

уравнения, связывающего их, $Y=a+bx$, т. е. найти коэффициенты a и b этого уравнения.

Формулы для расчета a и b имеют вид:

$$b = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / ns_x^2 = r_{xy} s_y / s_x; \quad a = \bar{y} - b \bar{x};$$

чтобы судить о точности определения переменной y при известной переменной x , необходимо также рассчитать среднее квадратичное отклонение от прямой регрессии:

$$s_{yx} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (y_i - b - ax_i)^2 \right) / (n - 2)} \approx \sqrt{s_y^2 (1 - r_{xy}^2)}.$$

Необходимо подчеркнуть обязательность определения s_{xy} в регрессионном анализе. Так, предположив, что величина y распределена нормально вдоль прямой регрессии (что, как правило, имеет место на практике), около прямой регрессии, описываемой уравнением $Y=a+bx$, следует указать зону $Y \pm 2s_{xy}$, в которой будет лежать 95 % всех возможных значений Y .

1.2. Металлография

Металлография является методом качественного и количественного исследования структуры металлов и сплавов. Качественные методы исследования структуры позволяют **описать** тип, форму, размер и взаимное расположение обнаруженных фаз и структурных составляющих. Задача количественной металлографии состоит в изучении характеристик пространственного строения структуры путем **измерения численных параметров** микроскопического изображения.

Основные операции количественной металлографии – подсчет, измерение и классификация элементов, находящихся в поле зрения. Результатом могут быть, в частности, количественные параметры зерна или объемные доли различных фаз в структуре сплава.

Для выполнения металлографических исследований необходимы специально подготовленные образцы – металлографические шлифы. Исследования этих образцов проводятся с помощью микроскопов, работающих в отраженном свете.

Изготовление образцов для оптической микроскопии включает следующие операции: вырезка образца, шлифование, полирование, травление (при необходимости). Место вырезки выбирают так, чтобы образец был типичен для данной детали. При неоднородной структуре образцы вырезают из каждой характерной зоны.

Образцы для оптической микроскопии вырезают на специальных отрезных станках алмазными и эльборовыми кругами. Для резки твердых материалов рекомендуется использовать более мягкие отрезные круги, а для пластичного основного металла отрезные круги должны быть твердые. При вырезке образцов из деталей с покрытием всегда следят за тем, чтобы режущий инструмент двигался от покрытия к основному металлу. В противном случае вероятность отслоения покрытия увеличивается из-за возникновения растягивающих напряжений при выходе инструмента к поверхности. Чтобы избежать искажений структурного состояния образца в процессе вырезки, стараются избежать нагрева образцов до высоких температур (с помощью применения охлаждающей жидкости).

Быстро и качественно пробы можно вырезать абразивно-проволочной пилой или электроискровым способом. В первом случае в зону трения металлической проволоки и исследуемого материала непрерывно подается абразивная суспензия. Во втором случае между медным электродом и материалом создается электроискровой разряд, разрушающий металл. Оба способа обеспечивают хорошую чистоту поверхности и не искажают исходную структуру.

Для предотвращения «завала» кромок и увеличения опорной поверхности поперечного шлифа рекомендуется заливать образцы легкоплавкими сплавами. Например, сплав Вуда (Bi, Pb, Sn, Cd) имеет температуру плавления $T_{пл}=100^{\circ}\text{C}$,

при добавке кадмия $T_{пл}$ снижается до 68 °С. Можно также использовать эпоксидные смолы, органическое стекло, полистирол. Образцы перед заливкой устанавливают в цилиндрических оправках высотой 10–20 мм и диаметром 20–30 мм.

Изготовление шлифа начинают с выравнивания поверхности образца на шлифовальном станке. Затем поверхность обрабатывают вручную на плоском стекле, покрытом абразивной шкуркой, либо на вращающемся диске с приклеенной к нему шкуркой. Образец шлифуют, последовательно переходя от грубой шкурки к более мелкой с увеличением дисперсности абразивных частиц от 160 – 120 до 20 – 14 мкм. Во время шлифования каждой шкуркой целесообразно сохранять одно и то же положение образца, контролируя параллельность рисок.

