Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

### **Донской государственный технический университет**

Кафедра " **Материаловедение и технологии металлов** "

**Ю.М. Домбровский**

# **СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

# **Учебное пособие**

**для студентов 3-го курса очной и заочной формы образования**

**направления 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»**

**профиль подготовки «Материаловедение и технологии материалов в**

**приборостроении и медицинской технике»**

**Ростов-на-Дону, 2023**

ВВЕДЕНИЕ

С развитием техники условия, при которых эксплуатиру­ются металлические детали и изделия, непрерывно усложняются и становятся все более тяжелыми, к ме­таллам предъявляются все новые требования. В этих условиях металлы должны обладать определенными сложными комплексами свойств — механических, физи­ко-химических, технологических.

Свойства любого спла­ва определяются его внутренней конструкцией, т. е. структурой или строением точно так же, как свойства любого предмета, будь то швейная игла, станок, телеви­зор или космический корабль, определяются его конст­рукцией. Структура, в свою очередь зависит от химиче­ского состава сплава, технологии его получения и последующей обработки посредством механических, тер­мических, химических, физических и др., в том числе комбинированных воздействий.

Из вышесказанного следует, что при разработке но­вых металлических материалов важнейшая роль принад­лежит структуре, в частности микроскопической, и, следовательно, методам ее наблюдения и оценки. Суще­ствуют три способа оценки микроструктуры: качествен­но-описательная, полуколичественная (балловая оценка по сравнению со структурами стандартных шкал) и строго количественная оценка геометрическими пара­метрами микроскопического строения. Первые два спо­соба оценки имеют субъективный характер и результаты оценки разных наблюдателей часто очень расходятся.

На современном этапе развития науки о металлах наиболее рациональной и эффективной является строго количественная, объективная оценка микроструктуры геометрическими параметрами ее действительного про­странственного (трехмерного) строения.

К свойствам сплавов, как правило, предъявляются количественные требования, оговоренные в стандартах или технических условиях. Поскольку эти свойства определяются структурой, очевидно, что и к ней должны быть предъявлены соответствующие количественные нормы в отношении тех параметров структуры, которые обеспечивают нужные свойства.

Двухмерная или плоскостная структура, видимая в микроскоп, образуется при пересечении действительной трехмерной или пространственной структуры плоскостью шлифа и вне этой плоскости не существует. Количественная оценка микроструктуры параметра­ми ее двумерного сечения почти, как правило, приводит к неправильному представлению об ее пространственном строении. При пересечении трехмерной структуры пло­скостью шлифа вероятность пересечения крупных и мел­ких частиц (зерен) различна: чем крупнее зерно, тем вероятнее, что его пересечет плоскость шлифа. Поэтому число крупных зерен на шлифе относительно больше, чем в действительной трехмерной структуре. Плоскость шлифа пересекает пространственные зерна не по центру, а случайно — на большем или меньшем от него расстоя­нии. В связи с этим средняя величина плоского зерна на шлифе создает ложное представление об истинных раз­мерах пространственных зерен.

Приведенные примеры убедительно показывают, что вторым важнейшим принципом рациональной оценки микроструктуры должен быть выбор геометрических па­раметров пространственного микроскопического строе­ния в качестве критериев оценки.

Эти два принципа — объективный, строго количест­венный характер оценки микроструктуры и параметры реальной пространственной микроструктуры в качестве объекта оценки — являются основой стереометрической металлографии, раздела науки о металлах.

Источником информации о параметрах пространствен­ного строения обычно служат параметры двумерной структуры, измеряемые на плоскости шлифа, количест­венно взаимосвязанные с пространственными парамет­рами. Установление этих связей - одна из основных задач стереометрической металлографии

Таким образом, стереометрическая металлография, как новый раздел металлографии, представляет собой систему методов микроскопического анализа, позволяющих по количественным измерениям на плоскостной (двухмерной) структуре рассчитать гео­метрические параметры действительной пространствен­ной микроструктуры металлов и сплавов.

**I. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МИКРОАНАЛИЗА**

1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ

Все методы стереомет­рической металлографии и стереологии являются стати­стическими. Рассмотрим вкратце основные положения математической статистики применительно к нашим за­дачам.

Предположим, что необходимо определить по шлифу некоторый параметр структуры (например, диаметр се­чений сферических микрочастиц), истинная средняя ве­личина которого для данного объекта равна ***а***. Фактиче­ские значения этого параметра на шлифе изменяются в более или менее широких пределах и поэтому, измерив ***х*** элементов структуры, мы получим ***х*** разных значений параметра: ***a1, а2, ..., ах***. Этот набор случайно взятых и измеренных ***х*** элементов структуры называют в стати­стике выборкой, а число ***х*** — объемом выборки.

Нужно подчеркнуть, что измеряемые элементы струк­туры следует брать случайно, без какого-либо предпоч­тения по отношению к той или другой их категории, без отбрасывания тех значений, которые даже весьма суще­ственно отклоняются от подавляющего большинства измеренных величин.

Основной показатель, характеризующий величину или количество данного параметра структуры, — его средняя арифметическая, которую определяют по фор­муле

 (***а 1 + а 2 +…+ а*** х) (1)

Но средняя арифметическая не дает полной характе­ристики анализируемого параметра, поскольку она не оценивает степень его однородности. Поэтому вторым важным показателем, дополняющим среднюю арифметическую и характеризующим однород­ность измеряемого параметра по величине (или количе­ству), является его среднее квадратичное отклонение **σ**(***а***), которое рассчитывают по тем же исходным дан­ным, по которым рассчитывают среднюю арифметиче­скую величину параметра:

 (2)

Поправочный коэффициент **K** зависит от объема вы­борки, т. е. от числа выполненных независимых измере­ний (или подсчетов) **х**:

 (3)

Значения **K** для разных чисел независимых измере­ний **х** приведены в табл. 1. В тех случаях, когда объем выборки достаточно велик, поправкой можно пренебречь, принимая K=1.

Для оценки степени однородности данного параметра структуры пользуются также его дисперсией D(a), рав­ной квадрату среднего квадратичного отклонения:

 (4)

Таблица 1 - Коэффициент **К** формулы (2) в зависимости от числа

независимых измерений

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| х | К | х | К | х | К |
| 5 | 1,118 | 14 | 1,038 | 40 | 1,013 |
| 6 | 1,195 | 16 | 1,033 | 45 | 1,01l |
| 7 | 1,080 | 18 | 1,029 | 50 | 1,010 |
| 8 | 1,069 | 20 | 1,026 | 100 | 1,005 |
| 9 | 1,061 | 25 | 1,021 | 150 | 1,003 |
| 10 | 1,054 | 30 | 1,017 | 200 | 1,002 |
| 12 | 1,045 | 35 | 1,014 | 500 | 1,001 |

Для той же цели часто пользуются величиной отно­шения среднего квадратичного отклонения к средней арифметической, называемой коэффициентом вариации (или изменчивости):

 (5)

Как среднее арифметическое, так и среднее квадра­тичное отклонения имеют одну и ту же размерность. Поэтому коэффициент ва­риации, являясь безмерной величиной, более удобен для оценки однородности данного параметра структуры, чем среднее квадратичное отклонение или дисперсия.

Параметры микроструктуры выражаются либо неко­торой величиной (диаметр зерна, площадь сечения зерна и т.п.), либо числом (число зерен в единице объема и т. п.). Наиболее полное представление о каком-либо параметре структуры дает кривая частот или плотности распределения величин или чисел, характеризующих этот параметр. Для получения кривой частот все изме­ренные величины данного параметра (представляющие выборку) подразделяют на ряд групп или интервалов и подсчитывают число случаев попадания измеренных параметров в каждую из этих размерных групп. Числа эти могут быть выражены в процентах от общего числа измеренных параметров.

Формы распределений многочисленны, но в металли­ческих структурах важнейшее место занимает закон или плотность нормального распределения или распределе­ния Гаусса, которое выражается формулой:

 , (6)

где ***a*** — измеренная величина параметра;  - средняя арифметическая величина параметра; **σ** - среднее квадратичное отклонение параметра, т. е. ***σ(а***).

Чтобы проверить соответствие экспериментально по­лученного распределения закону нормального распреде­ления, следует построить выпрямленную кривую частот, т. е. построить распределение в таких координатах, в ко­торых плотность нормального распределения (6) выра­жается прямой линией.

2. ТОЧНОСТЬ (ПОГРЕШНОСТЬ) СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ

При всех количественных оценках параметров струк­туры весьма важно знать возможную погрешность полу­ченной оценки, или же заранее найти условия микроана­лиза, обеспечивающие получение результата анализа с определенной, заранее оговоренной погрешностью.

Разница между истинной средней величиной опреде­ляемого параметра структуры и найденной из опыта средней арифметической выборки **** составляет абсолютную статистическую ошибку **ε** определения (при данном объеме выборки, составляющем **х** измерений):

 (7)

Поскольку истинная средняя величина параметра ***а*** нам неизвестна, определить ошибку по формуле (7) не­возможно. Но ее можно рассчитать по формуле:

 (8)

где  — среднее квадратичное отклонение средней

арифметической выборки (выборочной сред­ней) ;

**t** — нормированное отклонение.

Рассмотрим величины, входящие в формулу (8), и способы их определения. Среднее квадратичное отклоне­ние выборочной средней  можно определить экспе­риментально по результатам нескольких повторных вы­борок, каждая из которых содержит **х** измерений. На том же шлифе в нескольких полях зрения проводим z выбо­рок, по **х** измерений в каждой выборке, и определяем для каждой выборки среднюю арифметическую величину из­меряемого параметра структуры (выборочную среднюю) по формуле (1). Полученные значения средних арифме­тических величин  будут вообще говоря, не­сколько отличаться друг от друга и от истинной средней величины определяемого параметра ***а***. Полученные зна­чения выборочных средних подставляем в формулу (2) вместо величин ***a1, a2, …ax***, а вместо **х** подставляем в формулы (2) и (3) число независимых выборок ***z***:

 (9)

где — средняя арифметическая всех выборочных cредних.

Полученная таким путем по формуле (9) величина и является средним квадратичным отклонением выбороч­ной средней, которое входит в формулу (8) для расчета абсолютной статистической ошибки определения.

Выполнение ряда повторных выборок занимает мно­го времени и труда. Поэтому обычно используют то об­стоятельство, что величина среднего квадратичного от­клонения выборочной средней ***)*** обратно пропорцио­нальна корню квадратному из числа выполненных неза­висимых измерений или подсчетов **х**. Из этого соотношения следует, что благодаря - увеличению объема выборки **х** ошибка может быть до­ведена до сколь угодно малой величины.

Вторая входящая в формулу (8) величина — норми­рованное отклонение **t**,— которое связано с доверитель­ной вероятностью **Р** полученного результата анализа (или ошибки) следующей зависимостью:

 (10)

Интеграл (I0) не берется в элементарных функциях, поэтому в табл. 2 приводятся величины вероятности **Р** для разных значений нормированного отклонения **t**. Из формулы (8) следует, что при известном значении среднего квадратичного отклонения выборочной средней , зависящей от характера структуры, определяемого параметра и условий анализа (числа независимых изме­рений), абсолютная ошибка может быть различной в за­висимости от той доверительной вероятности **Р**, которую мы устанавливаем, выбирая определенное значение нормированного отклонения **t**. Если мы приняли **t** равным единице, вероятность **Р** равна 0,6826 (см. табл. 2).

# Таблица 2 – Доверительная вероятность **Р** для различных значений нормированного отклонения **t**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t** | **Р** | **t** | **Р** | **t** | **Р** |
| 0,10 | 0,0796 | 1,40 | 0,8384 | 0,6745 | 0,50 |
| 0,20 | 0,1586 | 1,50 | 0,8664 | 0,8416 | 0,60 |
| 0,30 | 0,2358 | 1,60 | 0,8904 | 1,0364 | 0,70 |
| 0,40 | 0,3108 | 1,70 | 0,9108 | 1,2816 | 0,80 |
| 0,50 | 0,3830 | 1,80 | 0,9282 | 1,6449 | 0,90 |
| 0,60 | 0,4514 | 1,90 | 0,9426 | 1,9600 | 0,95 |
| 0,70 | 0,5160 | 2,00 | 0,9544 | 2,3263 | 0,98 |
| 0,80 | 0,5762 | 2,20 | 0,9722 | 2,5758 | 0,99 |
| 0,90 | 0,6318 | 2,40 | 0,9832 | 3,0902 | 0,998 |
| 1,00 | 0,6826 | 2,60 | 0,9906 |  |  |
| 1,10 | 0,7286 | 2,80 | 0,9948 |  |  |
| 1,20 | 0,7698 | 3,00 | 0,9973 |  |  |
| 1,30 | 0,8064 | 4,00 | 0,99994 |  |  |

При выполнении единичного анализа рассчитывают абсолютную ошибку **ε** для требуемой доверительной ве­роятности **Р** и тогда говорят, что этот анализ, выполнен­ный с доверительной вероятностью **Р**, характеризуется погрешностью, равной **ε.** Обычно принято оценивать ошибку статистического определения для 50%-ной дове­рительной вероятности (**Р**=0,50), которая называется вероятной ошибкой. Если доверительная вероятность приводимой ошибки не указана, имеется в виду вероят­ная ошибка.

В отдельных случаях требуется более достоверное оп­ределение с доверительной вероятностью до 0,90 или да­же 0,95

Как сказано выше, среднее квадратичное отклонение выборочной средней обратно пропорционально кор­ню квадратному из числа выполненных независимых измерений **х**. Поэтому можно преобразовать формулу (8), придав ей следующий вид:

 (11)

где **х**—число выполненных независимых измерений;

**t** — нормированное отклонение;

**А** — коэффициент пропорциональности.

Коэффициент **А** зависит от характера структуры, оп­ределяемого параметра и методики анализа. В дальней­шем будут приведены значения этого коэффициента для конкретных структур и методов стереометрического мик­роанализа. Из формулы (11) следует, что при вычисле­нии абсолютной ошибки анализа **ε** можно обойтись без повторных выборок, имеющих целью определение сред­него квадратичного отклонения выборочной средней по формуле (9). Уже само число выполненных при анализе независимых измерений или подсчетов **х** позво­ляет оценить абсолютную ошибку выполненного анализа.

II. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

3. ОДНОФАЗНАЯ ПОЛИЭДРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

С точки зрения геометрии пространственной микрострук­туры любой металлический сплав или композицию можно рассматривать как конгломерат, состоящий из множества микроскопических тел (кристаллитов), заполняющих определенный участок пространства и прочно связанных друг с другом по контактным поверхностям.

В стереометрической металлографии каждая микроча­стица рассматривается как геометрическое тело микро­скопического масштаба. Как и всякое геометрическое те­ло, микрочастица обладает вполне определенной формой и геометрическими параметрами - линейными размера­ми, площадью поверхности, объемом и т. д.

Для количественной оценки самих микрочастиц и структуры в целом, как их совокупности, правильно воспользоваться именно этими геометрическими параметрами. Однако поскольку в объ­еме анализируемого металла едва ли найдутся хотя бы две микрочастицы, тождественные по форме и размерам, речь может идти только об использовании статистически средних величин этих геометрических пара­метров или об их суммарном значении, отнесенном к еди­нице объема анализируемой структуры.

Другой категорией структурных элементов любого сплава являются граничные зоны, которые не существу­ют сами по себе, но образуются в результате взаимного контакта микрочастиц друг с другом. Эти граничные зо­ны характеризуются сильными нарушениями порядка расположения атомов и относительно большими расстоя­ниями между ними. Граничные зоны обладают повышенной свободной энергией и играют весьма важную роль в процессах превращений и определении свойств сплава.

Выбирая геометрические параметры пространственно­го микростроения сплава, которыми целесообразно количественно оценивать пространственную структуру, следует исходить из той значимости, которую имеют ха­рактеризуемые этими параметрами элементы структуры в процессах превращений в сплаве, их связь со свойства­ми сплава и с различными переменными факторами внешних воздействий на сплав.

Рассмотрим процесс образования простейшей одно­фазной полиэдрической структуры и ее последующие из­менения, обусловленные внешними воздействиями.

В непрерывной полиэдрической структуре в верши­нах полиэдров всегда сходятся четыре линии ребер. Эти точки являются общими вершинами четы­рех телесных углов, которые в среднем равны **π** стера­диан. Поскольку это действительно для всех точек вер­шин полиэдрической структуры, средняя величина телес­ных углов при вершинах полиэдров составляет **π** стерадиан и для всей полиэдрической структуры.

В точке вершин сходятся шесть граней полиэдров, об­разуемых каждой парой ребер. Поэтому точка вершины является общей вершиной шести плоских углов граней полиэдров. Величины этих углов могут быть раз­личными, но их среднюю величину не трудно рассчитать: она равна 109,47° или 109°28′16′′.

Полиэдрическая структура в целом получается при кристаллизации микрочастиц из многих центров крис­таллизации случайно, но статистически равномерно рас­пределенных в объеме исходной фазы, если микрочасти­цы растут до заполнения всего рассматриваемого объе­ма, т. е. до исчезновения жидкой фазы.

Рассмотрим извлеченный из непрерывной полиэдри­ческой микроструктуры изолированный многогранник, соответствующий средней форме полиэдров такой струк­туры. В каждой его вершине сходятся три ребра и три грани, образующие телесный угол, равный **π** стерадиан, двугранные углы между гранями равны 120°, а плоские углы при вершинах граней 109,47°. Такой средний мно­гогранник называют идеальным полиэдром. Приведен­ные выше показатели и известные геометрические со­отношения позволяют рассчитать другие параметры идеального полиэдра: число вершин идеального полиэдра В = 22,795, число его ребер Р=34,192 и число граней полиэдра Г= 13,397.

Следовательно, идеальный полиэдр является мнимым, поскольку в любом реальном многограннике числа вер­шин, ребер и граней должны быть целыми. Из заполня­ющих пространство многогранников к идеальному поли­эдру наиболее близок кубооктаэдр, который обычно и рассматривают как модель идеального зерна или ячей­ки полиэдрической структуры (рис. 1, а).

Более соответствует иде­альному полиэдру тетракаиэдрон Р. Вильямса (см. рис. 1,б), получаемый преобразованием кубооктаэдра. Он может заполнять пространство, совпадает с кубооктаэдром по всем показателям, но имеет 2 квадратные, 8 пятиугольных и 4 шестиугольные грани.

Как в процессе кристаллизации, так и после нее — в условиях, обеспечивающих достаточную подвижность атомов, в поликристаллической однофазной структуре самопроизвольно протекают процессы, вызванные стрем­лением к минимуму свободной энергии. Обусловленные этими процессами изменения структуры сводятся к уменьшению кривизны граничных поверхностей и линий ребер, выравниванию телесных и двугранных углов и др.

В результате описанных процессов исчезают поли­эдры с малым числом граней и вершин, обладающие малыми двугранными и телесными углами — тетраэдры, пентаэдры, гексаэдры и т.п., термодинамически неус­тойчивые в окружении полиэдров с большим числом граней и вершин. Увеличиваются средние числа граней и вершин, приходящиеся на один полиэдр, и среднее число вершин, приходящихся на одну грань, в большей или меньшей степени приближаясь к этим показателям для идеального полиэдра. Уменьшается общий объем пограничных зон—носителей повышенной энергии: площадь граничных поверхностей, длина линий ребер и число вершин полиэдров в единице объема полиэдри­ческой структуры. Совокупность этих изменений обычно называют ростом зерна.

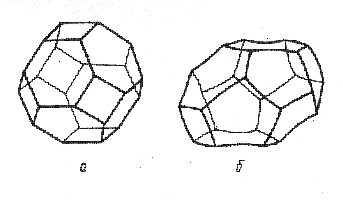


Рис. 1

Кубический октаэдр ( *а* ) и тетракаиэдрон Р. Вильямса(*б*)

В условиях идеального равновесия всех элементов полиэдрической структуры грани должны быть плоски­ми, ребра — прямыми линиями, все двугранные углы должны быть равны 120°, все телесные углы π стерадиан и, следовательно, каждый полиэдр должен иметь 22,795 вершины, 34,192 ребра и 13,397 граней, причем каждая грань должна быть 5,104-угольннком с углами при вер­шинах, равными 109,47°. Поскольку такие многогранни­ки реально не существуют, идеальное равновесие поли­эдрической структуры недостижимо. При собирательной рекристаллизации, даже при самых длительных выдержках, может быть достигнуто только относительное рав­новесие между элементами полиэдрической однофаз­ной структуры.

Показателями достигнутой степени равновесия полиэдрической структуры и ее термодинамической устой­чивости служат геометрические параметры, характери­зующие форму полиэдров: средние числа вершин, ребер и граней, приходящихся на один полиэдр, средняя кри­визна граничных поверхностей. Важным показателем является однородность величин двугранных углов, кото­рая выражается коэффициентом вариации, средним квадратичным отклонением (в градусах, радианах) или дисперсией, величины двугранных углов. Все эти три величины по мере достижения идеального равновесия стремятся к нулю.

Дисперсность полиэдрической структуры можно оце­нивать различными параметрами. Одним из них являет­ся число микрочастиц в единице объема полиэдрической структуры (мм -3). Обратная величина этого числа опре­деляет средний объем одной микрочастицы (мм3 ). Наиболее полная харак­теристика размеров микрочастиц дается функцией рас­пределения их диаметров по размерам. Универсальным параметром характеризующим дисперсность, служит суммарная поверхность граней полиэдров в единице объема структуры, называемая удельной поверхностью (мм²/мм³)

В переходных межкристаллитных зонах (границах зерен) порядок расположения атомов настолько нарушен, что их мож­но рассматривать в виде тонких пограничных зон между кристаллическими решетками смежных микрочастиц. Уровень свободной энергии пограничных зон намно­го выше, чем внутри микрочастиц, эти зоны являются местами средоточия вакансий, растворенных и примес­ных атомов. Предпочтительная диффузия атомов проис­ходит на пограничных зонах, здесь в основном сосредо­точена деформация в результате вязкого течения и здесь же происходит зарождение центров кристаллизации при превращениях в твердом состоянии.

