель, смешиваются во всех отношениях (наподобие спирта с водой). Медь и никель и в твердом состоянии сохраняют эту способность, кристаллизуясь в виде кристаллов с произвольным содержанием меди и никеля.

При охлаждении таких сплавов начало затвердевания и конец затвердевания происходят при разных температурах.

Способностью образовывать смешанные кристаллы пользуются в металлургии, так как это дает возможность сообщить всему сплаву свойства одной из компонент, которые могут быть почему-либо желательными. Медь и 70% никеля образуют монель-металл, противостоящий коррозии и употребляемый для постройки химических заводских аппаратов. 10% примеси к железу стойкого в химическом отношении никеля дает нержавеющую сталь (марка V-2-A), так как железо с никелем здесь образует однородные смешанные кристаллы, представляющие раствор никеля в железе.

Механические смеси образуют такие сплавы, компоненты которых не обладают способностью оставаться смешанными при застывании сплава; при кристаллизации они выделяются в виде кристаллов из смеси.

Начало и конец этого процесса происходят при разных температурах. В начале процесса происходит выделение чистого металла, а остающаяся жидкость беднеет этим металлом. Это происходит до тех пор, пока каждый жидкий сплав не достигнет некоторой определенной концентрации. В этот момент жидкость затвердевает как чистый металл, т. е. началу и концу процесса соответствует одна и та же температура, которая называется эвтектической. Компоненты при этом образуют смесь чрезвычайно мелких кристалликов, которая называется эвтектикой. Эвтектическая температура — наиболее низкая для всех возможных концентраций. В эвтектике вкраплены ранее выделившиеся кристаллы одной из компонент сплава.

Если два металла, образующих сплав, способны образовать химическое соединение (примеры: Al_2Mg_3 , Fe_3C и др.), то это химическое соединение ведет себя как третья компонента сплава и, кристаллизуясь, может давать кристаллы чистого состава, соответствующего его химической формуле. Химические соединения металлов всегда очень хрупки, и поэтому в чистом виде они никогда не применяются.

В большинстве случаев на практике мы имеем сочетания этих трех основных типов сплавов, к которым еще присоединяются аллотропические превращения металлов в твердом состоянии. Пример: переход α -железа в состояние β -железа и β - в γ -железо; это происходит при температуре 768 и 898°; плавление железа наступает при 1528° C.

§ 5. Взаимоотношение компонент в сплавах

Перечислим основные типы двойных сплавов.

А. Компоненты в жидком состоянии вполне растворимы (смешиваются в любом отношении).

а) Компоненты не образуют химического соединения:

1. В твердом состоянии компоненты вполне растворимы: Ag — Au; Co — Ni; Cu — Ni; Cu — Pt; Fe — Mn; Fe — Pt и др.

2. В твердом состоянии компоненты одна в другой совершенно нерастворимы: Ag — Pb; Al — Sn и др.

3. В твердом состоянии компоненты растворимы только в некоторых отношениях: $\text{Ag} - \text{Cu}$, $\text{Co} - \text{Cu}$; $\text{Cr} - \text{Ni}$; $\text{Hg} - \text{Pb}$; $\text{Hg} - \text{Zn}$; $\text{Sn} - \text{Zn}$ и др.

б) Компоненты образуют одно или несколько химических соединений.

1. Соединения и компоненты в твердом состоянии совершенно не смешиваются: $\text{Au} - \text{Pb}$; $\text{Mg} - \text{Pb}$; $\text{Pt} - \text{Sn}$ и др.

2. Соединения и компоненты в твердом состоянии смешиваются в любом или в некотором отношении: $\text{Ag} - \text{Pt}$; $\text{Al} - \text{Cu}$; $\text{Al} - \text{Fe}$; $\text{Al} - \text{Zn}$; $\text{C} - \text{Fe}$; $\text{Co} - \text{Fe}$; $\text{Co} - \text{Zn}$; $\text{Cr} - \text{Fe}$; $\text{Cu} - \text{Sn}$; $\text{Cu} - \text{Zn}$; $\text{Fe} - \text{Ni}$; $\text{Fe} - \text{Si}$; $\text{Hg} - \text{Sn}$; $\text{Ni} - \text{Zn}$ и др.

В. Компоненты в жидком состоянии совсем не смешиваются: $\text{Ag} - \text{Co}$; $\text{Ag} - \text{Fe}$; $\text{Fe} - \text{Pb}$ и др.

С. Компоненты в жидком состоянии смешиваются только в некотором отношении: $\text{Ag} - \text{Ni}$; $\text{Cu} - \text{Fe}$; $\text{Cu} - \text{Pb}$; $\text{Fe} - \text{Sn}$; $\text{Ni} - \text{Sn}$; $\text{Pb} - \text{Zn}$ и др.