Чрезмерное давление на образец при шлифовании сопровождается нежелательным выделением тепла, преждевременным износом абразивных кругов, выкрашиванием дисперсных частиц из образца, появлением прижогов. При смене шкурки необходимо тщательно очищать образец от частичек абразива, промывая его водой и обдувая теплым воздухом. При переходе на другую шкурку шлиф следует поворачивать на 90°, а также проверять, все ли риски, нанесенные при обработке предыдущей шкуркой, устранены.

Риски, оставшиеся от шлифования на последней шкурке, устраняют полированием. Используют вращающийся металлический диск с натянутой или приклеенной тканью. Суспензию дисперсных частиц оксида хрома в воде подают в зону контакта поверхности образца и ткани. Хорошее качество образцов получается при использовании пасты ГОИ, в состав которой входят оксид хрома, стеарин, керосин, олеиновая кислота и сода. Существует также широкий набор паст на основе порошков из синтетического алмаза и эльбора с различной зернистостью. Полирование считается удовлетворительным, если при 300-кратном увеличении не видны риски.

Возможна полировка металлических образцов в электролитической ванне. Но при этом надо иметь в виду, что можно столкнуться с разной скоростью анодного растворения фазовых составляющих образца. Кроме того, отрицательное влияние на качество шлифа могут оказать краевые эффекты и преимущественное травление вокруг пор.

Максимальное увеличение оптических приборов не превышает обычно 1500. В отдельных случаях при использовании ультрафиолетовых лучей или в иммерсионном режиме рабочее увеличение достигает 1700. В оптических микроскопах невозможно исследовать образцы с глубоким рельефом.

в иммерсионном режиме рабочее увеличение достигает 1700. В оптических микроскопах невозможно исследовать образцы с глубоким рельефом.

1.2.1. Систематизация структуры с геометрической точки зрения

Структура металлов проявляется в многообразных формах. Для количественного металлографического исследования целесообразно свести это необозримое многообразие к малому количеству геометрических основных типов, так как для каждого типа независимо от специфических признаков структуры и вида наблюдаемых структурных составляющих можно определить характерные параметры структуры и для их анализа всегда использовать одни и те же принципы измерения и обработки данных. С.А. Салтыков выделил следующие основные геометрические типы структуры:

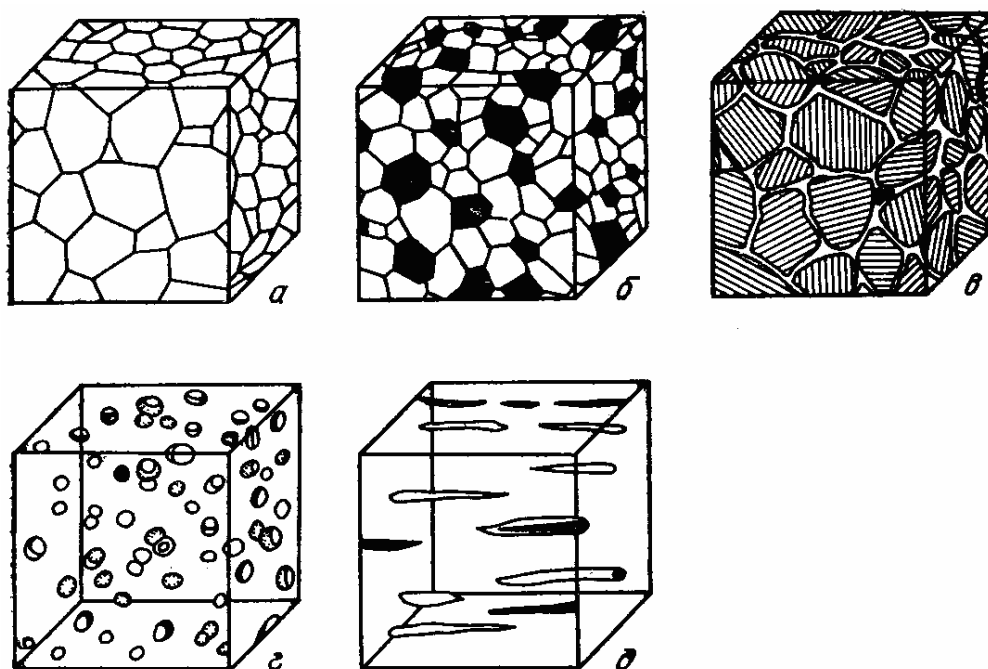


Рис. 1.3. Схематическое объемное изображение структур:
а – однофазно-полиэдрическая, *б* – многофазно-полиэдрическая,
в – сетчатая, *г* – матричная, *д* – ориентированная

Однофазно-полиэдрическая структура (рис. 1.3,*а*)

Структура состоит из примерно равноосных кристаллов одной и той же фазы. В ней наблюдаются только поверхности раздела равнозначных структурных составляющих. *Примеры:* чистые металлы; твердые растворы, например: α -латунь, сплавы никеля с медью, аустенитная сталь.

Многофазно-полиэдрическая структура (рис. 1.3,*б*)

Структура состоит из приблизительно равноосных кристаллов двух и более фаз или структурных составляющих. Поверхности раздела проходят между фазами одного типа и фазами разных типов. *Примеры:* феррито-перлитная структура сталей, латунь со структурой α - и β -твердого раствора, феррито-аустенитная сталь.

Сетчатая структура (рис. 1.3,*в*)

Одна фаза образует более или менее сплошную сетку вокруг кристаллитов второй фазы или второй структурной составляющей. В предельном случае сплошной сетки существуют поверхности раздела только

между структурными составляющими разных типов. *Примеры:* сетка вторичного цементита в стали, тройная фосфидная эвтектика в сером чугуна, α -феррит в аустенитной стали.

Матричная структура (рис. 1.3,з)

Одна фаза образует основу (матрицу) структуры, в которой располагаются частицы одной или нескольких других фаз. *Примеры:* структуры, возникающие в результате процессов выделения, в частности в сплавах меди с алюминием или меди с хромом; в никелевых жаропрочных сплавах, структура неполного отжига стали, эвтектическая и эвтектоидная структуры, выделения карбидов в высоколегированных сталях.

Ориентированная структура (рис. 1.3,д)

Примеры: вытянутые зерна катаных или тянутых металлов и сплавов.

1.2.2. Основные методы количественной металлографии

1. Анализ по площадям. Этот метод позволяет определить объемную долю отдельных фаз в структуре сплава и распределение микрочастиц различных фаз по размерам.

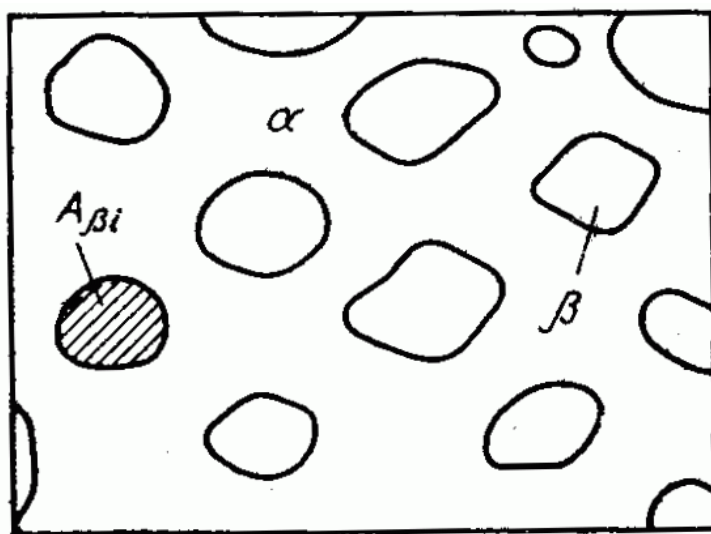


Рис. 1.4. Планиметрирование сечений элементов структуры при проведении анализа по площадям.