Благодаря скоплению примесных атомов в погранич­ных зонах их химический состав существенно отлича­ется от состава внутри микрочастиц. Это обусловливает более низкую коррозионную стойкость межкристаллит­ных зон, первоочередное плавление металла в этих зо­нах и т. п. При сдвиговой деформации граничные по­верхности препятствуют движению дислокаций и бло­кируют скольжение по атомным плоскостям, повышая напряжение, необходимое для продолжения деформа­ции и, следовательно, упрочняя металл. Эти и другие факторы показывают, что границы зерен в металлах имеют первостепенное теоретическое и практическое значение, оказывая влияние на свойства и поведение металла при различных внешних воздействиях на него— механических, термических, химических, физических и др.

Естественной количественной оценкой пограничных зон полиэдрической структуры является их протяжен­ность, отнесенная к единице объема металла: суммарная площадь граничных поверхностей или удельная повер­хность (мм2/мм3), суммарная длина или плотность ли­ний ребер (мм/мм3) и общее число точек вершин поли­эдров в единице объема (мм-3). Хотя по уровню свобод­ной энергии граничные поверхности уступают линиям ребер и тем более точкам вершин полиэдров, они нам­ного превосходят их по ве­личине относительного объ­ема, занимаемого в структу­ре металла. Поэтому грани­чные поверхности занимают по значимости первое место среди различных видов по­граничных зон однофазной полиэдрической структуры

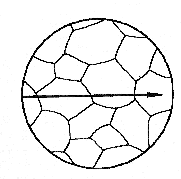


Рис. 2

Пересечение граничных поверхностей однофазной полиэдрической структуры случайной прямой линией

Полиэдрическая струк­тура является квазиизотро­пным агрегатом, состоящим из анизотропных микрочас­тиц. Как показано на рис. 2, прямая линия, про­веденная в такой структу­ре, пересекает граничные поверхности в ряде точек. В каждой из таких точек линия встречает новые свойства, так как попадает в среду с осями анизот­ропии по-другому ориентированными, чем в предыду­щей микрочастице. Поэтому, если рассматривать эту линию как направление движения дислокаций, магнит­ного потока, электрического тока и т. п., можно заме­тить, что каждая точка встречи линии с граничными по­верхностями служит барьером на их пути. Чем больше на­сыщена однофазная полиэдрическая структура гранич­ными поверхностями (или, как принято говорить, чем она мелкозернистее), тем больше точек пересечений, т. е. барьеров, приходится на единицу длины линии и, следо­вательно, тем большее влияние оказывает структура на показатели свойств однофазного металла. Эксперимен­тальные данные показывают, что между величиной удельной поверхности и многими свойствами металлов существуют очень простые и четкие количественные за­висимости

Твердость по Бринеллю простых металлов и одно­фазных сплавов связана прямолинейной зависимостью с величиной удельной поверхности микрочастиц

**HB=HB0 +****α ΣS *,*** (12)

где **НВ**—твердость по Бринеллю, кгс/мм2 **ΣS***—*удельная поверхность, мм2/мм3 , **α**  и **НВ0**—коэффициенты, постоянные для данного металла.

Аналогична зависимость коэрцитивной силы **Нс** магнитно-мягких сталей и магнитной проницаемости ***μ*** чистого железа, отожженного в вакууме, от величины удельной поверхности. Это объясняется образованием большого числа доменов сложной формы на граничных поверхностях.

4. МНОГОФАЗНЫЕ СТРУКТУРЫ

Принципиальное отличие многофазной структуры от полиэдрической состоит в том, что она построена из микрочастиц не одной, а, по меньшей мере, двух фаз. Часто вторая фаза присутствует не сама по себе, а в составе сложной структурной составляющей - эвтекти­ки или эвтектоида. Поскольку они являются относитель­но более упорядоченными структурами, начнем с них рассмотрение многофазных структур и их параметров.

Эвтектики и эвтектоиды можно разделить на две группы по признаку наличия или отсутствия ориентации микрочастиц фаз в эвтектическом зерне. В каждую из этих групп войдут несколько подгрупп, различаемых по геометрической форме микрочастиц фаз эвтектики, как схематически показано на рис. 3.

1. Ориентированные эвтектики или эвтектоиды. В каждом эвтектическом зерне микрочастицы хотя бы одной из фаз, составляющих эвтектику, ориентированы взаимно параллельно, однако эта ориентация не повто­ряется в соседних, смежных зернах эвтектики. Микро­частицы, составляющие эвтектику, могут иметь форму пластинок либо стержней:

а) ориентированная пластинчатая эвтектика построе­на из взаимно параллельных чередующихся пластин двух фаз. Отношение толщин пластинок этих фаз опре­деляется отношением объемов фаз в эвтектике, которое постоянно для данного сплава. Наиболее известной структурой этой подгруппы является метастабильный эвтектоид железоуглеродистых сплавов—перлит. В пер­лите чередуются пластинки цементита и феррита, тол­щины которых относятся примерно как **1:7***;*

б) ориентированная стержневая эвтектика состоит из непрерывной фазы (матрицы), в которой внедрены вза­имно параллельные стержневидные микрочастицы вто­рой фазы. Примерами эвтектик такого типа могут слу­жить — метастабильная эвтектика железоуглеродистых сплавов—ледебурит, эвтектика сплавов **Сd—Sn** и др.

2. Неориентированные эвтектики или эвтектоиды. Каждое эвтектическое зерно состоит из непрерывной фа­зы (матрицы), в которой внедрены беспорядочно (слу­чайно) ориентированные микрочастицы второй фазы. Эти микрочастицы могут иметь форму пластинок, стерж­ней или примерно равноосных зерен:

а) неориентированная пластинчатая эвтектика со­стоит из матрицы с внедренными пластинками второй фазы, которые ориентированы беспорядочно. К этой группе относится эвтектика сплавов **А1 — Si**, которую часто неправильно называют игольчатой;

б) неориентированная стержневая эвтектика анало­гична предыдущей, но микрочастицы второй фазы имеют форму тонких стержней, ориентированных беспорядоч­но. Поскольку вероятность пересечения этих стержней плоскостью шлифа вдоль их оси весьма мала, сечения стержней на шлифе имеют круглую или эллипсовидную форму. Поэтому такие эвтектики часто принимают за зернистые. К этому типу относится, видимо, эвтектика медь—закись меди;

в) зернистая эвтектика состоит из матрицы с внед­ренными микрочастицами второй фазы, имеющими при­мерно сферическую форму. Примером такой структуры может служить тройная эвтектика сплавов **Fе—С—Р**, называемая стедитом.

Поскольку эвтектика состоит из двух фаз, основным параметром ее структуры является количественный фа­зовый состав по объему, т. е. объемная доля каждой из фаз, которая может быть выражена также в процентах по объему. Например, в структуре пластинчатого пер­лита феррит занимает 0,88 и цементит—0,12 объема перлита или соответственно 88 и 12% (по объему).

Если условия охлаждения сплава близки к равновес­ным, фазовый состав данной эвтектики по объему пос­тоянен, так как обусловлен ее химическим составом. При ускоренном охлаждении фазовый состав эвтектики по объему и ее химический состав могут отклоняться от равновесных условий.

Дисперсность эвтектик и эвтектоидов может изме­няться в широких пределах в зависимости от условий охлаждения, что оказывает большое влияние на свой­ства. Как было показано выше, универсальный показа­тель дисперсности, применяемый к структурам с любой формой микрочастиц, — удельная поверхность — пло­щадь граничной поверхности раздела фаз, отнесенная к единице объема эвтектики пли эвтектоида. В то же вре­мя удельная поверхность равна суммарной площади по­верхности каждой из фаз эвтектики в единице ее объема.

Свойства, определяемые дисперсностью, связаны чет­кими и простыми зависимостями с величиной удельной поверхности раздела фаз эвтектики.

Например, твердо­сть по Бринеллю пластинчатого перлита связана прямо­линейной зависимостью с величиной удельной поверхно­сти раздела ферритной и цементитной фаз: **НВ=125+0,02ΣSц**.

Предел текучести углеродистой стали, имею­щей структуру зернистого перлита, также линейно связан с величиной удельной поверхности раздела фаз цемен­тит—феррит: **σт=155+1.6+1,6ΣSц** МН/м² (в обоих случаях **ΣSц** —величина удельной поверхности раздела фаз це­ментит - феррит, мм2/мм3).

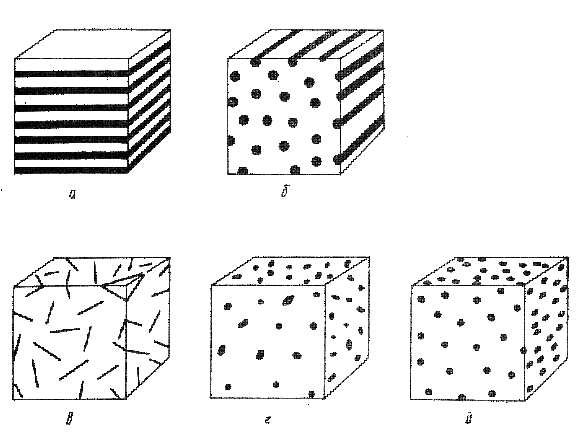


Рис. 3 Классификация эвтектик (эвтектоидов) по геометрии их строения:

*а* - ориентированные эвтектики с микрочастицами пластинчатой формы; *б* - стержневой;

*в* - неориентированные эвтектики с микрочастицами пластинчатой формы; *г* - стержневой; *д* - шаровидной

В любой двойной эвтектике или эвтектоиде поверх­ность раздела фаз одновременно является поверхностью каждой из этих фаз в отдельности. Однако объемные до­ли фаз в эвтектике различны и, следовательно, различна поверхностная энергия, отнесенная к единице объема каждой из фаз. Поэтому важным параметром структуры является относительная удельная поверхность фазы, под которой понимают суммар­ную площадь поверхности микрочастиц данной фазы, отнесенную к ее объему. Ес­ли удельная поверхность ха­рактеризует дисперсность структуры в целом и опреде­ляет свойства, зависимые от дисперсности, то относитель­ная удельная поверхность оценивает дисперсность от­дельной фазы и ее термоди­намическую устойчивость.

Например, две стали, со­держащие 1 и 0,5*%С* и име­ющие структуру зернистого цементита, могут иметь оди­наково высокую твердость, благодаря большей диспер­сности цементита стали, со­держащей 0,5*%С*. Но при этом относительная удель­ная поверхность цементита этой стали будет больше, чем в стали, содержащей 1*%С*, термодинамическая устойчи­вость ниже и, как следствие, твердость стали с меньшим содержанием углерода менее устойчива при отпуске.

Переходя от эвтектик и эвтектоидов к более сложным структурам, в том числе многофазным, можно отметить, что и для них рассмотренные выше параметры сохраня­ют свое значение.

Пользуясь диаграммой состояния сплавов, при помо­щи правила отрезков, можно рассчитать фазовый состав сплава по массе, зная его химический состав. Однако с точки зрения влияния структуры на свойства, намного целесообразнее пользоваться фазовым составом по объ­ему, поскольку свойства сплава непосредственно связаны с объемной долей фазы, но не с ее массой.

В ряде случаев, когда структура сплава содержит эв­тектику или эвтектоид, фазовый состав по объему заме­няют структурным составом по объему. Например, со­став структуры доэвтектоидной стали целесообразнее оценивать объемными долями феррита и перлита, чем долями феррита и цементита.

В многофазных сплавах граничные поверхности имеют еще большее значение, чем в одно­фазной структуре, благодаря их многообразию и большей протяженности. Даже очень мелкозернистая однофазная структура, оцениваемая баллом 10 по ГОСТ 5639—65, обладает удельной поверхностью полиэдров всего ~200 мм2/мм3, а удельные поверхности фаз эвтектоидов и дисперсных фаз термиче­ски обработанных сплавов достигают десятков тысяч мм2/мм3.

В однофазных полиэд­рических структурах могут быть граничные поверхности микрочастиц только двух ти­пов: межкристаллитные по­верхности и поверхности двойникования (не считая малоугловых границ блоков). Между тем в прос­той структуре доэвтектоидной стали встреча­ются четыре типа граничных поверхностей: феррит — феррит, феррит — перлит, перлит — перлит и феррит — цементит (в перлите). Каж­дая из этих граничных поверхностей отличается сво­ими свойствами от поверхностей других типов, различ­но и влияние их на свойства, поэтому их удельную вели­чину оценивают раздельно. Обычно измеряют те из них, которые в основном определяют интересующие нас свой­ства сплава. Например, в сером чугуне решающее влияние на прочность оказывает площадь графитных пласти­нок в единице объема чугуна.

Величина удельной поверхности является мерой дис­персности структуры и эффективно применяется для оценки кинетики таких процессов как сфероидизация и коалесценция. Коалесценция имеет весьма большое прак­тическое значение, поскольку ее интенсивность определя­ет такие важные свойства, как теплостойкость и красностойкость режущих инструментальных сталей, жаропроч­ность сталей, сплавов и композиций, упрочненных дис­персной фазой.

Известно, что растворимость дисперсной фазы в мат­рице тем выше, чем больше кривизна межфазной поверх­ности. Поэтому кромки плоских микрочастиц и выступа­ющие участки поверхности частиц, форма которых отлич­на от сферической, растворяются в матрице с последующей диффузией и выделением на других участ­ках поверхности тех же микрочастиц, обладающих мень­шей кривизной. В результате этого процесса, называемо­го сфероидизацией, кривизна поверхности микрочастиц постепенно выравнивается, и они приобретают форму, близкую к шаровидной.

По той же причине в системе разновеликих микрочас­тиц дисперсной фазы происходит растворение в матрице малых микрочастиц, обладающих большой кривизной поверхности, диффузия через матрицу и выделение на поверхности крупных микрочастиц, имеющих меньшую кривизну поверхности. Этот процесс, называемый коалесценцией, приводит к уменьшению общего числа микро­частиц дисперсной фазы и укрупнению оставшихся мик­рочастиц за счет растворившихся мелких. Уменьшение числа микрочастиц в объеме приводит к увеличению среднего расстояния между соседними микрочастицами, что и является главной причиной затухания процесса коалесценции во времени.

Процесс коалесценции возникает вследствие различ­ной кривизны поверхности микрочастиц дисперсной фа­зы. Если все микрочастицы этой фазы шаровидные и имеют одинаковый диаметр, для процесса коалесценции отсутствует побудительная причина.

Как следует из изложенного выше, интерес представ­ляют такие геометрические параметры структуры, как средняя кривизна граничных поверхностей раздела фаз, а также дисперсия кривизны (или среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации кривизны). Важный параметр структуры — число микрочастиц дисперсной фазы в единице объема сплава и связанное с ним среднее расстояние между соседними микрочастицами.

Среднее расстояние между соседними точками, являю­щимися центрами кристаллизации новой фазы, ответст­венно за кинетику происходящих при этом диффузионных процессов. Например, продолжительность первичной графитизации цементита белого чугуна (при производстве ковкого чугуна) прямо пропорциональна среднему рас­стоянию между соседними центрами графитизации в объеме.

При изучении процессов образования структуры (кристаллизации) и ее последующих изменений (пере­кристаллизация, дисперсионное твердение, коалесценция) большое значение имеет не только общее число ми­крочастиц в единице объема, но и их гранулометрический состав, который характеризуют средний размер, дис­персию (среднее квадратичное отклонение) линейных размеров микрочастиц (диаметра, поперечника и др.) и наиболее полно плотность распре­деления размеров микрочастиц.

Установлено, что основной вид распределения линей­ных размеров микрочастиц металлических структур - логарифмически нормальное распределение,

т. е. распре­деление логарифмов линейных размеров микрочастиц от­вечает закону нормального распределения Гаусса.

Микрочастицы могут быть полностью изолированы одна от другой матрицей или, в крайнем случае, все микрочастицы могут контактировать и образовывать непрерывный каркас в объеме сплава. Относительное расположение микрочастиц характеризует их связан­ность между собой или непрерывность фазы микрочастиц. Связность микрочастиц существенно влияет на ряд важных свойств сплавов. Непрерывность фазы в сплаве в очень большой степе­ни влияет на свойства сплава в целом, а иногда и пол­ностью их определяет, сообщая сплаву те свойства, кото­рые имеет сама связанная фаза. Например, выделивший­ся в виде непрерывной оболочки по границам зерен стали цементит делает сталь хрупкой, хотя объемная до­ля цементита в стали может быть очень незначительной.

5. ОРИЕНТИРОВАННЫЕ СТРУКТУРЫ

Как однофазные, так и многофазные структуры делят на изометрические и ориентированные. В изометрической структуре полностью отсутствует какая-либо предпочтительная направленность граничных поверхностей в пространстве, структура изотропна. В ориентированной структуре ее граничные поверхности частично или полностью параллельны некоторой линии или плоскости, называемые осью или плоскостью ориентации, структура анизотропна.

На рис. 4, *а* показана изометрическая структура од­нофазного металла, в которой нет никакой предпочти­тельной ориентации граничных поверхностей. На рис. 4, *б* приведена структура поперечного шлифа листовой транс­форматорной стали, граничные поверхности которой час­тично ориентированы параллельно плоскости листа, кото­рая и является плоскостью ориентации. На рис. 4, *в* - волокнистые неметаллические включения в стали круглого профиля, поверхности которых почти полностью ориентированы параллельно осевой линии прокатанного прутка, которая и является осью ориентации.

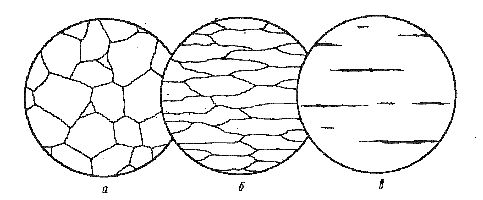
 Если отдельные группы граничных поверхностей име­ют определенную ориентацию, но она не повторяется в других группах таких же поверхностей, структура изометрична. Например, внутри каждого отдельно взятого зерна пластинчатого перлита граничные поверхности раз­дела фаз цементит — феррит взаимно параллельны, т. е. полностью ориентированы.

Рис. 4 Различные виды граничных поверхностей: *а* – изометрические граничные поверхности; *б* - частично ориентированные; *в* – почти полностью ориентированные

Но эта ориентация не повто­ряется в других зернах перлита, так как плоскости ори­ентации граничных поверхностей зерен перлита ори­ентированы случайно. Поэтому в целом граничные по­верхности в пластинчатом перлите изометричны.

Причиной образования ориентации чаще всего слу­жит пластическая деформация сплава — прокатка, воло­чение и др. Более редко ориентация бывает следствием транскристаллизации, кристаллизации в магнитном поле и т. п. Наличие ориентации обусловливает анизотропию свойств и оказывает на них существенное влияние. Виды ориентации могут быть весьма многообразны, так как оси и плоскости ориентации не обязательно бывают пря­молинейными и плоскими. Например, при кручении осью ориентации служит винтовая линия. На рис. 5 показаны схемы типичных видов ориентации, наиболее часто встречающиеся в реальных структурах.

Изометрическая структура. Граничные поверхности изометрической структуры не имеют никакой преимуще­ственной ориентации в пространстве. Поэтому, как бы ни была направлена плоскость шлифа, сечения микрочастиц однофазной полиэдрической структуры будут равноосными (см. рис. 5,а). В двуфазных структурах микрочастицы не обяза­тельно должны быть равноосными — они могут иметь форму пластинок или игл, беспорядочно ориентирован­ных в пространстве, как, например, в пластинчатых или стержневых неориентированных эвтектиках, в мартенсите и т. п.

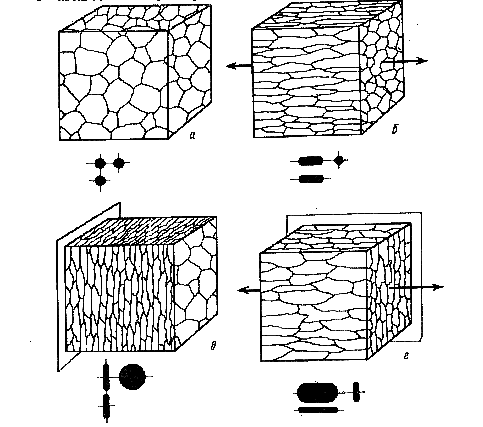


Рис. 5 Классификация граничных поверхностей по видам ориентации и форма микрочастиц: *а* – изометрическая; *б* - линейная; *в* – плоскостная; *г* - плоскостно-линейная ориентация. Показаны оси и плоскости ориентации

Линейно ориентированная структура. При прокатке или волочении прутков примерно круглого профиля (или при равномерном растяжении) первоначально равновес­ная форма микрочастиц нарушается — они вытягивают­ся, их поверхности приобретают преимущественную ори­ентацию параллельно оси прокатки или волочения, кото­рая и служит осью ориентации структуры. Как показано на рис. 5, *б*, для линейно ориентированной структуры типична вытянутая параллельно оси ориентации форма сечений микрочастиц на шлифах, плоскость которых па­раллельна этой оси. На шлифах, плоскость которых пер­пендикулярна к оси ориентации, форма сечений микро­частиц равноосна.

Плоскостно-ориентированная структура. При прокат­ке листового металла (а также при осадке, сжатии) пер­воначально равноосные микрочастицы сплющиваются и их поверхности приобретают преимущественную ориента­цию параллельно плоскости листа (или осадки). Для плоскостно-ориентированной структуры (см. рис. 5, *в*) типична вытянутая параллельно плоскости ориентации форма сечений микрочастиц на шлифах, плоскости кото­рых перпендикулярны к плоскости ориентации (к плос­кости листа) и равноосная форма сечений микрочастиц на шлифах, параллельных этой плоскости.