Тройные сплавы и сплавы из большего числа компонент отличаются большой сложностью.

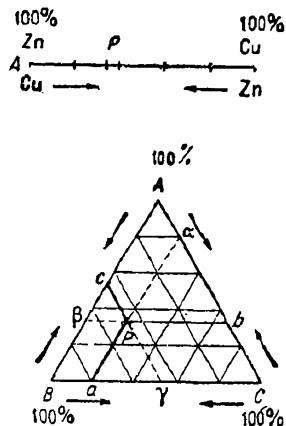
§ 6. Графическое изображение состава сплавов

Состав всякой смеси, состоящей из двух компонент, может быть представлен точкой на отрезке какой-либо прямой. Если весь отрезок представляет полное количество смеси абсолютно или в процентах, то точка делит прямую на две части, в сумме представляющие всю смесь. Координатой точки P на линии служит расстояние точки от одного конца отрезка, например AP . Пусть это есть количество меди, Cu . Расстояние от другого конца $BP = AB - AP$ определяет количество другой компоненты, например Zn ; это есть лишняя координата точки на линии, представляющая количество второй компоненты смеси.

Для графического изображения состава смеси из трех компонент отрезка линии уже недостаточно. Для этого пользуются площадью равностороннего треугольника и состав смеси представляют точкой на этой плоскости. Координатами этой точки являются две линии P_a и P_c , параллельные двум сторонам треугольника AB и AC . Линия $aP = B\beta = Cb$ показывает количество компоненты A , линия $cP = Aa = Ba$ количество C ; количество компоненты B определится отрезком $bP = Cy = Ac$, который играет роль линейной координаты.

Действительно, из свойств равностороннего треугольника вытекает, что $aP + bP + cP = AB$, откуда $bP = AB - aP - cP$.

Нанеся по направлению к A , B и C деления на сторонах BA , CB и AC , можно легко определить содержание каждой компоненты, когда дана точка, представляющая состав тройной смеси. Для этого надо отсчитать число параллелей от стороны, противоположной определяемой компоненте. Так, точка P указывает, что A входит в количестве 32% , $B - 48\%$ и $C - 20\%$.

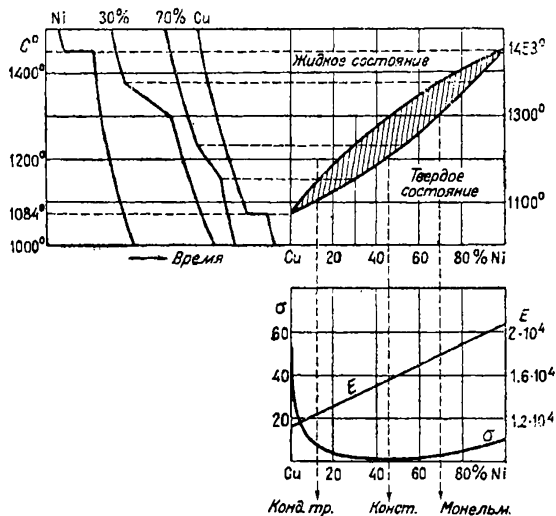


Фиг. 2. Графическое изображение состава смеси из двух и из трех компонент

§ 7. Диаграммы состояния сплавов

Чтобы составить себе полное и ясное представление о строении сплава, надо хорошо знать процессы, происходящие в сплаве или чистом металле при его затвердевании.

Это проще всего достигается путем наблюдения температуры сплава при его охлаждении до комнатной температуры. На фиг. 3 представлены отличающиеся большой простотой кривые охлаждения сплавов меди и никеля с содержанием меди 0, 30, 70 и 100%. Излом кривых охлаждения здесь является признаком начала и конца образования смешанных кристаллов (§ 4). Если составить вторую диаграмму, где абсциссами служат весовые



Фиг. 3. Диаграмма плавания, диаграмма состояния и диаграмма физических свойств сплавов меди и никеля.

упругости E и электропроводности σ . Последняя тем меньше, чем дальше от однородности состав смешанных кристаллов. При 14% Ni мы имеем сплав, применяемый для конденсаторных труб, при 45% — константан — сплав для реостатов и электрических измерительных приборов, при 70% Ni — монель-металл, отличающийся сопротивлением коррозии.

Это одна из самых простых диаграмм состояния. В металлографии их различают около восьми разных типов (пример сложной диаграммы — диаграмма сплава железа с углеродом).

§ 8. Механическая и тепловая обработки

Операции, которым подвергают металл для получения определенного материала или изделий из него, бывают двоякого рода: операции, производимые без нагрева металла — холодная обработка, и операции, производимые с нагревом, — горячая обработка. Горячая обработка бывает чисто тепловая или термическая, термохимическая и тер-