Плоскостно-линейная ориентация. Такая ориентация наблюдается при наличии одновременно и линейной, и плоскостной ориентаций граничных поверхностей. Она возникает при прокатке полосы или ленты, при вальцов­ке, когда микрочастицы сплющиваются и одновременно вытягиваются в направлении прокатки и в меньшей сте­пени перпендикулярно ей (в направлении по ширине по­лосы или ленты). Поверхности микрочастиц приобретают преимущественную направленность и параллельно плос­кости полосы или ленты, и параллельно осе­вой линии прокатки. Такая структура (см. рис. 5, *г*) име­ет и ось, и плоскость ориентации: шлифы, плоскости кото­рых параллельны или перпендикулярны к оси и к плоскости ориентации сечения микрочастиц, имеют вытянутую форму, но степень вытянутости их различна.

Пространственная форма микрочастиц при разных ви­дах ориентации существенно различна (см. рис. 5). Вид­но, что для правильного суждения о форме пространст­венных микрочастиц и виде ориентации единичный шлиф может оказаться недостаточным — потребуются два шли­фа, плоскости которых должны быть определенным об­разом ориентированы относительно оси и плоскости ориентации.

Для количественной оценки разных видов ориентации используется понятие степени ориентации - линейной, плоскостной или плоскостно-линейной. Под степенью ориентации понимают отношение площади граничных по­верхностей, ориентированных определенным образом, к площади всех граничных поверхностей, выраженное в процентах. Для изометрической структуры степень ори­ентации граничных поверхностей равна нулю, для полно­стью ориентированной структуры (как на рис. 5, *в*) она близка к 100%.

Необходимо отметить, что не всегда наличие ориента­ции структурных элементов сопровождается ориентацией граничных поверхностей. Равноосные микрочастицы изометричны сами по себе, поэтому, как бы они ни были расположены в объеме сплава (например, в виде парал­лельных цепочек), их граничные поверхности изометричны. Между тем существуют сплавы, в которых наличие ориентации равноосных микрочастиц весьма существен­но сказывается на свойствах (карбидная неоднородность быстрорежущих и высокохромистых сталей, хрупкие не­металлические включения в стальном прокате и т. п.). В этих случаях количественная оценка степени ориента­ции выполняется путем изучения однородности структу­ры в двух направлениях—параллельном и перпендику­лярном к оси ориентации.

Пространственную ориентацию могут иметь не толь­ко граничные поверхности, но и линейные элементы структуры. В однофазной полиэдрической структуре, на­пример, имеющие ориентацию граничные поверхности образуют, пересекаясь, ориентированные линии ребер микрочастиц (см. рис. 5, б). Линейные элементы струк­туры, как и граничные поверхности, могут иметь различ­ные виды ориентации. При линейной ориентации линейные элементы расположены преимущественно параллель­но некоторой линии, которая называется осью ориента­ции. При плоскостной ориентации линейных элементов структуры они расположены преимущественно парал­лельно некоторой плоскости, называемой плоскостью ориентации. Количественная оценка ориентации линей­ных элементов аналогична оценке ориентации граничных поверхностей и ее показателями служат степени ориен­тации — линейной или плоскостной.

6. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРЕХМЕРНОЙ, ДВУХМЕРНОЙ И ОДНОМЕРНОЙ СТРУКТУР

Рассматривая микрочастицы трехмерной (простран­ственной) микроструктуры как геометрические тела мик­роскопического масштаба (рис. 6), мы обозначаем их различные параметры теми же буквами латинского и греческого алфавитов, которыми принято обозначать со­ответствующие параметры геометрических тел. Объем отдельной микрочастицы обозначаем V, площадь ее по­верхности ***S***, линейные размеры ***L***, ***D*** (диаметр) или ***Н*** (высота), кривизна поверхности ***К***, двугранный угол ме­жду гранями ***Ф***, число микрочастиц в единице объема сплава ***N*** и т. п.

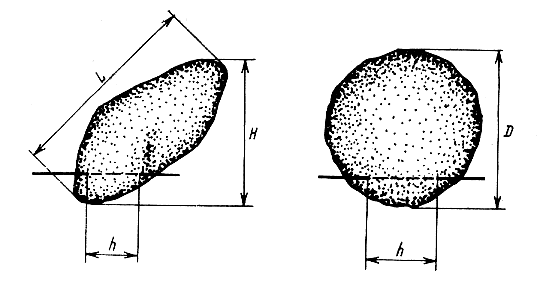


Рис. 6 Линейные параметры трехмерных микрочастиц: ***L*** – линейный размер; ***Н*** - высота;

***D*** – диаметр; ***h*** – хорда

Для обозначения суммарных величин, отнесенных к единице объема сплава, пользуемся знаком суммы ***Σ***, поставленным перед знаком соответствующего параметра. Например, ***ΣV*** обозначает суммарный объем микрочастиц в единице объема сплава мм3/мм³. Фазу или структурную составляющую, к которой относится данный параметр, обозначаем индексом. Например, ***ΣSα*** и обозначает суммарную поверхность микрочастиц фазы **α** в единице объема сплава, ***Dα*** — средний диаметр шаро­видных микрочастиц фазы **α.**

Исходными данными для количественного определе­ния параметров пространственного строения служат па­раметры перечисленных выше и других элементов двумерной структуры, которые измеряют или подсчитывают на плоскости шлифа.

На рис. 7 схематически показаны основные геомет­рические параметры, определяемые на плоскости шлифа. Для них приняты следующие обозначения: площадь се­чения микрочастиц ***F***, периметр этого сечения ***Р***, линей­ный размер или ***d*** (диаметр), кривизна граничной ли­нии ***k***, плоский угол (сечение двугранного угла плоско­стью шлифа) ***φ***, число сечений микрочастиц на единице площади шлифа ***п***, число точечных элементов на единице площади шлифа (например, ямок травления, представля­ющих точки выхода дислокационных линий) ***М*** и т.п. Суммарные значения, отнесенные к единице площади шлифа, - знаком суммы ***Σ*** перед знаком соответствую­щего параметра двумерной структуры. Например, ***ΣPα*** обозначает суммарный периметр сечений микрочастиц фазы **α** на единице площади шлифа.

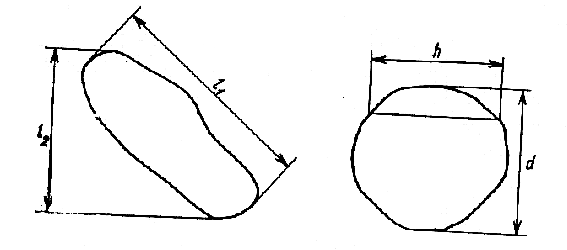


Рис. 7 Линейные параметры сечений микрочастиц: **1, 2** – линейные размеры; ***d*** – диаметр; ***h*** -хорда

Если провести на плоскости шлифа случайную пря­мую линию — секущую, ее можно одновременно рассмат­ривать и как линию, проведенную в пространственной структуре. Параметры, измеряемые или подсчитываемые вдоль этой линии, характеризуют одномерную (линей­ную) структуру сплава. Эти параметры широко используют для расчета параметров пространственной структу­ры. Секущая прямая, пересекая микрочастицы одной или нескольких фаз, разделена па хорды, проходящие по этим фазам. Параметрами одномерной структуры явля­ются: длина хорды ***h*** и число точек пересечений секущей с граничными линиями (поверхностями), получающееся на единице длины секущей – ***m***. Среднюю длину хорд, про­ходящих по фазе **α**, обозначаем **,** а суммарную длину таких хорд, отнесенную к единице длины секущей линии **Σ.**

Параметры проекционного изображения будем обо­значать теми же буквами, которые приняты для простран­ственных элементов структуры, но со штрихом. На­пример**, L`дисл**обозначает длину проекции линии дисло­кации на проекционном изображении.

Таблица 3 -Системы обозначений геометрических параметров микроструктуры

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Обозначение, принятое | | Размер-  ­ность |
| в стереометри­ческой металло­графии | по  МОС |
| Объем отдельной микрочастицы | V | V | мм3 |
| Поверхность отдельной микрочастицы | S | S | мм2 |
| Диаметр сферической микрочастицы | D | — | мм |
| Высота микрочастицы | Н | — | мм |
| Длина линейного элемента структуры | L | L | мм |
| Кривизна граничной поверхности | К | — | мм-1 |
| Двугранный угол между гранями | Ф | - | Град |
| Число микрочастиц в единице объема | N | NV | мм-3 |
| Суммарный объем микрочастиц в  единице объема сплава единице | ΣV | Vy | мм³/мм³ |
| Суммарная поверхность микрочастиц в  единице объема сплава | ΣS | SV | mm²/ mm³ |
| Суммарная длина линейных элементов в единице объема сплава | ΣL | LV | mm/mm³ |
| Площадь отдельного сечения микрочастицы | F | A | mm² |
| Периметр отдельного сечения микрочастицы | Р | — | mm |
| Диаметр сечения сферической микрочастицы | D | — | mm |
| Длина линейного элемента на шлифе | 1 | L | мм |
| Длина случайной хорды | H | — | мм |
| Кривизна граничной линии на шлифе |  |  | мм-1 |
| Плоский угол, являющийся сечением двугранного угла | Ф | ---- | град. |
| Число сечений микрочастиц на единице площади шлифа | n | NA | мм-2 |
| Число точечных элементов на единице площади шлифа | М | Pa | мм-2 |
| Число точек пересечений на единице длины секущей линии | m | PL | мм-1 |
| Суммарная площадь сечений микрочастиц на единице площади | ΣF | Aа | мм²/мм² |
| Суммарная длина граничных линий на единице площади шлифа | ΣP | La | мм/мм² |

В настоящее время не существует общепринятой или стандартизованной системы обозначений геометрических параметров пространственной, плоскостной и линейной микроструктур. Наиболее распространенные: 1) система обозначений, принятая в стереометрической металлогра­фии и 2)система обозначений, реко­мендованная Международным обществом стереологии (МОС). Обе системы обозначений приведены в табл. 3, в ко­торой даны также размерности каждого параметра. В дальнейшем будем пользоваться первой из этих систем, принятой в практике стереометрической металлогра­фии.

III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОГО МИКРОАНАЛИЗА

7. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ТРЕХМЕРНЫХ, ДВУМЕРНЫХ И ОДНОМЕРНЫХ СТРУКТУР

Поскольку металлические сплавы непрозрачны, можно проникнуть внутрь их пространственной структуры, пе­ресекая ее плоскостью или линией. Это позволяет наблюдать двумерную структуру на плоскости шлифа и одно­мерную структуру на секущей линии (проведенной на том же шлифе). Геометрические параметры двумерной и одномерной структур могут быть измерены или подсчи­таны на шлифе с необходимой точностью. Эти парамет­ры определяются параметрами трехмерной структуры и между ними должны существовать количественные со­отношения. Для того чтобы рассчитать действительные параметры трехмерной структуры по измеренным пара­метрам двумерной и одномерной структур, следует найти математически строгие зависимости между парамет­рами трехмерной, двумерной и одномерной структур.

Элементы пространственной структуры могут быть трехмерными (микрочастицы), двумерными (граничные поверхности), одномерными (ребра полиэдров, дислока­ции) и точечными (вершины полиэдров). В табл. 4 при­ведены соотношения размерностей элементов простран­ственной структуры и их следов на секущей плоскости и на секущей линии.

В табл. 5 приведены размерности суммарных пара­метров пространственной структуры, отнесенные к еди­нице ее объема, и их следов, отнесенных соответственно к единице площади шлифа или к единице длины секущей линии.

В тех случаях, когда параметры трехмерной, двумер­ной и одномерной структур имеют одинаковую размер­ность, между ними существуют простые соот­ношения.

Таблица 4 - Соотношение размерностей элементов пространственной структуры и их следов на секущей плоскости и линии

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Элемент трехмерной струк­туры и его размерность | Следы элементов трехмерной структуры и их размерность | |
| на секущей плоскости | на секущей линии |
| Тело, мм3  Поверхность, мм²  Линия, мм  Точка | Площадь сечения, мм²  Линия, мм  Точка  -------- | Хорда, мм  Точка  -------  ------- |

Таблица 5 - Размерности параметров трёхмерной структуры, отнесённых к единице объёма и их следов на секущей плоскости и линии

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Элементы трехмерной струк­туры, отнесенные к единице объема, и их размерности | Размерность следов этих элементов на | |
| секущей плоскости | секущей линии |
| Доля фазы, мм³/мм³ | мм2/мм2 | мм/мм |
| Удельная поверхность, мм²/мм³ | мм/мм2 | мм -1 |
| Плотность линий, мм/мм³ | мм -2 | - |

В слу­чае изометрической структуры измерения или подсчет параметров двумерной и од­номерной структур могут быть выполнены на одном единственном шлифе. Если же структура ориентирована в пространстве, правильные значения параметров двумер­ной и одномерной структур можно получить, выполнив их измерение или подсчет на многих шлифах, плоскости которых равномерно ориентированы во многих направ­лениях пространственной структуры.

В настоящее время известны семь основных матема­тически строгих стереометрических соотношений, связы­вающих параметры трехмерной, двумерной и одномер­ной структур. На этих соотношениях основывается боль­шинство методов стереометрической металлографии и стереологии. Все эти соотношения являются статистическими — они связывают средние значения параметров или их суммарные величины, отнесенные к единице объ­ема сплава, к единице площади шлифа или к единице длины секущей линии.

8. ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ ФАЗЫ ИЛИ СТРУКТУРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В СПЛАВЕ

Рассмотрим пространственную микроструктуру двух­фазового сплава. Структура состоит из микрочастиц фазы **α** внутри матрич­ной фазы **β.** Долю фазы α в сплаве или суммарный объ­ем всех микрочастиц этой фазы в единице объема мик­роструктуры обозначим **ΣVα** мм3/мм3.Долю пло­щади, занятую фазой α, т. е. суммарную площадь всех сечений микрочастиц этой фазы на единице площади двумерной структуры (на 1 мм² площади шлифа) обо­значим **ΣFα** мм²/мм²; суммарную длину отрезков, проходящих по фазе **α** ,на единице длины случайной секущей ⎯ **Σhα** мм/мм, а долю числа случайных точек, попадающих на фазу **α,** как отношение **⎯ zα / z**.

Как показали М.Делес, А.Розиваль и А.А.Глаголев между этими параметрами существует ***первое основное стереометрическое соотношение***, соглас­но которому доля фазы в объеме сплава, на площади шлифа, на секущей линии и доля случайных точек, по­павших на фазу, равны друг другу:

**ΣVα = ΣFα = Σhα=zα / z** (13)

Соотношение (13) выведено математически строго. Оно показывает, что измерение относительного объема фазы (или структурной составляющей) в сплаве можно заменить измерением и суммированием площадей на еди­нице площади шлифа, длин отрезков на единице длины секущей линии или подсчетом числа случайных точек на шлифе. Определение объемной доли фаз сплава можно выполнять по одному из этих трех вариантов, независи­мо от общего числа фаз или структурных составляющих сплава.

9. УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ГРАНИЦ ЗЕРЕН ИЛИ ФАЗ В СПЛАВЕ

Пусть в объеме содержится часть пространственной сис­темы поверхностей (частиц, фаз), которые могут быть плоскими или изогнутыми, непрерывными или прерывистыми, замкну­тыми или открытыми, изолированными или связанными одна с другой, ориентированными в пространстве или расположенными беспорядочно. На плоскости шлифа эти поверхности образуют следы в виде системы линий, а случайная секущая прямая пересечет их в ряде точек.

Математически строгое соотношение между суммарной площадью поверхностей в единице объема ***∑*S,** мм2/мм3, суммарной длиной линий их следов на еди­нице площади шлифа *∑***Р**, мм/мм2, и числом точек следов на единице длины случайной секущей прямой **m,** мм-1, как было доказано С.А. Салтыковым представляет собой ***второе основное стереометрическое соотношение***;

** ** мм-1 (14)

Найденное соотношение показывает, что суммарная площадь поверхностей в единице объема, суммарная длина линий их следов на единице площади шлифа и суммарное число точек следов на единице длины секущей линии пропорциональны, с соответствующими постоянными коэффициентами пропорциональности. Это позво­ляет заменить измерение граничных поверхностей в про­странстве измерением длины их следов на единице пло­щади или, еще проще, — подсчитать точки следов пере­сечений на единице длины случайной секущей линии.

В структуре могут существовать одновременно нес­колько видов граничных поверхностей. Например, в структуре, состоящей из фаз **α** и **β**, могут быть граничные поверхности трех видов: **α-α, α-β, β-β.** Они могут быть измерены раздельно путем подсчета на случайных секу­щих линиях точек пересечений с граничными поверхнос­тями каждого из этих трех видов в отдельности.

10. СУММАРНАЯ ДЛИНА (ПЛОТНОСТЬ) ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЛАВЕ

Системой линейных элементов пространственной струк­туры в единице ее объема могут быть дислокации, систе­ма ребер полиэдров однофазной структуры, иглообраз­ные микрочастицы и т. п.

Суммарную длину линейных элементов пространст­венной структуры в единице ее объема или плотность линейных элементов в объеме сплава обозначаем ***ΣL***, мм/мм3. В двумерной структуре (на плоскости шлифа) следами линий являются точки их выхода на поверхность шлифа. Например, точками выхода дислокаций являются ямки травления, точками выхода ребер полиэдров— тройные точки, в которых пересекаются три линии гра­ниц смежных зерен. Среднее число таких точек на единице площади шлифа обозначим ***М***, мм-2. Отметим, что ***ΣL*** и ***М*** имеют одинаковую размер­ность мм-2. Эти две величины однозначно связаны друг с другом.

Математически строгим ***третьим основным стереометрическим соотношением***, (С. А. Салтыков), связывающим суммарную длину линий в единице объема и среднее число следов этих линий (точек) на единице площади случайной секущей плоскости, является выражение (15):

**ΣL=2M,** мм/мм3 (15)

Это соотношение позволяет определять суммарную длину линий в единице объема или плотность линейных элементов в объеме путем простого подсчета числа точек следов этих линий на единице площади шлифа.

11. ЧИСЛО МИКРОЧАСТИЦ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА СПЛАВА

Число микрочастиц в единице объема имеет размер­ность мм-3. Ни один из параметров, измеряемых или подсчитываемых по двумерной или одномерной структу­ре, не имеет такой размерности. Поэтому число микроча­стиц в объеме можно связать только с произведением (или отношением) двух или более параметров, которое имеет размерность мм-3. Здесь возможны различные ва­рианты.

ЧИСЛО ВЫПУКЛЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА СПЛАВА

Начнем с рассмотрения простейшей системы из оди­наковых шаровидных частиц диаметра ***D***, число которых в единице объема равно ***N***. Плоскость шлифа пересечет только те частицы, центры которых находятся по обе стороны этой плоскости на расстоянии, меньшем, чем 0,5***D***. В зависимости от этого расстояния диаметры сече­ний микрочастиц ***d*** получаются в пределах от нуля до ***D***. Среднее число сечений на единице площади ***п***, мм-2.

Поскольку центры всех ***n***-микрочастиц, пересеченных плоскостью шлифа (площадь его равна 1 мм2), находятся внутри параллелепипеда, основание которого равно 1 мм2 высота ***D*** и, следовательно, объем ***D***, мм3 число микрочастиц в единице объема равно:

  мм-3 .(16)

Это соотношение (И. Л. Миркин) позволяет определить число равновеликих шаровидных микрочас­тиц в единице объема, так как число сечений микрочас­тиц п легко подсчитать по шлифу, а величину ***D*** опреде­ляют как диаметр наибольшего, наблюдаемого на шли­фе сечения микрочастицы, предполагая, что такая микрочастица пересечена плоскостью шлифа через ее центр. Однако в реальных структурах диаметр шаровид­ных микрочастиц обычно не постоянен. Поэтому

. (17)

Полученное уравнение (С. А. Салтыков) выве­дено для условий, существующих в реальных системах шаровидных микрочастиц. Однако непосредственно при­менить его для определения числа микрочастиц в объеме нельзя, поскольку величина D не может быть найдена путем измерений на шлифе. Соотношение (17), тем не менее, широко используют в методах последовательного расчета распределения диаметров шаровидных микро­частиц.

Уходя от системы шаровидных микрочастиц, перейдем к бо­лее общему случаю неравновеликих микрочастиц, имею­щих форму любого выпуклого геометрического тела, при­нимая, что форма всех микрочастиц одинаковая и они различаются только размерами и ориентацией в прост­ранстве. Введем понятие средней высоты тела, которую обозначим .

Для рассматриваемой системы выпуклых микрочастиц действительно равенство (17), в котором средний диаметр шаровидных микрочастиц D заменяет­ся средней высотой выпуклых микрочастиц данной гео­метрической формы:

 (18)

Полученная зависимость (С. А. Салтыков) явля­ется математически точным ***четвертым основным стерео­метрическим соотношением***, которое действительно для систем неравновеликих выпуклых микрочастиц любой геометрической формы (но одинаковой для всех микро­частиц системы). Как мы увидим в дальнейшем, соотно­шение (18) необходимо при расчете распределения размеров микрочастиц в еди­нице объема, хотя непосредственно, пользуясь только формулой (18), число микрочастиц вычислить нельзя, так как неизвестна величина .

Приводим формулы для расчета средней высоты некоторых геометрических тел, форму которых могут иметь микрочастицы реальных металлических структур:

* тонкий стержень длиной : ***=0,5;=0,5;***
* прямой цилиндр длиной и радиусом ***r***: *** = 0,5 ( + πr****),*
* тонкий диск радиусом ***r***: *** = (π/2)r = 1,5708 r***,

- куб с ребром длиной ***а***: ***= 1,5 а;***

* параллелепипед с ребрами длиной ***a, b, с:  = 0,5 (а+ b+ с),***
* октаэдр с ребром длиной ***а:=* а (6/π)** **arccos (2/3)** 0,5 ***=* 1,175480а**

- кубооктаэдр с ребром длиной ***а***:  **=3а,**

- сфера диаметром ***D***: ***=* D*,***

* сжатый сфероид, получаемый вращением

эллипса с по­луосями ***аb***, вокруг меньшей оси: **=b + (а/ε) arcsin ε*,***

где **ε =[l-(b/a)2 ] 0,5**

* вытянутый сфероид, получаемый вращением

эллипса с полуосями ***аb***, вокруг большей оси**:**

*** =* а+b(1 / ε) arcsinε**,

где **ε = [(a/b)2 -1] 0,5.**

ЧИСЛО ШАРОВИДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА СПЛАВА

Рассмотрим систему равновеликих шаровидных мик­рочастиц с диаметром ***D***, число которых в единице рав­но ***N***, а среднее число сечений ***dх*** на единице площади шли­фа ***п***.

Для этого случая получим:

 (19)

Эта формула действи­тельна не только для системы равновеликих, но и для не­равновеликих шаровидных микрочастиц.

Уравнение (19) является математически точным ***пя­тым основным стереометрическим соотношением*** (С. А. Салтыков). В отличие от соотношения (18) его можно непосредственно использовать для определе­ния числа шаровидных микрочастиц в объеме сплава, так как оба параметра правой части выражения (19) можно определить по шлифу путем измерений и подсчетов.

Число микрочастиц в единице объема сплава опреде­ляет величину среднего расстояния между центрами со­седних микрочастиц, которое может быть рассчитано по формуле

 мм,

где ***λ*** — среднее расстояние между центрами соседних микрочастиц, мм.

12. СРЕДНЯЯ КРИВИЗНА ГРАНИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

На плоскости кривизна окружности **k** постоянна по всему периметру и определяется как обратная величина радиуса окружности: **k=1/r** мм-1Средняя кривизна кривой или средняя кривизна граничных линий оценивается величи­ной , усредненной по всей длине кривой или линий гра­ниц на шлифе.

В пространстве кривизна сферической поверхности по­стоянна в любой точке и равна обратной величине радиу­са сферы: **К=1****/R** мм-1. Кривизна произвольной поверх­ности или систем граничных поверхностей непостоянна. Для ее оценки в заданной точке нужно восстановить нор­маль к поверхности, провести через нее плоскость и, вра­щая эту плоскость вокруг нормали как вокруг оси, отме­тить на плоскости те два следа пересечения ее поверх­ностью, которые имеют в заданной точке наименьший (**Rmln**) и наибольший (**Rmа**х) радиусы кривизны.

Локальную кривизну поверхности в заданной точке определим выражением: **К=0,5(1/Rmin+1/Rmax)** мм-1.

Средняя кривизна отдельной поверхности, так же, как и средняя кривизна системы граничных поверхностей , оценивается ее величиной, усредненной по всей пло­щади поверхности.

Отметим, что кривизна линии и кривизна поверхности имеют одинаковую размерность мм-1 и найдем соотно­шение между средней кривизной граничных поверхно­стей  и средней кривизной их следов в двумерной струк­туре , которое, как было показано Р. Дегоффом и Дж. Каном имеет вид:

**** мм –1 (20)

Это соотношение действительно не только для по­верхностей сферических микрочастиц, но и для произ­вольных поверхностей и их следов, в том числе для гра­ничных поверхностей пространственной структуры и их следов на плоскости шлифа. Оно является математически строгим ***шестым основным стереометрическим соотноше­нием***.

Второй параметр—дисперсия кривизны **D(K)*—*** характеризует кривизну граничных поверхностей. Этот параметр оценивает степень однородности кривизны гра­ничных поверхностей. Если дисперсия кривизны равна нулю, т. е. все микрочастицы имеют один и тот же радиус кривизны во всех точках поверхности (система состоит из равновеликих шаровидных микрочастиц), условий для начала процесса коалесценции нет. Чем больше диспер­сия кривизны, тем интенсивнее должен протекать процесс коалесценции при прочих равных условиях.

Дисперсия кривизны представляет собой разницу ме­жду средней величиной квадратов кривизны и квадратом средней кривизны***:* D** **(К)= 2- ()2*.***

С учетом формулы (20) дисперсия кривизны систем шаровидных микрочастиц определим равенством

 (21)

Поскольку ***∑S=2******m***, для расчета дисперсии кривизны необходимо экспериментально определить ***п***, т и число шаровидных микрочастиц в единице объема ***N***.

13. СРЕДНЯЯ ВЕЛИЧИНА И ДИСПЕРСИЯ ДВУГРАННЫХ УГЛОВ

В основном двугранные углы между гранями микро­частиц — элемент однофазной полиэдрической структуры и, гораздо реже, таких микрочастиц многофазных струк­тур, которые имеют резко выраженные грани (например, кубические микрочастицы некоторых баббитов).

Как было показано ранее средняя величина дву­гранных углов полиэдрической однофазной структуры всегда равна 120°, поэтому она не может служить показа­телем равновесия структуры. Таким показателем являет­ся дисперсия двугранных углов полиэдров, нулевое зна­чение которой отвечает идеальному равновесию. Поэто­му нужно уметь определять по шлифу не только среднюю величину двугранных углов, но и их дисперсию.

При пересечении двугранного угла **Ф** плоскостью могут быть получены плоские углы **ϕ** величиной от нуля до **π**, независимо от величины двугранного угла. Однако средняя величина плоских углов, получаемых при много­кратных пересечениях плоскостью данного двугранного угла, однозначно обусловлена его величиной:

******  (22)

Рассмотрим далее множество случайно ориентирован­ных в пространстве двугранных углов, распределение ве­личин которых выражается некоторой функцией f (**Ф**).

Как показал А.В. Дувалян, имеет место следующее соотношение между средними величинами двугранных углов в пространстве  и их сечений случайной плоскостью :

******  (23)

Последнее уравнение (23) является математичес­ки точным ***седьмым основным стереометри******ческим соот­ношением***. Оно показывает, что средняя величина плоских углов, получаемых при пере­сечении плоскостью случайно ориентированных в прост­ранстве двугранных углов, равна средней величине этих двугранных углов.

Можно получить также зависи­мость между дисперсией двугранных углов D (Ф) и дис­персией плоских углов являющихся их случайны­ми сечениями:

, (24)

где D(Ф) — дисперсия двугранных углов;

 — дисперсия плоских углов;

— дисперсия плоских углов, являющихся слу­чайными сечениями двугранного угла Ф, равного средней величине плоского угла .

Последнюю величину находят по табл. 6, учитывая, что  (см. уравнение (24).

Если двугранные углы равны в среднем 120°, как, на­пример, в однофазной полиэдрической структуре, равен­ство (24) преобразуется в следующее:

 (25)

Следовательно, для определения дисперсии двугран­ных углов достаточно измерить по шлифу среднюю вели­чину и дисперсию плоских углов, являющихся случайны­ми сечениями двугранных углов.

Таблица 6 - Дисперсия и среднее квадратичное отклонение плоских углов, являющихся случайными сечеениями двуганного угла Ф

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Двугранный угол Ф град. | Дисперсия плоских углов D(ϕ/Φ) | | Среднее квадратичное отклонение σ(ϕ/Φ), град. |
| радиан2 | град2 |
| 0 | О | 0 | 0 |
| 15 | 0,019 | 62 | 7,9 |
| 30 | 0,060 | 197 | 14,0 |
| 45 | 0,107 | 351 | 18,7 |
| 60 | 0,148 | 486 | 22,0 |
| 75 | 0,175 | 574 | 24,0 |
| 90 | 0,185 | 607 | 24,6 |
| 105 | 0,175 | 574 | 24,0 |
| 120 | 0,148 | 486 | 22,0 |
| 135 | 0,107 | 351 | 18,7 |
| 150 | 0,060 | 197 | 14,0 |
| 165 | 0,019 | 62 | 7,9 |
| 180 | 0 | 0 | 0 |

14. СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ПО СРЕЗУ (ФОЛЬГЕ)

При выводе всех основных соотношений между пара­метрами трехмерной, двумерной и одномерной структур принималось, что пространственную структуру пересека­ет геометрическая плоскость или линия. Поэтому полу­ченные выше уравнения дейст­вительны при анализе по шлифу в отраженном свете.

При просвечивании электронным лучом фольги или тонкого среза, имеющих конечную толщину ***t***, получаем проекционное изображение пространственной структуры («на просвет»), к которому нельзя непосредственно при­менить выведенные выше основные стереометрические выражения. При определении параметров пространствен­ной структуры по ее проекционному изображению возни­кают весьма значительные трудности, обусловленные сле­дующими обстоятельствами:

а) в проекционном изображении накладываются од­на на другую (перекрываются) проекции элементов структуры, находящихся в объеме фольги или среза. На­ложение может быть многократным, причем кратность наложения в общем случае нельзя определить по проек­ционному изображению;

б) некоторые микрочастицы целиком находятся внут­ри объема фольги или среза, а другие перерезаны (усече­ны) верхней или нижней поверхностями фольги и поэтому только частично находятся внутри ее объема.

Из вышесказанного следует, что точные количествен­ные соотношения между параметрами пространственной структуры и ее проекционного изображения можно уста­новить только для точечных или линейных элементов этой структуры, а для удельной поверхности, объ­емной доли фазы и числа микрочастиц в объеме могут быть выведены только приближенно с определенными допущениями и оговорками.

ЧИСЛО ТОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА СПЛАВА

Рассмотрим тонкий срез (или фольгу) толщиной ***t***, который содержит в своем объеме какие-то точечные эле­менты структуры (вершины полиэдров, узлы сетки дис­локации, точечные включения и др.). Число таких эле­ментов в единице объема, которое нужно определить, обозначим ***nt*** мм -3. На проекционном изображении бу­дут видны проекции всех точечных элементов, содержа­щихся в объеме среза, которые легко подсчитать. Если среднее число проекций точечных элементов на единице площади проекционного изображения обозначить **NТ’** мм –2, то это число равно числу точечных элементов, содержащихся в объеме среза, равном **1×1×t** мм3.

Следовательно, искомое число точечных элементов в единице объема анализируемого объекта равно:

NT = NТ’/t мм -3 (26)

Нужно отметить, что точечные элементы пространст­венной структуры не пересекаются плоскостью шлифа (вероятность пересечения точки случайной плоскостью равна нулю). Поэтому число их в объеме сплава можно определить только по срезу, но не по шлифу.

СУММАРНАЯ ДЛИНА (ПЛОТНОСТЬ) ЛИНИЙ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА

Проекционное изображение линейных элементов структуры (например, дислокационных линий) зависит от их формы и ориентации в объеме среза (фольги).

Рассмотрим общий случай, когда линейные элементы расположены и ориентированы в пространстве случайно, так что любое направление их равновероятно (простран­ственно изометрическая система линий). Проекционное изображение таких линейных элементов представляет собой изометрическую систему линий. Суммарную длину линий в единице объема обозначим ***ΣL*** мм/мм3, а сум­марную длину их проекций на единице площади проекци­онного изображения***—ΣL′*** мм/мм2.

Как показал И. Андервуд :

 мм/мм3 (27)

Формула (27) устанавливает точное соотношение ме­жду суммарными длинами (плотностями) линейных элементов в единице объема и их проекций на единице пло­щади проекционного изображения. Принимая во внимание, ранее полученное соотношение, преобразу­ем формулу (27) (поскольку):

***ΣL = 2m /t*** мм/мм3,

где **m**—среднее число пересечений случайных секущих с линиями проекций линейных элементов на проекционном изображении, на единице длины секущих, мм -1.

СУММАРНАЯ ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА

Точное и простое соотношение А. Коши связывает площадь поверхности выпуклого тела и среднюю площадь проекции этого тела;

******  мм2 ,

где ***S*** — поверхность выпуклого тела, мм2.

***F'*** — средняя площадь проекций тела, мм2.

Если тело не является выпуклым, т. е., имеет вогнуто­сти, на его проекциях происходит наложение поверхно­стей и площадь средней проекции окажется меньше, чем **¼**часть площади поверхности тела.

Рассмотрим двухфазную структуру, состоящую из матрицы и выпуклых дисперсных микрочастиц второй фа­зы. Если допустить, что наложения про­екций микрочастиц не происходит и, что в объеме среза нет микрочастиц, перерезанных (усеченных) верхней и нижней плоскостями среза, то из формулы Коши следует выражение

 мм2/мм3 (28)

где  — удельная поверхность микрочастиц, мм2/мм3;

— суммарная площадь проекций микрочастиц на единице площади проекционного изобра­жения, мм2/мм2 ;

**t** — толщина среза, мм.

Наложение проекций выпуклых микрочастиц на про­екционном изображении отмечается в тем большей сте­пени, чем больше толщина среза, чем крупнее микрочастицы и чем больше число их в единице объема. Если число микро­частиц в объеме, их размеры и толщина среза малы, фор­мулой (28) можно пользоваться без коррекции, но с неко­торым ущербом для точности получаемого результата.

ЧИСЛО МИКРОЧАСТИЦ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА

Рассмотрим срез двухфазной структуры, в которой одна фаза является матрицей, а другая представлена равновеликими шаровидными микрочастицами, диаметр которых ***D***, а число в единице объема ***N.*** Число равновеликих шаровидных микрочастиц в единице объема исследуемого объекта определяют по формуле:

**N=N' / (t+D)** мм –3, (29)

где **N** — число микрочастиц в единице объема, мм -3;

**N'** - число проекций микрочастиц на единице пло­щади проекционного изображения, мм-2;

**D** — диаметр микрочастиц, мм;

**t** — толщина среза, мм.

Поскольку толщина среза известна, диаметр микроча­стиц равен диаметру их проекций (исключая усеченные микрочастицы), а число проекций на единице площади проекционного изображения легко подсчитать, то форму­лу (29) можно использовать для определения числа рав­новеликих шаровидных микрочастиц по срезу. Формула (29) точна только при малой объемной доле фазы шаро­видных микрочастиц и при малой толщине среза.

Рассмотрим более сложный случай - систему нерав­новеликих шаровидных микрочастиц, средний диаметр которых равен . Формула (29) остается точной, если за­менить в ней диаметр ***D*** равновеликих микрочастиц сред­ним диаметром ****** неравновеликих шаровидных микро­частиц:

N = N’ / (t + ) мм -3 . (30)

Величину  можно определить как средний диаметр проекций микрочастиц на проекционном изображении.

ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ ФАЗЫ

Как было сказано выше, из-за наложения про­екций нельзя дать в общем виде за­висимость объемной доли фазы в сплаве от параметров проекционного изображения. Такая зависимость выводится для простой системы равновеликих шаровидных микро­частиц, диаметр которых равен ***D***, а число в единице объ­ема ***N***.

Путем несложных преобразований была получена нижепри­веденная формула (Дж. Кан, Дж. Наттинг), при помощи которой можно определить объемную долю фа­зы равновеликих шаровидных микрочастиц по проекци­онному изображению (если наложением проекций можно пренебречь):

 мм3/мм3 ,(31)

где  - суммарная площадь проекций микрочастиц на единице площади проекционного изобра­жения, мм2/мм2;

***D*** — диаметр микрочастиц, мм;

***t*** — толщина среза, мм.

В приведенной формуле нельзя заменить диаметр рав­новеликих микрочастиц ***D*** средним диаметром неравновеликих шаровидных микрочастиц  без ущерба для точности, так как здесь имеет значение также и диспер­сия диаметра неравновеликих микрочастиц.

IV. ПРАКТИКА СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОГО МИКРОАНАЛИЗА

15. НЕОДНОРОДНОСТЬ СТРУКТУРЫ И ВЫБОР ПЛОСКОСТИ ШЛИФА

Масса образцов, подвергаемых микроанализу, совершен­но ничтожна по сравнению с массой партии металла, ко­торый они представляют, однако по их структуре судят о качестве металла в целом. Строго говоря, данные сте­реометрического микроанализа точно характеризуют только небольшой объем металла, непосредственно при­мыкающий к плоскости шлифа. Чтобы образец был пред­ставительным, т. е. чтобы полученные данные о структу­ре шлифа были типичными для металла в целом, при выборе местоположения и направления плоскости шли­фа необходимо учитывать неоднородность структуры и ее ориентацию в пространстве.

При получении слитка или отливки неоднородность структуры предопределяется различием кристаллизационных параметров по сечению и высоте, обусловленным снижением скорости охлаждения металла от поверхности к центру сечения, ликвационными и усадочными явлениями, транскристаллизацией и т.п. При формировании структуры в процессе кристаллизации она получает определенную пространственную симметрию, зависящую от формы слитка или отливки.

При последующей прокатке слитка неоднородность его исходной структуры частично наследуется в структуре проката (например, ликвационная зона). Структура при­обретает волокнистое строение и определенную прост­ранственную ориентацию, зависящую от конечного про­филя проката. Структура полученного проката также бу­дет иметь ось, или плоскость симметрии. Рассмотрим два типичных случая, встречающиеся наиболее часто: про­катанный металл круглого профиля и листовой прокат.

Для наглядности представим неоднородность струк­туры прокатанного круглого профиля в виде трех разно­родных зон 1—3, показанных на рис. 8. Осью симмет­рии структуры является ось прокатанного прутка О—О. Принимаем, что определяемый параметр структуры (на­пример, относительный объем неметаллической фазы) оценивается в зонах 1—3 величинами **C1, C2** и **C3**соот­ветственно. Найдем среднее, взвешенное по площади шлифа значение параметра  для поперечного и продоль­ного шлифа, плоскость которого проходит через ось прутка.

На поперечном шлифе площади зон 1—3 составляют соответственно 0,11; 0,33 и 0,56 площади шлифа. Поэтому среднее взвешенное значение параметра ***С*** по попереч­ному шлифу будет равно

******

На продольном осевом шлифе площади зон 1—3 оди­наковы и равны 0,33 площади шлифа каждая. Поэтому среднее взвешенное значение параметра ***С*** по продольно­му шлифу будет равно:



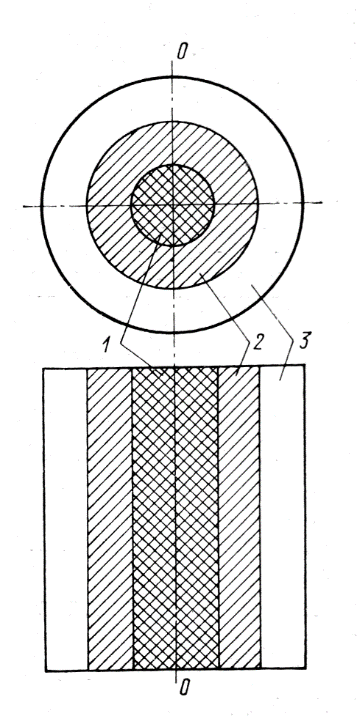
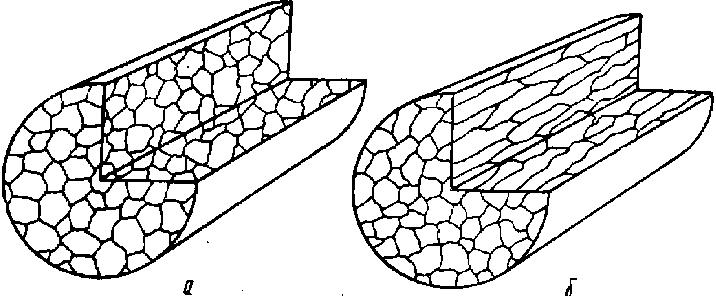
Видно, что объем каждой из зон равен ее площади на поперечном шлифе, умноженной на длину прутка. Следовательно, доли зон 1—3 в объеме прутка равны долям их площадей на поперечном шлифе. Поэтому среднее значение параметра , действительное для всего объема прутка, совпадает со средним значением этого параметра, определенным на поперечном шлифе , но не на продольном. Отсюда следует, что плоскость шлифа должна быть перпендикулярна к оси симметрии структу­ры.

Рис. 8 - Схема поперечного и продольного (осевого) сечений проката с осевой симметрией структуры, имеющей три зоны структурной неоднородно­сти. Ось симметрии О—О.

Рис. 9 - Схема, показывающая, что при одинаковой структуре по­перечного шлифа пространственная структура может быть различна: *а* -равноосные микрочастицы; *б*—вытянутые микрочастицы.

Однако, в тех случаях, когда структура имеет пространственную ориентацию, поперечный шлиф не может дать полного представления о структуре. Как показано на рис. 9, при тождественной форме и размерах зерен на поперечном шлифе, их пространственная форма может сильно различаться: быть равноосной или же в разной степени вытянутой вдоль оси проката.

Расположим поля зрения равномерно вдоль радиуса сечения прутка, на расстояниях ***R1, R2,,…***от центра сече­ния. Пусть значения параметра ***С*** в этих полях зрения оказались соответственно равны ***C1, C2,...*** Эти значения характеризуют структуры кольцевых зон, площади кото­рых соответственно равны ***F1, F2...*** Тогда средневзвешен­ное для всей площади сечения значение параметра С оп­ределим формулой:

   (32)

Формула (32) является математически точным выра­жением для расчета средневзвешенного значения пара­метра  по всей площади поперечного сечения и, следо­вательно, всего объема прутка (или отливки), имеющего осевую симметрию структуры. Ясно, что измерения пара­метра в полях зрения, расположенных равномерно вдоль радиуса сечения, можно производить не только на по­перечном, но и на продольном шлифе, плоскость которо­го проходит через ось симметрии.

При рассмотрении листового проката, струк­тура которого симметрична относительно плоскости, про­ходящей по середине толщины листа и параллельной его поверхности объективную картину также дает поперечный микрошлиф. Это справедливо и для отливок, имеющих форму пластин или плит, струк­тура которых имеет плоскость симметрии.

Из изложенного следует, что в рассмотренных случа­ях структурной неоднородности нужно располагать плос­кость основного шлифа перпендикулярно к оси или к плоскости симметрии структуры. Поля зрения на этой плоскости следует располагать равномерно либо по всей площади шлифа, либо по длине линии, перпендикулярной к плоскости или к оси симметрии. В последнем слу­чае, т. е. если структура имеет осевую симметрию, среднее значение параметра для всего объема определяют по формуле (32).

Многообразие геометрических форм заготовок и дета­лей и технологии их получения обусловливает многообра­зие форм неоднородности и ориентации структуры. Поэ­тому невозможно дать рекомендации для правильного выбора положения плоскости шлифа, пригодные во всех случаях. В каждом конкретном случае этот вопрос следу­ет решать с учетом существующих в металле осей или плоскостей симметрии структуры.

Выбор облегчается, если структура не имеет прост­ранственной ориентации, т. е. если она изометрична. При этом следует принимать во внимание только возможную неоднородность структуры в объеме анализируемого об­разца.

16. КАЧЕСТВО ШЛИФА ДЛЯ СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОГО МИКРОАНАЛИЗА

При выводе основных стереометрических соотноше­ний принималось, что пространственная структура пере­секается геометрической плоскостью. Поэтому основным требованием к качеству металлографического шлифа яв­ляется минимальная рельефность его поверхности. Чем рельефнее поверхность шлифа, чем дисперснее структура, тем ниже точность определения параметров структуры.

Микрорельеф получается в процессе полировки, что обусловлено различной твердостью структурных состав­ляющих. Для получения хорошего результата продолжи­тельность полировки необходимо свести к минимальной, что требует тщательной предварительной подготовки по­верхности шлифа путем шлифовки на абразивном круге и шкурках. Увеличению микрорельефа способствуют переполировка и глубокое травление. Травление шлифа, необходимое для выявления элементов структуры, долж­но быть минимальным. В этом случае структуру следует выявлять не созданием рельефа травления, а путем раз­личной окраски составляющих ее фаз.

Микрорельеф по-разному влияет на точность опреде­ления различных параметров структуры. Минимальный рельеф требуется при определении размеров и чисел микрочастиц дисперсной фазы, а также объемной доли такой фазы. Определение удельной поверхности зерен однофазных полиэдрических структур и не очень дис­персных фаз многофазных структур, менее чувствитель­но к величине микрорельефа. Еще меньше влияние мик­рорельефа при определении суммарной длины линейных элементов пространственной структуры. Существенное значение имеют форма микрочастиц и свойства вещества микрочастиц (твердость, хрупкость).

Микрорельеф создает теневое кольцо вокруг сечений карбидных зерен на шлифе, что затрудняет измерение их размеров и приводит к ошибочной оценке числа зерен в объеме сплава. В связи с этим в подобных структурах микрорельеф поверхности шлифа должен быть мини­мальным. Структура выявляется не в результате контра­стности, получаемой благодаря теневой картине, обус­ловленной микрорельефом, а различной окраской структурных составляющих (например, травлением пикратом натрия и т. п.).

При пластинчатой форме карбидов ферритокарбидной смеси преимущественное растворение ферритной фа­зы также приводит к получению рельефа. Наличие микрорельефа уве­личивает видимую ширину карбидных пластинок и при­водит к завышенной оценке содержания карбидной фазы в объеме структуры согласно соотношению (13). Однако число пластинок, пересекаемых секущей прямой на шли­фе, практически не зависит от величины рельефа. Поэтому микрорельеф почти не сказывается на оценке дис­персности пластинчатого перлита по удельной поверхно­сти раздела фаз, основанной на соотношении (14).

При оценке загрязненности стали неметаллическими включениями микрорельеф минимален, так как образцы обычно закаливают и просматривают шлиф без травле­ния. Тем не менее, и в этих условиях оценка может быть ошибочной, особенно если используются продольные шлифы. Тонкие ните­видные включения, небольшой сегмент сечения которых находится внутри тела шлифа, могут быть вы­рваны в процессе шлифовки. Другие включения, тело ко­торых находится внутри шлифа, а из него выступает не­большой сегмент сечения, могут «замазываться» тонким слоем металла при полировке. Поскольку шлиф просмат­ривают без травления, они остаются скрытыми и при ана­лизе не учитываются. И вырывание, и «замазывание» включений приводят к кажущемуся уменьшению их чис­ла и содержания неметаллической фазы в стали. На по­перечном шлифе оба эти яв­ления не наблюдаются.

Явление «замазывания» металлом тонких пластинок и мелких шаровидных включений графита наблюдается в серых и высокопрочных чугунах. Этому способствуют низкая твердость металлической основы (феррит) и хрупкость графита, который выкрашивается в процессе полировки, особенно если она длительна

17. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОГО МИКРОАНАЛИЗА

Микроанализ проводят на обычных металлографиче­ских микроскопах, оснащенных стандартной оптикой и приспособлениями. Можно пользоваться также микроскопом прибора ПМТ-З, который применяют для определения микротвердости.

Количественные измерения и подсчеты элементов микроструктуры на шлифе производят визуально, наблю­дая структуру в окуляр, а также на матовом стекле мик­роскопа. В последнем случае необходимо, чтобы матовое стекло было легко доступно для выполнения на нем из­мерений, а изображение на нем должно быть достаточно ярким и четким.

Предметный столик микроскопа должен обеспечивать плавное перемещение шлифа в плоскости столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи микрометрических винтов, которые одновременно изме­ряют величину перемещения с точностью 0,01 мм.

В металлографических микроскопах МИМ-7, МИМ-8 и др. шлиф находится над объективом, полированной по­верхностью вниз. Часть площади шлифа, опирающаяся на накладную шайбу микроскопа, наблюдателю недо­ступна. Чтобы сделать всю площадь шлифа доступной наблюдению, нужно укрепить шлиф пластилином на стек­лянной пластинке (соблюдая строгую параллельность плоскостей шлифа и пластинки) и подвесить его на сто­лике полированной поверхностью вниз.

Чтобы производить измерения на площади шлифа в определенных направлениях, нужно иметь на столике микроскопа накладную шайбу с градусной шкалой, по­ворот которой придает шлифу нужное направление при движении столика.

Комплект оптики микроскопа должен обеспечить по­лучение соответствующего увеличения для уверенного распознавания элементов анализируемой структуры. При количественном анализе недостаточное увеличение может привести к ошибочным результатам оценки параметров двумерной структуры. Например, подсчитанное на одном и том же участке шлифа чис­ло плоских зерен в основном зависит от использованного увеличения (в пределах от ×100 до ×I000), изменяясь в результате выявления новых мелких зерен при больших увеличениях. Соответственно изменяется и площадь среднего зерна.

Увеличение микроскопа следует точно измерить, так как от этого зависит точность измерения линейных раз­меров элементов структуры, их площадей, числа их на единице площади или на единице длины секущей линии. Для определения увеличения применяют обычные объ­ект-микрометры. Для количественных измерений и под­счетов при визуальном наблюдении необходим набор оку­ляров с различными окулярными вставками.

Окуляр-микрометр с линейкой, разделенной на 100 равных частей, применяют для измерения линейных раз­меров сечений микрочастиц (диаметры, хорды) и для подсчета числа элементов структуры, пересекаемых еди­ницей длины секущей линии. Длина шкалы окуляра не должна превышать 0,75—0,80 диаметра поля зрения, так как структура по периферии поля имеет меньшую чет­кость. Наличие диаметральной линии на линейке окуля­ра обязательно, так как именно она и служит в качестве секущей прямой (рис. 10).

Квадратно-сетчатый окуляр (рис. 11, в) использу­ют главным образом в качестве системы точек, наклады­ваемых на структуру, для подсчета доли точек, попавших на определенные структурные составляющие.

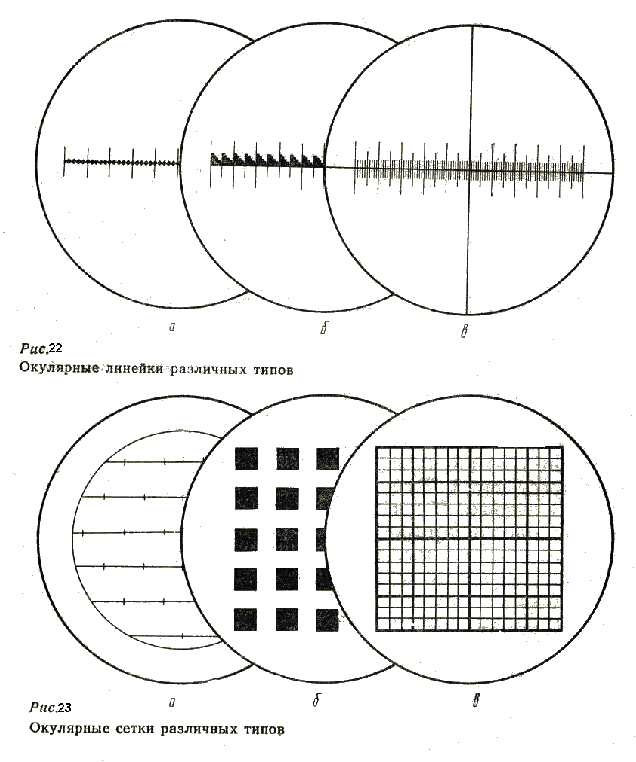


Рис. 10 - Окулярные линейки различных типов

*а* *б*  *в*

Он содер­жит 289 узловых точек сетки (17Х17) или 256 квадратов (16х16). Подсчет при таком большом числе точек в поле зрения затруднителен. Удобнее окуляры такого же ти­па, но с меньшим числом узловых точек (25, 100) или окулярные сетки, показанные на рис. 11, а и 11,б, имею­щие соответственно 25 и 100 точек (вершин квадратов).

Винтовой окуляр-микрометр AM 9-2м микротвердомера ПМТ- 3 имеет в поле зрения подвиж­ный крест нитей. Точка перекрестия перемещается вра­щением головки (барабана) на расстояние до 8 мм. Один оборот головки, имеющей 100 делений, перемещает точку перекрестия на 1 мм, т. е. цена деления головки равна 0,01 мм (но при измерениях, цена деления должна быть приведена к плоскости шлифа при помощи объект-микро­метра). Линию перемещения точки перекрестия на шли­фе принимают за секущую прямую соответствующей дли­ны. При перемещении точки перекрестия подсчитывают, например, число ее пересечений с линиями границ зерен или фаз на шлифе и определяют среднее число пересече­ний на единице длины. По этому числу, в соответствии с соотношением (14), находят удельную поверхность зерен или фаз в сплаве. Окуляр можно использовать так­же для измерения линей­ных размеров элементов структуры на шлифе (диаметра, хорды се­чения микрочастиц и др.).

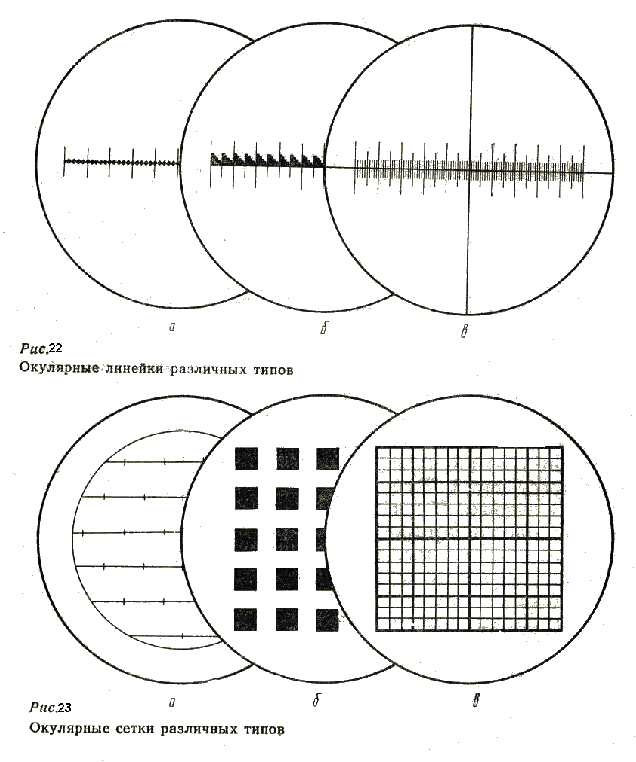


Рис. 11 - Окулярные линейки различных типов

*а* *б* *в*

Для измерения и сум­мирования длин отрезков случайной линии, прохо­дящих через участки раз­личных фаз (составляю­щих) микроструктуры, служат интеграционные столики различных ти­пов. Их ус­танавливают на пре­дметном столике ми­кроскопа. Шлиф пе­ремещают в поле зрения микроскопа с окуляром, имею­щим перекрестие, при помощи шести головок. Каждая из них перемещает шлиф в одном и том же направлении, не­зависимо от других, и на каждой головке регистрируется осуществляемая этой головкой длина перемещения. Цена деления на головке от­вечает перемещению шлифа на 0,01 мм. Перемещение шлифа при прохождении точки перекрестия по каждой из структурных составляющих осуществляют предназначенной для нее головкой. Таким образом, прибор может суммировать длины отрезков прямой линии, попавших на любую из шести структурных составляющих, по отдель­ности. По суммарным длинам отрезков, в соответствии с уравнением (14) определяют объемный структурный состав сплава.

Окулярные вставки с линейкой или сеткой, нанесен­ными штриховыми линиями, имеют существенный недо­статок, обусловленный тем, что эти линии имеют некото­рую ширину, не являясь геометрическими линиями. Ши­рина реальных штрихов окулярных вставок служит ис­точником погрешности при количественном микроана­лизе.

18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ

Как было сказано ранее, геометрические параметры трехмерной микроскопической структуры определяют на основе информации, полученной количественным микроанализом двумерной структуры шлифа. Основны­ми параметрами двумерной и одномерной структур являются: статистические показатели, характеризую­щие площади или линейные размеры сечений микрочас­тиц, средние числа ареальных, линейных и точечных элементов структуры на единице площади шлифа, сред­нее число точек пересечений секущей линии с линейны­ми элементами двумерной структуры на единице дли­ны секущей и др.

Рассмотрим технику измерения основных геометрических парамет­ров двумерной и одномерной структур, наблюдаемых на металлографическом шлифе.

ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ СЕЧЕНИЙ МИКРОЧАСТИЦ

Сечения микрочастиц имеют бесконечно разнообраз­ные формы, начиная от почти правильного круга, и кон­чая весьма сложными, разветвленными, распадающими­ся на несколько фигур, не связанных между собой в плоскости шлифа. Трудоемкость измерения площадей сечения возрастает с усложнением их формы. Оценка площадей индивидуальных сечений (а не их суммарной площади) необходима при расчетах числа микрочастиц в объеме сплава, но методы таких расчетов разработаны только для выпуклых микрочастиц сравнительно простой формы — шаровидных, кубических, эллипсоидальных. Поэтому необходимость измерения площадей сечений ограничивается простыми формами их — кругами, мно­гоугольниками, эллипсами.

Для расчета числа микрочастиц в объеме нужно иметь распределение сечений по величине их площади, для чего необходимо измерить достаточно большое, число сечений (не менее 100). Для получения достоверных данных измеряют все сечения в поле зрения микроскопа или на микрофотографии, но не выборочно.

При визуальном наблюдении структуры под микро­скопом обычно оценивают площади сечений только в тех случаях, когда сечения по форме близки к кругу. Для этого используют окуляр, вставка которого имеет несколько кругов и площадь их закономерно возрастает.

На рис. 12,а показана окулярная вставка с кругами, где площадь возрастает от 1 до 50 (за единицу принята площадь наименьшего круга). Увеличение объектива подбирают таким, чтобы наибольшее сечение на шлифе было близко к наибольшему кругу вставки. Сравнивая ее с кругами, оценивают все сечения, попавшие в квад­ратное поле вставки, регистрируя каждую оценку от­дельно. Полученные данные можно объединить в ряд размерных групп, например сечения площадью 0—5, 5—10,10—15 и т.д.

На рис. 12,*б* показана окулярная вставка другого типа. На ней площади кругов и прямоугольников возра­стают по геометрической прогрессии со знаменателем 2 (площадь каждого последующего круга или прямоуголь­ника вдвое больше предыдущего).

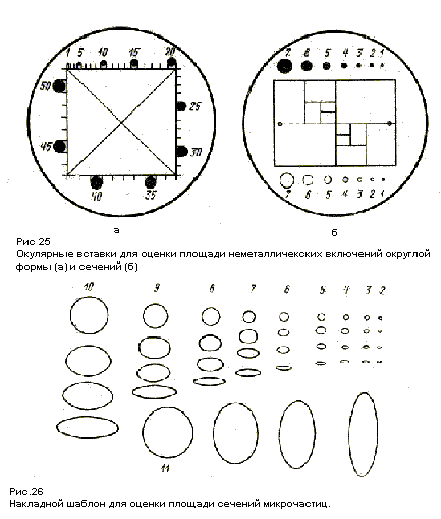


Рис. 12 - Окулярные вставки для оценки площади неметаллических включений округлой формы (*а*) и сечений микрочастиц (б)

*а* *б*

При пользовании любой вставкой предварительно нужно установить вместо шлифа объект-микрометр и определить коэффициент, на который нужно умножить цифру вставки, чтобы получить площадь круга, приве­денную к плоскости шлифа в микрометрах.

При измерениях площадей сечений микрочастиц на микрофотографии или на матовом стекле микроскопа пользуются прозрачными накладными шаблонами с на­несенными на них рядами фигур, площадь которых закономерно растет. При оценке площадей сечений по шаблону необходи­мо учитывать фактическое увеличение изображения структуры на микрофотографии или на матовом стекле камеры микроскопа.

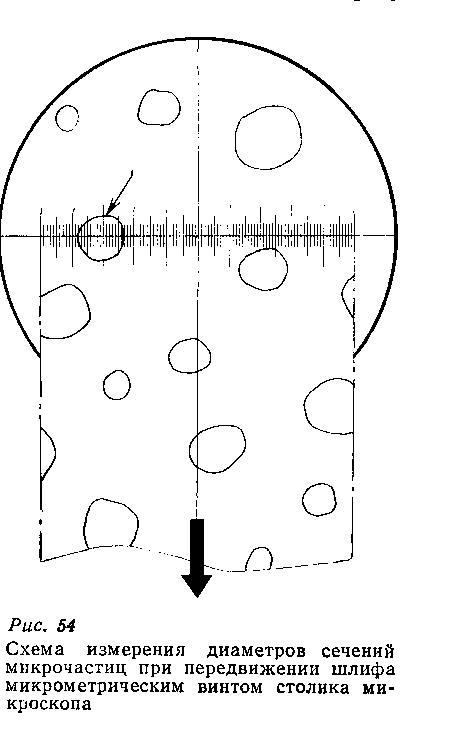
Площади сечений микрочастиц можно также опреде­лять проецированием микрофотографии (при помощи эпидиаскопа) на экран с нанесенной на него квадратной сеткой. Для получения абсолютных величин площадей сечений вместо микрофотографии устанавливают изо­бражение объект-микрометра, сфотографированное при том же увеличении, что и микрофотография, и опреде­ляют площадь одного квадрата сетки.

Получив одним из описанных способов величины площадей сечений, их делят на несколько размерных групп. Число их не должно быть меньше 7-8 и обычно не превышает 10—12. Ряд размерных групп может быть либо арифметическим, либо геометрическим, что зависит от принятого метода последующего расчета числа микрочастиц в объеме сплава. В первом случае размерные интервалы площадей сечений в группах строят по ариф­метическому ряду: 0—1, 1—2, 2—3 и т. д. Во втором слу­чае эти интервалы строят по геометрическому ряду, выбирая соответствующий знаменатель прогрессии. На­пример, при знаменателе, равном двум, 1—2, 2—4, 4—8 и т. д. Зная площадь шлифа, на которой подсчитаны площади всех сечений микрочастиц, число их в каждой группе относят к единице площади шлифа (мм2).

То или иное распределение площадей сечений микро­частиц служит основой для расчета их числа в объеме сплава и статистической кривой распределения микро­частиц по размерам.

ОЦЕНКА ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ СЕЧЕНИЙ МИКРОЧАСТИЦ

Линейные размеры сечений микрочастиц характери­зуют величиной их диаметра (если сечения имеют форму круга или близкую к ней) или длинами хорд, отсекаемых контурами сечений на случайной се­кущей прямой (что при­менимо к выпуклым сече­ниям любой геометриче­ской формы).

Рис.13- Схема измерения диаметров сечений микрочастиц при передвижении шлифа микрометрическим винтом столика микроскопа

Измеряя диаметры круглых сечений под мик­роскопом визуально, поль­зуются окуляр-микромет­ром с линейкой (см. рис. 10). Шлиф переме­щают микрометрическим винтом столика микро­скопа в направлении, строго перпендикулярном к линейке окуляра, как показано на рис. 13. При прохождении через ли­нейку центра очередного сечения измеряют и ре­гистрируют его диаметр в делениях шкалы линейки окуляра, не пропуская ни одного сечения, центр которого проходит в пределах длины линейки. Те сечения, центры которых при дви­жении шлифа проходят вне линейки, не учитывают, хотя сами сечения могут частично проходить через концевые точки линейки. Измерив достаточное число сечений (обычно не менее 100), отмечают по микрометрическому винту столика микроскопа длину пути, пройденного шлифом от начала до конца процедуры измерения диа­метров. Проанализированная площадь шлифа равна длине этого пути, умноженной на длину линейки окуля­ра (приведенную к плоскости шлифа).

Полученные величины диаметров сечений распреде­ляют на ряд размерных групп, интервалы которых вы­браны по арифметическому (0—1, 1—2, 2—3 и т. д.) или геометрическому (1—2, 2—4, 4—8 и т. д.) ряду, что зависит от выбора метода последующего расчета числа микрочастиц в объеме и распределения их по размерам. Число сечений в каждой размерной группе относят к единице площади шлифа (мм2).

Диаметры сечений можно измерять также обычной линейкой на микрофотографии, на проекции ее на экран или на матовом стекле камеры микроскопа с уче­том линейного увеличения изображения микрострукту­ры.

Распределение длин хорд, получаемых при пересе­чении микрочастиц случайной секущей прямой, позволяет рассчитать число микрочастиц в объеме и распределение их по размерам. Такой расчет не ограничивается сферическими микрочастицами, а применим и к выпуклым микрочастицам любой формы— кубическим, эллипсоидальным и т. п.

Измеряя длины хорд при визуальном наблюдении под микроскопом, используют окуляр с линейкой (см. рис. 11). По первому варианту шлиф перемещают микрометрическим винтом столика микроскопа в направ­лении, перпендикулярном к осевой линии линейки, согласно рис. 13. Перемещение производят скачкообразно на одно и то же расстояние (например, на 0,1 мм) В каждом новом положении шлифа регистрируют длины хорд, отсекаемых осевой линией линейки на контурах сечений микрочастиц. Суммарная длина секущей линии равна произведению числа перемещений столика на длину линейки окуляра (приведенную к плоскости шлифа).

По второму варианту шлиф перемещают микромет­рическим винтом столика в направлении, строго совпа­дающем с осевой линией линейки окуляра. При этом осевая линия линейки проходит через сечения микро­частиц, контуры которых отсекают на ней ряд хорд. Длину каждой хорды регистрируют, оценивая в делени­ях шкалы линейки. Измерив достаточное число хорд, определяют суммарную длину секущей прямой, на кото­рой они расположены. Эта длина равна пути перемеще­ния столика микроскопа в процессе выполнения анализа и определяется разницей показаний микрометрического винта столика в начале и в конце измерения хорд. Измерение можно повторить по нескольким секущим, расположенным параллельно, или в различных направ­лениях.

После измерений по любому из двух вариантов уста­навливают вместо шлифа объект-микрометр и опреде­ляют цену деления линейки окуляра. Полученные длины хорд приводят к плоскости шлифа и распределяют по размерным группам.

Размерные интервалы этих групп устанавливают либо по арифметическому, либо по геометрическому ряду, в зависимости от принятой методики последующего расче­та числа микрочастиц в единице объема и распределения их по размерам. Число хорд в каждой размерной группе относят к единице длины секущих прямых (мм).

Такие же измерения могут быть выполнены на мато­вом стекле камеры микроскопа, на микрофотографии или на проекции ее на экране эпидиаскопа. В этих слу­чаях хорды измеряют прозрачной миллиметровой линей­кой с учетом линейного увеличения изображе­ния структуры.

ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ НА ЕДИНИЦЕ ПЛОЩАДИ ШЛИФА

Геометрические элементы двумерной структуры мо­гут быть представлены на шлифе точками, линейными отрезками или фигурами сечений микрочастиц. Число таких элементов относят к единице пло­щади шлифа (мм2).

При визуальном наблюдении структуры подсчет це­лесообразно вести в несколько ограниченном поле зре­ния, так как структура по периферии поля зрения видна менее четко. Необходимо измерить с помощью объект-микрометра размеры и площадь поля зрения. Форма поля зрения при подсчете точек значения не име­ет, но подсчет числа отрезков или сечений микрочастиц нужно вести в поле, ограниченном прямыми линиями (квадрат, прямоугольник), так как при подсчете их в кру­ге имеется систематическая ошибка. Число подсчитывае­мых элементов в поле зрения не должно превышать 10—20, чтобы не сбиться со счета.

Для получения достоверной оцен­ки структуры шлифа в целом подсчет повторяют в не­скольких полях зрения и выводят среднюю величину. Таким образом, подсчитывают любые точечные эле­менты двумерной структуры — точки выхода дислокаций (ямки травления), точечные неметаллические включения на поперечном шлифе и т. п.

При определении числа сечений микрочастиц на еди­нице площади шлифа подсчитывают три категории таких сечений: ***х-***сечения, целиком попавшие внутрь участка шлифа, ограниченного квадратом (или прямоугольником); ***y-***се­чения, пересеченные линиями периметра квадрата, не считая тех, на которые попали точки вершин квадрата: ***z***-сечения, на которые попали точки вершин квадрата. Затем приведенное число сечений микрочастиц на пло­щади квадрата (или прямоугольника) рассчитывают по формуле

u = x + 0.5y + 0.25z ( 33 )

Разделив это число на площадь участка шлифа, ограниченного квадратом или прямоугольником, получают число сечений микрочастиц на единице площа­ди шлифа ***п***, мм -2.

Во всех случаях описанную процедуру подсчета нуж­но повторить в ряде полей зрения, чтобы получить досто­верную оценку структуры шлифа в целом.

При подсчете сечений на микрофотографиях или на матовом стекле камеры микроскопа есть возможность отмечать уже подсчитанные сечения.

ЧИСЛО ТОЧЕК НА ЕДИНИЦЕ ДЛИНЫ СЕКУЩЕЙ ЛИНИИ

Основное стереометрическое соотношение (14) позво­ляет определять суммарную площадь граничных поверх­ностей зерен или различных фаз в единице объема спла­ва по среднему числу пересечений случайной секущей линии с соответствующими граничными линиями на шлифе, отнесенному к единице ее длины ***m***, мм -1. При­меняют два варианта определения числа ***m.***

При пользовании методом неподвижного шлифа се­кущей линией является осевая линия линейки окуляра или другая линия, как показано на рис. 14. На рис. 14, а осевая линия линейки окуляра пересекла граничные ли­нии полиэдрической однофазной структуры в трех точках (на видимой половине линии). На рис. 14, *б* такими ли­ниями являются верхняя и нижняя границы черной полосы, которые пересекают граничные линии двух фаз структуры соответственно в шести и в четырех точках (на видимой половине линий). При ориентированных структурах числах точек пересечений секущих с гранич­ными линиями должны быть оценены по меньшей мере в двух направлениях: параллельном и перпендикулярном к направлению (оси) ориентации (рис. 14, *б*). Число пересечений параллельно оси ориентации равно 2, а пер­пендикулярно к оси 15.

Натуральную длину секущей линии в плоскости шли­фа определяют объект-микрометром и относят число подсчитанных точек к единице длины секущей. После подсчета в одном поле зрения смещают шлиф и повторяют во втором поле и т. д. до получения среднего числа пе­ресечений, характерного для всего шлифа в целом.

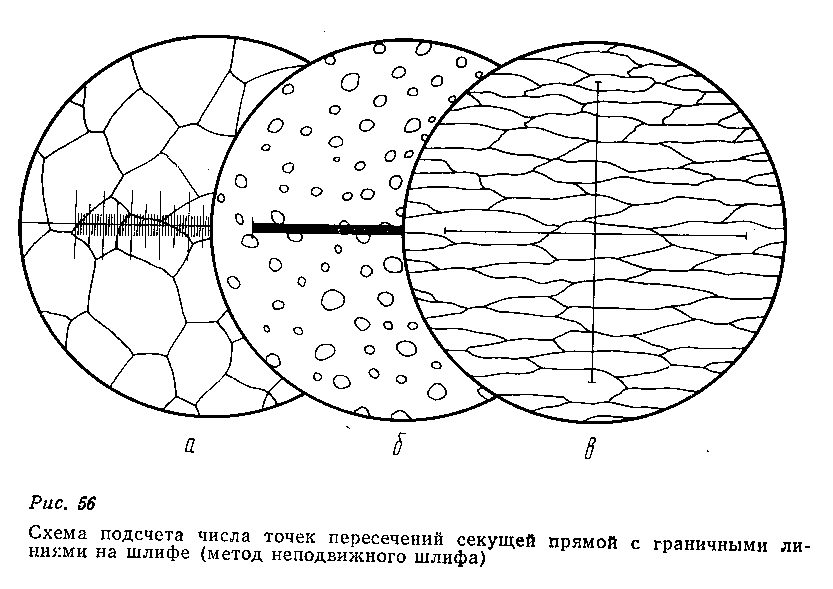


Рис. 14

Схема подсчета числа точек пересечений секущей прямой с граничными на шлифе(метод неподвижного шлифа)

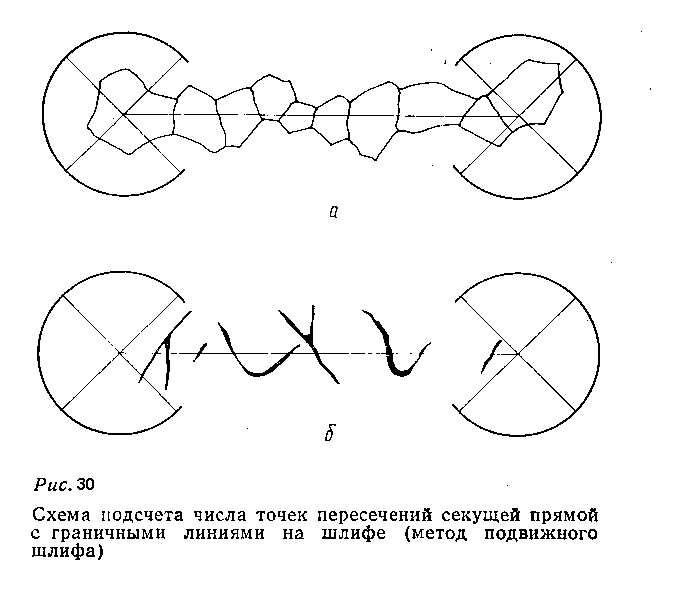


Рис. 15 - Схема подсчета числа точек пересечений секущей прямой с граничными линиями на шлифе (метод подвижного шлифа.

При анализе методом подвижного шлифа пользуются окуляром с крестом нитей. Шлиф медленно перемещают микрометрическим винтом столика микроскопа, одно­временно подсчитывая число линий границ, прошедших через точку перекрестия окуляра. Следовательно, секу­щей линией является путь этой точки через структуру, длина которого определяется показаниями микрометри­ческого винта столика микроскопа. Схематически такой подсчет показан на рис. 15, *а,* где точка перекрестия оку­ляра пересекает на своем пути линии границ зерен в 9 точках или линии границ графита и металлической основы чугуна в 18 точках (рис. 15,*б*). Метод подвижно­го шлифа удобен тем, что позволяет вести подсчет по длинной секущей, пересекающей шлиф от одного края до другого, причем натуральная длина секущей непосредст­венно отсчитывается микрометрическим винтом столика микроскопа.

Подсчет в отдельном поле зрения можно выполнить, пользуясь винтовым окуляром-микрометром AM 9-2. Число переходов точки перекрестия через линии границ подсчитывают при ее перемещении от од­ного края поля зрения до другого. В этом случае путь перемещения измеряют объект-микрометром.

19. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ МИКРОАНАЛИЗ

Определение достоверного значения любого из пара­метров двумерной структуры является длительным и трудоемким, так как требует измерения или подсчета сотен, а иногда и тысяч элементов структуры. Процедуру можно значительно облегчить и ускорить, применяя различные приспособления и устройства, механизирую­щие процесс количественного микроанализа. Для подсчета элементов микроструктуры на площади шлифа или на секущей линии раньше применяли механические или электри­ческие счетчики, связанные с механизмом, одновременно перемещающим столик микроскопа в новое положение.

Позднее такой анализ осуществлялся при помощи автоматических сканирую­щих телевизионных микроскопов, в которых глаз наблюдателя заменялся чувствительными электрон­ными устройствами, реагирующими на элементы микроструктуры и передающими команды для расчёта на соответст­вующие регистраторы и анализаторы. Одним из таких автоматических микроскопов был «Квантимет» производства Великобритании.

В настоящее время задача значительно упростилась в связи с использованием для этих целей персональных компьютеров. Изображение, зарегистрированное цифровой фотокамерой, загружается в компьютер и обрабатывается специальной программой. Таких программ разработано достаточно много, и они отличаются друг от друга функциональными возможностями. В результате за несколько десятков секунд определяется объёмная доля фаз, их средние размеры, строится гистограмма распределения частиц по размерам и рассчитывается погрешность измерения, коэффициент вариации и другие статистические характеристики.

Однако, следует отметить, что не все геометрические параметры микроструктуры удаётся определить с помощью компьютерного анализа. Например, для расчёта удельной поверхности и относительной удельной поверхности фаз или структурных составляющих сплава пока программ не создано.

V. СТРУКТУРНЫЙ (ФАЗОВЫЙ) ОБЪЕМНЫЙ СОСТАВ СПЛАВА

20. ПЛАНИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТАВА СПЛАВА ПО ОБЪЕМУ (М. ДЕЛЕСС)

Планиметрический метод основывается на первом основном стереомет­рическом соотношении (13). Согласно этому уравнению объемная доля структурной составляющей (или фазы) в сплаве равна доле площади, занимаемой ею на шлифе. Поэтому планиметрический метод сводится к измерению суммарной площади сечений микрочастиц данной струк­турной составляющей (или фазы) на определенной пло­щади металлографического шлифа (см. раздел 18 ).

Появившиеся позднее линейный и точечный методы определения объемного структурного состава, более удобные и производительные, чем планиметрический, сильно ограничили область при­менения последнего. Использование планиметрического метода оправдано только для составляющих, объем­ная доля которых в сплаве невелика (неметаллическая фаза, карбидная фаза заэвтектоидных сталей, графит­ная фаза в стали и чугуне, поры и т. п.), так как при этих условиях трудоемкость определения точечным и линей­ным методами выше .

Измерение суммарной площади заданной составляю­щей выполняют на определенной площади шлифа, кото­рую целесообразно ограничить квадратом или прямо­угольником. Измерив по отдельности площади всех сечений мик­рочастиц, целиком или частично попавших внутрь конту­ра квадрата, суммируют площади сечений, целиком на­ходящихся внутри периметра квадрата, половину площади тех сечений, которые перерезаны этим перимет­ром, и четвертую часть площади сечений, попавших на вершины квадрата.

Для определения объемной доли структурной состав­ляющей в сплаве, полученную по тому или другому ва­рианту, суммарную площадь сечений микрочастиц струк­турной составляющей внутри квадрата делят на площадь самого квадрата. Эту операцию повторяют в ряде участ­ков шлифа для получения оценки, характеризующей его структуру в целом.

По другому варианту площади сечений микрочастиц, имеющих форму, близкую к кругу, определяют по изме­ренным диаметрам сечений, но регистрируют соответст­вующие им площади. Измерения диаметров сечений вы­полняют в делениях шкалы окуляр-микрометра с линей­кой, при непрерывном перемещении шлифа по схеме, показанной на рис.13. Затем суммируют площади всех сечений микрочастиц, центры которых при движении шлифа прошли в пределах длины линейки окуляра. По­лученную площадь делят на площадь структуры, на которой измерены все сечения. Эта площадь равна длине линейки окуляра (100 делений), умноженной на прой­денный шлифом путь, выраженный в тех же единицах, т. е. в делениях линейки.

При всех вариантах планиметрического метода точ­ность и достоверность определения зависят от количе­ства измеренных сечений микрочастиц анализируемой составляющей. Абсолютная ошибка определения при весьма малом содержании анализируемой составляю­щей может быть рассчитана по формуле

 (34)

где ***ε*** —абсолютная ошибка определения, выражен­ная в долях объема сплава;

***t***  — нормированное отклонение;

***ΣV*** — доля объема сплава, занятая данной составляющей;

 — средняя площадь сечений микрочастиц;

***σ(F)*** — среднее квадратичное отклонение величи­ны ***F***;

***z*** — число измеренных сечений микрочастиц.

В формулу (34) входят величины, получаемые в про­цессе выполнения анализа, поэтому ее можно применять для оценки погрешности выполненного микроанализа.

21. ЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТАВА СПЛАВА ПО ОБЪЕМУ (А. РОЗИВАЛЬ)

Линейный метод основан на первом основном стереометри­ческом соотношении (13), согласно которому объемная доля структурной составляющей (или фазы) в сплаве равна доле длины секущей линии, проходящей через эту составляющую в объеме (или на шлифе). Поэтому линейный метод сводится к измерению и суммированию длин отрезков прямой линии, проходящей через данную структурную составляющую (или фазу), на определен­ной длине секущей прямой.

Измерение длин отрезков (линейный метод) по сравнению с планиметрическим значительно снижает трудоем­кость определения.

Простейший вари­ант применения линей­ного метода при визу­альном наблюдении структуры приведен на рис.16. Осевая линия линейки окуляр-микро­метра разделена на 100 частей. Суммарная длина отрезков этой линии, лежащих на структурной составля­ющей α (на рисунке заштрихована), при показанном положении линейки равна 42 делениям (12+2+19+9). Следова­тельно, по этому определению объемная доля составляю­щей α в сплаве равна 0,42, или 42%. Повторяя измерение в достаточно большом числе полей зрения, получаем ре­зультат требуемой точности и достоверности.

Если число составляющих больше двух, измеряют и суммируют длины отрезков осевой линии линейки для каждой составляющей в отдельности, получая в итоге до­ли объема каждой из них. При этом можно не измерять отрезки, лежащие на составляющей, объемная доля ко­торой является наибольшей - ее можно получить по разности, как дополнение до 100%.

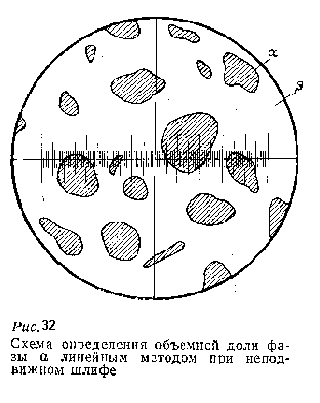


Рис. 16 - Схема определения объемной доли фазы ***α*** линейным методом при неподвижном шлифе

Точность линейного метода обусловлена числом из­меренных в процессе анализа отрезков (хорд). Она зави­сит также от объемной доли структурной составляющей, ее дисперсности и характера структуры.

Для вычисления абсолютной ошибки определения можно пользоваться полуэмпирической формулой

 (35)

где ***ΣV*** — объемная доля структурной составляющей в сплаве;

***t*** — нормированное отклонение;

***z*** — число измеренных при анализе отрезков (хорд);

***К*** — коэффициент, зависящий от характера струк­туры.

Нормированное отклонение ***t*** выбирают по табл. 2 в зависимости от требуемой доверительной вероятности ***P.***

22. ТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТАВА СПЛАВА ПО ОБЪЕМУ (А. А. ГЛАГОЛЕВ)

Точечный метод основан на первом основном соотношении (13) стереометрической металлографии. Сущность точеч­ного метода можно иллюстрировать следующим приме­ром.

На рис. 17 показана двухфазная структура с наложен­ной на нее квадратной сеткой, которая имеет 25 узловых точек. Из них 8 точек попали на участки шлифа, запятые фазой ***α*** (на рисунке заштрихованы). Следовательно, при данном положении сетки доля этой фазы равна 8/25 =0,32, или 32%. Повторные наложения сетки позволяют определить содержание фазы с любой необходимой точ­ностью и достоверностью.

Если число структурных составляющих больше двух, подсчитывают раздельно числа узловых точек, попавших на каждую из составляющих в отдельности. Эти числа, отнесенные к их сумме, покажут объемную долю каждой из структурных состав­ляющих в сплаве.

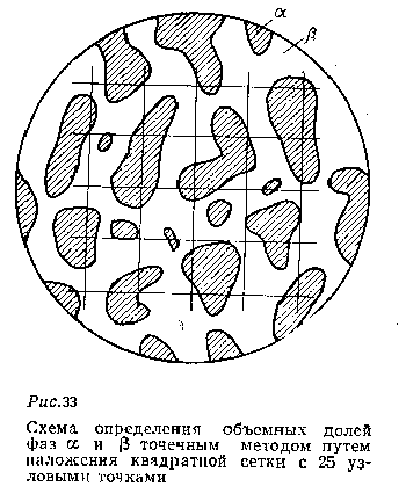


Рис. 17 - Схема определения объемных долей фаз ***α*** и ***β*** точечным методом путем наложения квадратной сетки с 25 узловыми точками

Точность полученного при точечном анализе результа­та обусловлена общим числом использованных точек и зависит от объемной доли анализируемой структурной составляющей в сплаве.

Теория вероятностей позволяет установить величину абсолютной погрешности определения ***ε,*** выраженную в долях площади шлифа или объема сплава:

 (36)

Как видно, формула (36) полностью совпадает с формулой (35) для линейного метода, если коэффициент ***К*** последней принять 1 (***z***- число точек).

Нормированное отклонение ***t*** определяет доверитель­ную вероятность полученного результата анализа в со­ответствии с формулой (10) и данными табл. 2.

23. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМ (ФАЗОВЫМ) СОСТАВОМ СПЛАВА ПО ОБЪЕМУ И ЕГО ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ ПО МАССЕ

Структурный объемный состав сплава связан с его химическим составом. В формулы, связывающие хими­ческий состав по массе и структурный (фазовый) состав сплава по объему, обязательно входят величины плотно­стей сплава и его структурных составляющих. Сопостав­ление химического состава с объемным структурным со­ставом позволяет взаимно проверить правильность дан­ных, полученных при химическом и стереометрическом анализах. Кроме того, такое сопоставление позволяет определять химический состав или плотность некоторых структурных составляющих, которые могут быть выделе­ны из сплава и исследованы отдельно.

Примем следующие обозначения химического состава и плотности отдельных структурных составляющих или фаз и их содержания в сплаве по массе и по объему:

Отдельные структурные составляю­щие (или фазы) сплава ***..…. α, β, γ***

Объемная доля структурных состав­ляющих в сплаве .....… ***∑V α , ∑V β, ∑V γ***

Содержание структурной составляющей в сплаве % (по массе)…***Gα, G β, Gγ***

Плотность структурных составляю­щих, г/см3 ......…… ……***dα, d β, dγ***

Содержание какого-либо элемента ***Э*** в структурной

составляющей, % (по массе) ..***Э α, Э β, Э γ***

.

Плотность сплава ***dc*** (г/см3) складывается из масс вcех его структурных составляющих, находящихся в единице объема сплава (в 1 см3). В свою очередь масса каждой из структурных составляющих в единице объема сплава равна ее объемной доле, умноженной на плотность этой составляющей. Поэтому

***dc = dα ∑Vα + d β ∑V β + dγ ∑V γ*** г/см3 (37)

Если в сплаве имеются поры или рассеянные пусто­ты различного происхождения, их также следует учиты­вать как самостоятельную составляющую с плотностью, практически равной нулю.

Если известен полный структурный состав сплава по объему, содержание любой из его структурных составля­ющих по массе определяют по формуле

 (38)

Многочлен в знаменателе формулы (38) представляет собой плотность самого сплава ***dc***. Поэтому, если плот­ность сплава известна по непосредственному эксперимен­тальному измерению (например, методом гидростатиче­ского взвешивания), можно пользоваться более простой формулой.

 (39)

Эта формула позволяет определить любую из трех величин — содержание структурной составляющей по массе ***Gα***., ее объемную долю ***∑Vα*** плотность ***dα,*** если известны две из этих величин и плотность самого сплава.

Интересующая нас структурная составляющая, вообще говоря, может не быть химическим элементом, а иметь сложный состав, являясь химическим соединением, твердым раствором или многофазным обра­зованием (эвтектикой, эвтектоидом). Пусть содержание какого-либо элемента в этой составляющей равно ***Э******α***% (по массе), содержание такого же элемента в сплаве ***Э***% (по массе), причем элемент полностью сосредоточен только в интересующей нас составляющей. Тогда содер­жание этой составляющей в сплаве, % (по массе), вхо­дящее в формулы (38) и (39), определим выражением

 (по массе) (40)

Ниже приведены плотности (г/см3) некоторых струк­турных составляющих железоуглеродистых сплавов, ко­торые могут быть использованы при расчетах по форму­лам (37)—(40):

Феррит................................. 7. 874

Цементит.............................. 7 .662

Графит................................. 2.216  
Перлит ................................ 7.848  
Фосфид железа .......................... 6.74  
Двойная фосфидная эвтектика ............... 7.14  
Сульфид железа (FeS) .....................4.30  
Сульфид марганца (MnS) ......................3.99  
Кремнезем (SiO2) ............................2,26—2,31  
Глинозем (Al2Os) ...................3,85-4,10  
Ортосиликат марганца (2MnO-SiO2) ..............3,58—3,70  
Силикат глинозема (Al2O3-SiO2) .................3,05  
Ортосиликат железа (2FeO-SiO2) ................4,35  
Окись магния (MgO) .........................3,50—3,65  
Закись марганца ............................4,73—5,50

VI. ПЛОЩАДЬ ГРАНИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА СПЛАВА (УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ)

24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ИЗОМЕТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ МЕТОДОМ СЛУЧАЙНЫХ СЕКУЩИХ (С. А. САЛТЫКОВ)

Метод случайных секущих основан на втором стерео­метрическом соотношении (15), согласно которому сум­марная площадь поверхностей в единице объема (удель­ная поверхность) равна удвоенному числу точек пересе­чений случайных секущих линий с этими поверхностями, отнесенному к единице длины секущих:

**ΣS= 2m** мм2/мм3,

где **ΣS** — удельная поверхность, мм2/мм3;

**m** — среднее число точек пересечений, мм.

Основное соотношение (15) действительно для лю­бой системы пространственных поверхностей независи­мо от их формы, расположения и ориентации, при условии, что секущие линии ориентированы в пространстве случайно.

При анализе реальных структур по единственному шлифу это требование выполняется только в том случае, когда анализируемая система граничных поверхностей пространственно изометрична.

Если граничные поверхности как-либо ориентирова­ны в пространстве, число пересечений **m** зависит от на­правления и теоретически требуется бесконечно большое число шлифов, плоскости которых различно ориентированы в объеме сплава.

Применяя метод случайных секущих, прежде всего, следует убедиться в том, что анализируемая система граничных поверхностей действительно пространственно изометрична, что далеко не всегда можно заключить по одному шлифу.

Процедура подсчета точек пересечений секущих ли­ний с линиями границ по методу неподвижного шлифа показана на рис. 14, *а* и *б*. Как уже было сказано ранее, секущая линия не обязательно долж­на быть прямой. Удобно пользоваться секущими в виде окружности или спирали. Натуральную длину секущей, при­веденную к плоскости шлифа, определяют объект-микро­метром.

Подсчет точек по методу подвижного шлифа показан на рис. 15 для однофазной (*а*) и двухфазной (*б)* струк­тур. Длина секущей в этом случае равна пути переме­щения точки перекрестия окуляра по структуре, который регистрируется микрометрическим винтом столика мик­роскопа.

Относительную погрешность определения числа **m** или удельной поверхности **∑S**, выраженную в процентах, находят в зависимости от общего числа подсчитанных точек пересечений **х*,*** пользуясь формулой

 (41)

где ***t*** — нормированное отклонение;

***К*** — коэффициент.

Коэффициент ***К*** зависит от характера структуры (равномерности распределения граничных поверхностей в объеме образца и граничных линий, на площади шлифа, наличия ориентации поверхностей), от формы секу­щей линии (прямая, окружность, спираль), от равномер­ности распределения секущих линий по площади шлифа и др.

Минимальное значение коэффициента **К**, равное при­мерно 0,5 получается при анализе в единичном поле зре­ния, при круговой и спиральной секущей и при равно­мерном распределении линий границ в поле зрения. При анализе по всей площади шлифа коэффициент **К** можно принять равным единице.

Раздельное определение числа **m** в отдельных полях зрения иногда целесообразно в том случае, когда хотят изу­чить распределение удельной поверхности по сечению объекта — вдоль диаметра или по толщине.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ПРОЕКЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

Если определение удельной поверхности выполняют не по структуре шлифа, а по проекционному изображе­нию, получаемому при просвечивании структуры тонкого среза или фольги электронным лучом, следует иметь в виду возможность наложения проекций поверхностей друг на друга.

Рассмотрим случай изометрической системы поверх­ностей, когда характер структуры позволяет надежно установить наличие и кратность наложения проекций поверхностей в каждой точке проекционного изображе­ния. Каждую такую точку можно рассматривать как се­кущую прямую, направленную перпендикулярно к плос­кости среза, имеющую длину, равную толщине среза ***t***. Просуммируем числа наложенных одну на другую про­екций поверхностей, например в 100 точках проекционного изображения, равномерно распределенных по его площади. Полученная сумма, деленная на 100***t***, равна, очевидно, среднему числу пересечений случайных секу­щих с поверхностями системы, на единице длины секу­щих ***m*** мм-1. Поскольку система поверхностей изометрична, удельную поверхность рассчитываем по основной формуле (14).

К сожалению, кратность наложения в большинстве случаев нельзя установить и тогда величину удельной поверхности можно определить по проекционному изо­бражению только при некоторых допущениях и ограни­чениях.

Рассмотрим систему выпуклых неравновеликих мик­рочастиц, находящихся в матрице. Если объемная доля микрочастиц в сплаве невелика (несколько процентов), а толщина среза мала (порядка поперечника микрочас­тиц), наложением (перекрыванием) проекций микро­частиц можно пренебречь без существенного ущерба для точности определения. В данном случае удельную поверхность микрочастиц можно определить по формуле (28).

Планиметрическим, линейным или точечным метода­ми измеряют площадь проекций микрочастиц на едини­це площади проекционного изображения **ΣF′*,*** мм2/мм2 и затем, зная толщину среза **t**, определяют удельную по­верхность по формуле (28).

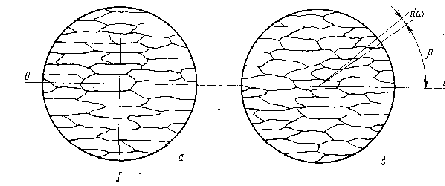
25. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ГРАНИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННЫХ СЕКУЩИХ (А. Г. СПЕКТОР)

Второе основное соотношение (14) является универ­сальным и справедливым для любой системы поверхно­стей. Однако применение его при неизометрических (ориентированных) системах поверхностей затрудняет­ся тем, что число пересечений на единице длины секу­щей зависит от ее направления. Чтобы воспользоваться в этих случаях формулой (14), необхо­димо определить величину т по нескольким шлифам, плоскости которых различным образом равномерно ори­ентированы в объеме сплава.

Задача существенно облегчается, если система гра­ничных поверхностей имеет пространственную ось сим­метрии, что очень часто наблюдается в реальных струк­турах. Напомним, что при наличии оси симметрии двумерная структура тождественна на всех шлифах, плоскости которых проходят через ось симметрии. Отсю­да следует, что при наличии оси симметрии можно огра­ничиться одним единственным шлифом, плоскость которого должна проходить через эту ось.

Ось симметрии имеет система граничных поверхно­стей с линейной ориентацией. Эта ось совпадает с осью ориентации структуры. Такая структура типична для прокатанных или калиброванных прутков и для прово­локи сечением, близким к круглому, для отливок ци­линдрической формы и т. п. Во всех этих случаях оси симметрии и линейной ориентации структуры совпадают с осевыми линиями изделий. Структура, наблюдаемая на продольных шлифах, плоскости которых проходят через осевую линию, статистически тождественна.

Ось симметрии имеет также система граничных по­верхностей с плоскостной ориентацией. Та­кая структура типична для листового проката с равноосным зерном в плоскости листа, для отливок типа плит или пластин и т.п. На любом шлифе, плоскость которого перпендикулярна к плоско­сти листа или плиты, структура статистически тождест­венна, следовательно, ось симметрии структуры перпендикулярна к плоскости листа или плиты, т. е. к плоскости ориентации структуры.

Рис.18 - Схема структур, имеющих симметрию:

*а*- плоскостная ориентации (0 – 0 – плоскость симметрии перпендикулярна к плоскости рисунка), I – I – ось симметрии;

*б* - линейная ориентация (0 – 0 линейная ориентации и ось симметрии совпадают)

*а* *б*

На рис. 18 показаны структуры с плоскостной (*а*) и линейной (*б)* ориентацией граничных поверхностей, ось симметрии, плоскость и ось ориентации этих структур. Рассмотрим систему поверхностей, имеющих линей­ную ориентацию и ось симметрии структуры, совпадающую с осью ориентации (рис. 18, *б*). На секущих, пер­пендикулярных к оси симметрии, число пересечений яв­ляется наибольшим, а на секущих, параллельных этой оси — наименьшим. Число пересечений на отдельной се­кущей является функцией угла β, образуемого секущей прямой с осью симметрии структуры О—О, тогда после преобразований получим:

 (42)

Последнее выражение является рабочей формулой для измерения удельной поверхности систем граничных поверхностей с осевой симметрией.

Для практического применения формулы (42) используют шлифы, плоскость которых проходит через ось симметрии структуры. Для изделий, полученных прокат­кой или волочением, имеющих равноосный профиль се­чения, плоскость шлифа должна проходить через осевую линию прутка или проволоки, которая и является осью симметрии структуры. В случае листового проката плоскость шлифа располагают перпендикулярно к поверх­ности листа, к которой в свою очередь перпендикулярна ось симметрии структуры.

На шлифе проводят несколько групп взаимно парал­лельных секущих прямых, причем в каждой группе со­храняют определенный угол между осью симметрии и направлением секущих данной группы. В числе выбран­ных направлений секущих обязательно должны быть перпендикулярное и параллельное оси симметрии на­правления. Кроме них, берут еще несколько направле­ний, число которых определяется необходимостью полу­чения плавного хода кривой при графичес­ком построении. Для секущих каждой группы раздельно подсчитывают средние числа пересечений на 1 мм их длины. По полученным данным строят график в коорди­натах: косинус угла ***β*** между секущими и осью симметрии — среднее число пересечений в данном направлении ***mβ*** . Затем выполняют графическое интегрирование - определяют площадь под построенной кривой на графи­ке, которая и будет равна среднему числу пересечений, или половине величины удельной поверхности, определяемой формулой (42). Удвоив найденную величину, находим искомую удель­ную поверхность.

Точность определения удельной поверхности по ме­тоду направленных секущих зависит от общего числа точек пересечений, подсчитанных в процессе анализа на секущих всех направлений. Относительную ошибку по­лученного результата определяют по формуле (41).

26. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО КОНТУРА (А. Г. СПЕКТОР)

Изложенный ниже метод, как и предыдущий, пред­назначен для систем поверхностей, имеющих простран­ственную ось симметрии. В данной методике подсчиты­вают число пересечений граничных линий на шлифе с линейным контуром, который определенным образом на­кладывается на структуру. Применение такого контура в качестве секущей линии позволяет отказаться от про­цедуры подсчета средних чи­сел пересечений на секущих разного направления и от графического интегрирова­ния, описанных в разделе 25. Подсчет числа пересечений вдоль линии контура непо­средственно определяет зна­чение числа m, усредненное для всех направлений секу­щих, которое можно подставить в формулу (14).

Для этого случая число точек пересечений m рассчитывается по формуле:

, (43)

где ***М*** — общее число пересечений по всей длине ***L*** секущей кривой.

В качестве секущего линейного контура использу­ют овал, составленный из двух арок циклоиды. Такой контур показан на рис. 19. Его графическое построение может быть выполнено по координатам точек контура, приве­денным ниже

±***x***  ……………0.00 0.10 0.20 0.40 0.60 0.80 0.90 1.00

±***y***……………..1.57 1.54 1.50 1.38 1.17 0.87 0.62 0.00

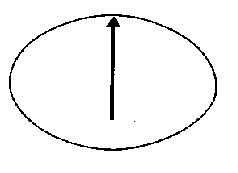


Рис. 19 - Секущий линейный контур, составленный из двух арок циклоиды. Периметр контура равен учетверенной длине его малой оси (А.Г. Спектор)

Периметр такого секущего контура (овала) равен учетверенной длине его малой оси. Контур может быть выполнен в виде окулярной вставки для непосредственного подсчета числа пересече­ний контура с линиями границ при визуальном наблю­дении структуры. При помощи объект-микрометра изме­ряют длину малой оси овала и, умножив ее на четыре, получают длину секущего контура, приведенную к пло­скости шлифа.

Контур можно выполнить также на прозрачном ма­териале в виде накладного шаблона для измерений на микрофотографии или на матовом стекле камеры микро­скопа.

Микроанализ структуры выполняют на продольном осевом сечении металла или сплава, структура которого имеет осевую симметрию (например, металла, получен­ного прокаткой, волочением, калибровкой). Контур на­кладывают на структуру многократно, причем положе­ние его на структуре должно быть случайным и равномерно распределенным по всей площади шлифа. Но направление контура должно быть строго определен­ным — направление малой оси контура, показанное стрел­кой на рис.19, всегда должно совпадать с осью симмет­рии анализируемой системы поверхностей. Подсчет точек пересечений контура с граничными линиями ведут, начи­ная от точки, отмеченной острием стрелки, вдоль линии контура (обычно по движению часовой стрелки). Число наложений контура должно быть достаточным для по­лучения общего числа точек пересечений, обеспечиваю­щего необходимую точность и достоверность анализа. Это число находят по формуле (41).

Подсчитанное число точек относят к суммарной дли­не секущих контуров (произведение длины периметра контура на число его наложении на структуру) и полу­чают среднее число пересечений **m**. Затем по второму основному соотношению (14) находят удельную поверх­ность **ΣS**.

27. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛНОСТЬЮ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННЫХ СЕКУЩИХ

Поверхности полностью ориентированной системы в любой своей части и в целом параллельны оси или пло­скости ориентации. В первом случае система имеет пол­ностью линейную ориентацию, во втором — полностью плоскостную.

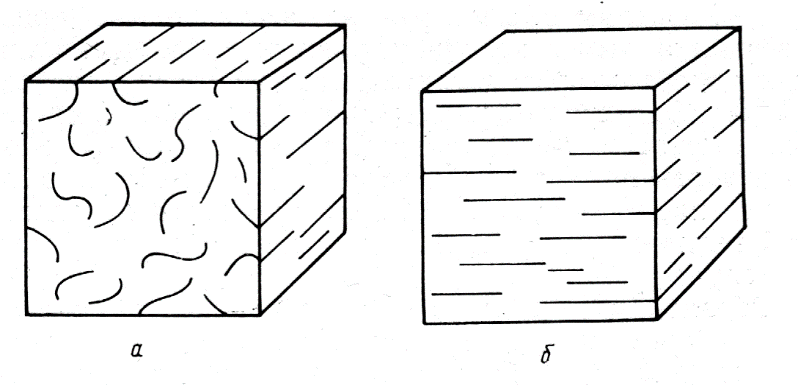


Рис. 20 - Схемы систем плоскостей, имеющих полную линейную (*а*) и полностью плоскостную (*б*) ориентации

На рис. 20*,а* схематически показана система поверх­ностей, параллельных горизонтальной оси ориентации, находящихся внутри кубического участка структуры с ребрами, равными 1 мм. На сечении, плоскость которого перпендикулярна к оси ориентации, мы видим следы по­верхностей в виде случайно ориентированных линий (изометрическая система линий). На сечениях, плоскость которых параллельна оси ориентации, эти следы взаимно параллельны и параллельны этой оси.

Разделим рассматриваемый куб равноотстоящими сечениями, перпендикулярными к оси ориентации. Рас­стояние между сечениями ***∆*** выбираем весьма малым, число таких сечений, очевидно, составит **1/∆=z*.*** Обозначим суммарную длину линий следов на каждом сечении через **∑Р1, ∑Р2 ,…, ∑Рz**.

После преобразований окончательно получим:

**∑S=∑Р⊥**мм2/мм3,(44)

т. е. удельная поверхность полностью линейно ориенти­рованной системы численно равна плотности линий сле­дов поверхностей на шлифе, плоскость которого перпен­дикулярна к оси ориентации системы. Определив эту плотность методом случайных секущих по формуле (45),

 мм/мм2 ,(45)

находим ***∑S*** по формуле (44).

На рис. 20,*б* схематически показана система поверх­ностей, параллельных горизонтальной плоскости ориен­тации. На сечениях, перпендикулярных к плоскости ориентации, следы поверхностей системы наблюдаются в виде горизонтальных линий.

Удельную поверхность системы поверхностей, имеющих полностью плоскостную ориентацию, определяют равенством

**∑S =m⊥**мм2/мм3 ,  (46)

где **m⊥*-*** среднее число пересечений на секущих, перпен­дикулярных к плоскости ориентации.

Полностью ориентированные системы граничных по­верхностей в металлических сплавах наблюдают срав­нительно редко. Примерами их могут служить структу­ры отдельных зерен ориентированной стержневой или ориентированной пластинчатой эвтектики (эвтектоида). Почти полностью линейно ориентированы поверхности пластичных неметаллических включений прокате равноосного сечения, а в листовом прокате они имеют почти полную плоскостную ориентацию.

28. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СТЕПЕНИ ОРИЕНТАЦИИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННЫХ СЕКУЩИХ (С. А. САЛТЫКОВ)

Точные методы определения удельной поверхности, рассмотренные выше, применимы к изометрическим сис­темам поверхностей и к системам, обладающим про­странственной осью симметрии, т. е. имеющим либо линейную, либо плоскостную ориентацию (см. рис. 5, *б* и *в*). Они неприменимы к системам поверхностей, имею­щим плоскостно-линейную ориентацию; (см. рис.5*, г*). Кроме того, определяя величину удельной поверхности, эти методы не позволяют оценить степень ориентации граничных поверхностей (линейной или плоскостной). Между тем степень ориентации граничных поверхностей обычно обусловлена процессом пластического деформи­рования и поэтому представляет большой интерес.

Рассматриваемый ниже метод позволяет определить не только величину удельной поверхности при всех трех основных видах ориентации поверхностей (см. рис. 5, *б—г*), но и степень ориентации поверхностей по видам ориентации. Хотя этот метод и не является стро­гим, точность получаемых результатов обычно вполне удовлетворяет требованиям практики стереометрическо­го микроанализа.

Граничные поверхности ориентированных систем име­ют преимущественную направленность в пространстве, будучи в какой-то части параллельными линии или плос­кости ориентации (или и той, и другой вместе). Рас­членим поверхности системы на весьма малые элемен­тарные площадки, которые мы можем считать плоскими, сохраняя их пространственную ориентацию. Допускаем, что элементарные площадки реальной системы гранич­ных поверхностей можно без остатка разделить на две или три группы, в первой из которых площадки ориен­тированы беспорядочно (изометрически), во второй группе они параллельны линии ориентации, а в треть­ей — параллельны плоскости ориентации (одна из двух последних групп может отсутствовать). На этом допу­щении и основан метод направленных секущих, который позволяет определять величину удельной поверхности и степень ее линейной и плоскостной ориентации в про­странстве.

ЛИНЕЙНО - ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОВЕРХНОСТЕЙ

В соответствии с исходными допущениями принима­ем, что некоторая часть элементарных площадок распо­ложена параллельно оси линейной ориентации, тогда как остальные площадки ориентированы в пространстве случайно, т. е. представляют собой изометрическую сис­тему поверхностей. Рассмотрим структуру шлифа, плос­кость которого совпадает с осью ориентации (продоль­ный осевой шлиф прокатанного прутка, проволоки и т.п.).

Направим первую группу секущих прямых строго па­раллельно оси ориентации. Линейно ориентированные элементарные площадки также расположены параллель­но этой оси, поэтому пересечение их секущими выбран­ного направления невозможно. Следовательно, такие ли­нии пересекут лишь те площадки, которые составляют изометрическую долю поверхностей системы.

Обозначим среднее число пересечений на единице длины секущих, параллельных оси ориентации, через ***m ||.***

Вторую группу секущих на том же шлифе направим строго перпендикулярно к оси ориентации и обозначим среднее число пересечений на секущих этого направле­ния через ***m ⊥*** . Отметим, что на поперечном шлифе, пло­скость которого перпендикулярна к оси ориентации, среднее число пересечений на единице длины секущих также равно ***m ⊥,*** поскольку секущие второй группы яв­ляются радиальными линиями на поперечном шлифе.

Секущие второй группы пересекут элементарные пло­щадки как изометрической, так и ориентированной доли граничных поверхностей системы.

В соответствии с приведенным ранее равенством (44) линейно ориентированная доля удельной поверхности равна

 мм2/мм3 (47)

Степень линейной ориентации поверхностей ***αлин*** мо­жет быть вычислена как отношение линейно ориентиро­ванной доли удельной поверхности к ее суммарной вели­чине, выраженное в процентах. Вычисление выполняют по формуле

 % (48)

ПЛОСКОСТНО ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОВЕРХНОСТЕЙ

Согласно сделанному нами допущению считаем, что в плоскостно ориентированной системе поверхностей часть элементарных площадок расположена параллель­но плоскости ориентации, а остальные площадки ориен­тированы в пространстве беспорядочно, представляя со­бой изометрическую систему поверхностей. Такая ори­ентация граничных поверхностей типична для листового проката, имеющего равноосное зерно в сечениях, парал­лельных плоскости листа (см. рис. 5*, 6*). Рассмотрим структуру шлифа, плоскость которого перпендикулярна к плоскости листа (плоскости ориентации).

Первую группу секущих прямых располагаем парал­лельно плоскости ориентации, т.е. к плоскости листа. Поскольку ориентированные элементарные площадки расположены параллельно плоскости ориентации, они не могут пересекаться секущими первой группы, также ей параллельными. Следовательно, такие секущие могут пересекать только те элементарные площадки, которые составляют изометрическую долю граничных поверхностей. Среднее число пересечений на единице длины секущих, параллельных плоскости ориентации, обозначим ***m ||..***

Вторую группу секущих располагаем перпендикуляр­но к плоскости ориентации, обозначив среднее число пе­ресечений на единице их длины ***m ┴*** .

Учитывая эти допущения, общая величина удельной поверхности, слагаемая изометрической и ори­ентированной долями системы, равна:

 мм2/мм3 (49)

Степень плоскостной ориентации определяется как отношение плоскостно ориентированной доли поверхно­стей к полной удельной поверхности, выраженное в про­центах:

 (50)

ПЛОСКОСТНО-ЛИНЕЙНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ГРАНИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При плоскостно-линейной ориентации (см. рис. 5, *г*) система поверхностей имеет плоскость ориентации и ось ориентации, параллельную этой плоскости. Подобная ориентация наблюдается в полосе или ленте, в которой зерна имеют плоскость парал­лельную плоскости полосы или ленты, однако не равноосны, а вытянуты в направлении их длины, яв­ляющейся одновременно осью ориентации.

Плоскостью ориентации являются плоскости полосы, ленты или листа.

В подобной системе поверхностей существуют три группы эле­ментарных площадок: площадки первой группы парал­лельны как плоскости, так и оси ориентации; площадки второй группы параллельны только оси ориентации, об­разуя с плоскостью ориентации всевозможные углы, каждый из которых равновероятен; площадки третьей группы ориентированы в пространстве случайно, образуя изометрическую долю граничных поверхностей.

Получить полное количественное представление о пространственной структуре такой системы поверхно­стей по одному шлифу нельзя. Необходимы два шлифа, плоскости которых перпендикулярны к плоскости ориен­тации, т. е. к плоскости полосы, ленты или листа. Но плоскость первого шлифа, называемого продольным, па­раллельна оси ориентации (длине полосы, ленты или ли­ста), а плоскость второго шлифа, называемого попереч­ным, перпендикулярна к той же оси.

Поскольку в рассматриваемой системе поверхностей имеются два вида ориентации, то для определения площади трех групп элементарных площадок в единице объема нуж­но раздельно определить средние числа пересече­ний с каждой из трех групп элементарных площадок, составляющих плоскостно-линейную систему поверх­ностей.

На продольном шлифе проведем группу секущих пря­мых, параллельных плоскости ориентации (плоскости полосы), которые одновременно будут параллельны и оси ориентации, поскольку плоскость продольного шли­фа также ей параллельна. Среднее число пересечений на единице длины таких секущих обозначим  ***m ||..***

Вторую группу секущих проводим также параллель­но плоскости ориентации (плоскости полосы), но на по­перечном шлифе, плоскость которого перпендикулярна к оси ориентации (к длине полосы). Среднее число пере­сечений на единице длины таких секущих обозначим ***m | .***

Третью группу секущих располагаем перпендикуляр­но к плоскости и к оси ориентации (т. е. к плоскости по­лосы), что можно выполнить на любом из двух шли­фов — продольном или поперечном. Секущие третьей группы пересекут элементарные площадки всех видов ориентации, среднее число пересечений с которыми на единице длины секущих обозначим ***m ⊥.***

Полную удельную поверхность найдем как сумму ее различно ориентированных долей.

мм2/мм3  (51)

Степень ориентации каждого вида по отдельности находим как отношение соответствующей доли удельной поверхности к ее полной величине, определяемой равен­ством (51), выраженное в процентах.

29. ОРИЕНТАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРАНИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Число пересечений секущей прямой с граничными поверхностями на единице ее длины показывает плот­ность расположения этих поверхностей в направлении ориентации секущей. Как было показано выше, свойства металлов и сплавов в решаю­щей степени обусловлены плотностью граничных поверх­ностей в единице их объема. Поэтому анизотропия свойств металлов и сплавов в той же степени опреде­ляется изменением плотности граничных поверхностей в зависимости от направления.

Наиболее наглядную характеристику изменения плотности расположения граничных поверхностей в за­висимости от направления дает «роза числа пересечений m», которая показывает число пересечений на едини­це длины секущей прямой для ее любого направления на плоскости шлифа или в пространстве.

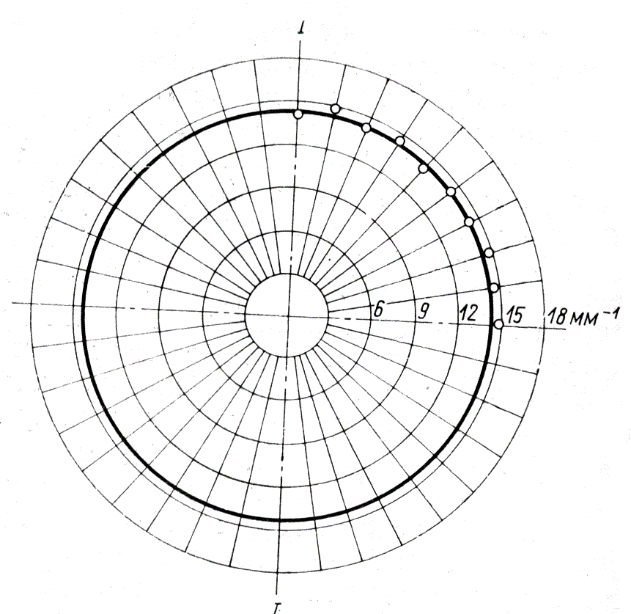
Экспериментальное построение розы числа пересече­ний для плоскости шлифа весьма несложно. На шлифе или на микрофотографии проводят группу параллельных секущих, образующих определенный угол ***β*** с осью ори­ентации, если ее направление определяется визуальным наблюдением или топографией плоскости шлифа. Так, например, на продольном шлифе прутка или проволоки ось ориентации совпадает с их геометрической осью. Определив среднее число пересечений в данном направ­лении ***mβ*** мм-1, проводят следующую группу секущих, но уже в другом направлении и т. д.

Рис. 21 - Роза числа пересечений изометрической системы граничных поверхностей феррита: I-I ось симметрии пространственной розы

Получив ряд сред­них чисел пересечений для многих направлений на пло­скости строим розу числа пересечений в полярных коор­динатах. Для этого из точки начала координат проводим радиусы-векторы, образующие с осью О—О такие же углы, какие образовывали отдельные группы секущих с осью ориентации. Длина каждого радиуса-вектора вы­ражает в определенном масштабе средние числа пересе­чений для соответствующих направлений секущих. За­тем концы радиусов-векторов соединяют плавной кри­вой, которая и является розой числа пересечений.

Роза числа пересечений для полиэдрической структу­ры почти чистого железа с равноосным зерном феррита показана на рис. 21. Круговая форма розы показывает, что система линий границ феррита в плоскости шлифа действительно изометрична. Ясно, что при пространственно изо­метрических системах граничных поверхностей роза чи­сла пересечений имеет форму сферы.

Совсем другую форму имеет роза числа пересечений, построенная аналогичным образом для системы линий границ зерен кремнистого феррита листовой трансфор­маторной стали на шлифе, плоскость которого перпен­дикулярна к плоскости листа и параллельна направле­нию прокатки (длине листа). В этом случае ось О—О полярных координат совпадает с плоскостью листа. По­казанная на рис.22 роза числа пересечений имеет один максимум в направлении, перпендикулярном к плоско­сти ориентации (к плоскости листа), и один минимум в направлении, совпадающем с плоскостью ориентации. Поскольку в данном случае ось симметрии структуры перпендикулярна к плоскости ориентации (см. рис. 18, *а*), пространственную розу числа пересечений получаем, вращая розу вокруг ее вертикальной оси, т. е. вокруг оси симметрии структуры.

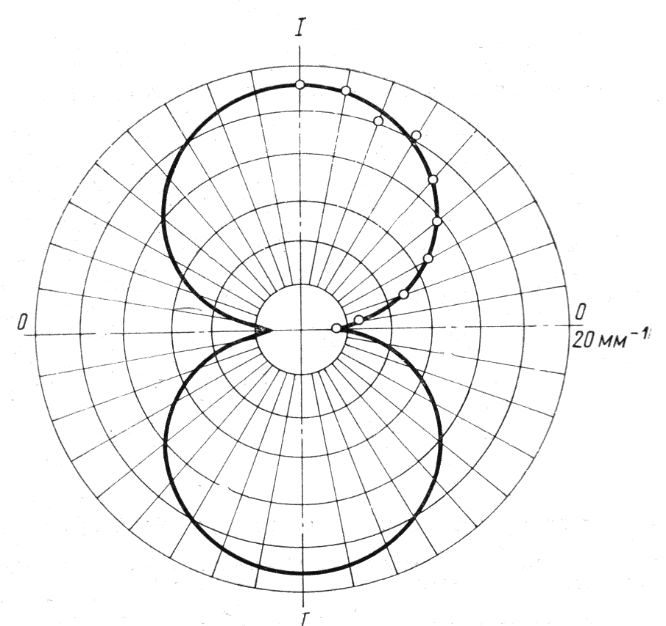


Рис. 22 - Роза числа пересечений граничных поверхностей кремнистого феррита листовой трансформаторной стали: 0-0 - плоскость ориентации (перпендикулярна к плоскости рисунка); I-I – ось симметрии структуры и пространственной розы

Для изометрической доли граничной поверхности ро­за числа пересечений представляет сферу с центром в начале полярных координат, радиус которой равен среднему числу пересечений секущих с изометрической долей поверхностей — в данном случае оно равно ***m║.*** Для полностью ориентированной параллельно плоскости ориентации доли граничных поверхностей роза числа пересечений изображается двумя сферами, соприкасаю­щимися друг с другом в точке начала координат. Диа­метр сфер равен среднему числу пересечений на секу­щих, перпендикулярных к плоскости ориентации, в данном случае оно равно разности ***m ┴ - m ║* .**

30. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФАЗ СПЛАВА И УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Относительной удельной поверхностью фазы сплава называют суммарную площадь поверхности ее микроча­стиц, отнесенную к суммарному объему этих микроча­стиц (в отличие от абсолютной удельной поверхности, которая равна суммарной площади поверхности микро­частиц, отнесенной к единице объема сплава). Поэтому для определения относительной удельной поверхности фазы следовало бы экспериментально найти удельную поверхность этой фазы в единице объема сплава ***∑Sα*** и объемную долю фазы в единице объема сплава ***∑Vα***. Отношение первой величины ко второй определило бы относительную удельную поверхность фазы ***Sα.***

Такой подход к определению относительной удельной поверхности фазы, однако, нецелесообразен, так как при измерении удельной поверхности методом случайных се­кущих и доли объема фазы точечным или линейным ме­тодом измеряют различные микрочастицы этой фазы, что снижает точность полученного результата. Проще и точнее описанная ниже методика непосредственного определения относительной удельной поверхности фазы путем комбинированного одновременного использования вышеупомянутых методов, так как в этом случае изме­рения обоих параметров выполняют на одних и тех же микрочастицах. При этом величину удельной поверхно­сти измеряют методом случайных секущих, а одновре­менное измерение доли объема можно производить либо точечным методом, либо линейным.

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ СЛУЧАЙНЫХ СЕКУЩИХ В КОМБИНАЦИИ С ТОЧЕЧНЫМ МЕТОДОМ

Структуру наблюдают в окуляр с квадратной сеткой. Используемое увеличение должно быть тем большим, чем дисперснее фаза. Схема наложения квадратной сет­ки на структуру показана на рис. 23. Горизонтальные и вертикальные линии окулярной сетки мы рассматри­ваем как случайные секущие линии. Они пересекают поверхности микрочастиц данной фазы в ряде точек, которые обозначены на рис. 23 светлыми кружками. Число таких точек, отнесенное к единице длины секущих прямых, определяется, как известно, суммарной поверх­ностью микрочастиц фазы в единице объема сплава ***∑Sα.*** Применяя вторую основную формулу (14), полу­чаем суммарную поверхность микрочастиц фазы ***α*** в еди­нице объема сплава:

мм2/мм3 , (52)

где ***L*** — суммарная длина линий окулярной сетки, при­веденная к плоскости шлифа, мм;

***z***—число точек пересечений секущих линий оку­лярной сетки с поверхностями микрочастиц фазы ***α***.

В том же поле зрения узловые точки окулярной сет­ки частично попадают на площади сечений микрочастиц фазы ***α.*** На рис. 23 эти точки показаны черными кружка­ми. Относительное число узловых точек, попавших на сечения микрочастиц фазы ***α,*** определяется, как извест­но, объемной долей этой фазы в сплаве ***∑Vα*** . Поэтому суммарный объем микрочастиц фазы ***α*** в единице объема сплава определим первой основной формулой (20):

 мм3/мм3  (53)

где ***Х***—общее число узловых точек квадратной сетки окуляра;

***х***— число узловых точек сетки, попавших на пло­щади сечений микрочастиц фазы **α** в одном поле зрения.

В соответствии с определением понятия относитель­ной удельной поверхности фазы величину ее находят как отношение **∑Sα** к ***∑Vα***, т.е.:

мм2/мм3  (54)

В равенстве (54) величина ***2Х/L*** — постоянный коэф­фициент при данных условиях анализа, который опреде­ляется увеличением микроскопа, размерами и числом яче­ек квадратной сетки окуляра. Этот коэффициент следует вычислить заранее, измерив длину линий окулярной сет­ки объект-микрометром. Величины ***z*** и ***х*** могут сильно различаться в разных полях зрения из-за неравномерно­сти расположения микрочастиц фазы ***α*** в объеме сплава, но отношение этих величин, входящее в формулу (54), намного стабильнее и является статистически посто­янным.

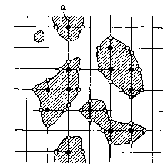


Рис. 23 - Схема определения относительной удельной поверхности методом случайных секущих в комбинации с точечным методом.

Подсчет точек обеих групп, характеризующих вели­чину поверхности фазы (светлые кружки на рис. 23) и ее относительный объем (черные кружки на рис. 23), ведут параллельно, в одних и тех же полях зрения, на одних и тех же сечениях микрочастиц фазы ***α***. Этим обеспечивается более высокая точность определения относительной удельной поверхности ***Sα***, чем при раз­дельном определении значений ***∑Sα*** и ***∑Vα*** .

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ СЛУЧАЙНЫХ СЕКУЩИХ В КОМБИНАЦИИ С ЛИНЕЙНЫМ МЕТОДОМ

На видимой в микроскоп структуре проводят ряд се­кущих прямых, как показано на рис. 24. Они могут от­стоять друг от друга на разном расстоянии и не быть параллельными. Пересекая микрочастицы фазы ***α,*** секущие образуют ряд точек пересечений с поверхностями микрочастиц (обозначены на рисунке кружками) и ряд хорд, выделенных на рисунке жирными линиями.

Обозначим суммарную длину секущих прямых че­рез ***L***, число полученных на этой длине хорд (отрезков) через ***z*** и их среднюю длину - через .

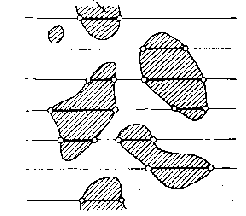


Рис. 24 - Схема определения относительной удельной поверхности методом случайных секущих в комбинации с линейным методом.

В результате простых преобразований получаем искомую ве­личину относительной удельной поверхности фазы ***α***:

 мм2/мм3 (55)

Из формулы (55) следует, что относительная удельная поверхность фазы однозначно определяется величиной средней хорды, получаемой при многократном пересечении микрочастиц данной фазы случайными секу­щими.

При определении относительной удельной поверхно­сти фазы с помощью обычного микроскопа используют окуляр с линейкой. Увеличение должно быть большим, чтобы средняя длина хорды равнялась, по меньшей мере, десяти делениям линейки. Перемещая шлиф, измеряют и регистрируют длины и число хорд, что­бы найти среднюю величину хорды. Как следует из ра­венства (55), нет необходимости измерять общую длину секущих прямых ***L***. Точность полученного результата обусловлена числом хорд, измеренных в процессе выпол­нения анализа.

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКОВ

Оба метода, которые описаны выше, пригодны для измерения удельной поверхности металлических и других порошков. Эта величина является важнейшей характе­ристикой порошковых материалов и представляет отно­шение суммарной поверхности частиц порошка к их сум­марному объему (удельная поверхность по объему ***SV***).Зная плотность металла порошка, ее можно пересчитать на удельную поверхность по массе ***SG.***

Величина удельной поверхности порошка является универсальным, не зависящим от формы частиц порошка, показателем его дисперсности. Эта величина непосредст­венно связана с числом наиболее активных атомов по­верхности частиц и поверхностной энергией, которые оп­ределяют спекаемость порошков, характеризуют их кор­розионную стойкость, содержание адсорбированных газов, работу дробления порошка и другие свойства. Со­гласно определению, удельная поверхность порошка ана­логична относительной удельной поверхности фазы ком­пактного сплава. Для получения случайных сечений час­тиц порошка, к которым можно применить формулы (54) и (55), необходимо изготовить псевдосплав и его микро­шлиф.

Металлический порошок смешивают с порошком твер­деющей пластмассы, типа зубоврачебных пластмасс АСТ-Т, протакрил и др.

После полного затвердевания пластмассы изготовля­ют микрошлиф обычным методом.

Удельную поверхность порошка по объему ***SV*** опреде­ляют одним из двух методов, описанных выше, т. е. по схеме рис. 23 и 24.

Часто диспер­сность металлических порошков оценивают величиной поверхности частиц, отнесенной к единице массы порош­ка, т. е. удельной поверхностью по массе ***SG***м2 /г. Пере­ход от одной оценки к другой легко выполнить, поль­зуясь формулой:

м2/г (56)

где γ — плотность металла порошка, г/см3;

SG—удельная поверхность порошка по массе, м2/г.

VII. ПЛОТНОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ В ОБЪЕМЕ СПЛАВА

31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ В ОБЪЕМЕ СПЛАВА МЕТОДОМ СЛУЧАЙНЫХ СЕКУЩИХ ПЛОСКОСТЕЙ (С.А. САЛТЫКОВ)

Под плотностью линейных элементов понимают их сум­марную длину в единице объема сплава (например, плот­ность дислокаций). Третье основное стереометрическое соотношение (15) устанавливает простую, математи­чески строгую зависимость между плотностью линейных элементов в единице объема ***ΣL***, мм/мм3 и средним чис­лом следов этих элементов на единице площади случайной секущей плоскости ***М*** мм-2:

**ΣL = 2М** мм/мм3

Если анализ выполняют по одному шлифу, формула (15) применима только к изометрическим системам линий. Если же линии системы имеют пространственную ориен­тацию, формула (15) также действительна, но при усло­вии, что среднее число точек следов линий М подсчитано по многим секущим плоскостям, ориентированным в про­странстве случайным образом.

Рассмотрим однофазную полиэдрическую структуру, показанную на рис. 25, которая пространственно изометрична. Поскольку структура не имеет пространственной ориентации, линии ребер полиэдров представляют собой пространственно изометрическую систему линий. Следом линии ребра полиэдра на плоскости шлифа является точ­ка стыка трех граничных линий (стрелка на рис. 25). Внутри очерченного на рисунке квадрата таких точек стыков 17. Площадь квадрата определяют, измерив при помощи объект-микрометра длину его стороны, приве­денную к плоскости шлифа. Отношение числа точек сле­дов к площади, на которой они находятся, дает среднее число точек на единице площади шлифа **М**, по которому в соответствии с формулой (15) находим плотность линий ребер в единице объема металла

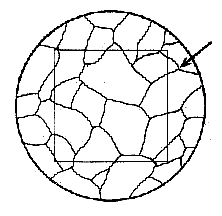


Рис. 25 - Схема подсчета числа узловых точек, являющихся следами ребер полиэдров, на единице площади шлифа **М**

Увеличение микроскопа подбирают так (в зависи­мости от анализируемой структуры), чтобы число точек следов, попадающих внутрь квадрата, в котором ведут подсчет, не превышало 10—15.

Точки следов дислокационных линий на плоскости шлифа выявляются ямками травления. Поэтому по числу ямок травления на единице площади шлифа можно опре­делить плотность дислокационных линий в объеме метал­ла. Однако при этом нельзя забывать принятое при вы­воде формулы (15) условие: все направления пересекаемых дислокационных линий относительно плоскости шлифа должны быть равновероятными. Это требование выполняется при анализе поликристаллического металла, при подсчете ямок травления на площади многих кри­сталлитов, решетки которых случайно ориентированы относительно плоскости шлифа. Но при анализе монокристаллов требование равновероятности любого угла встречи дислокационных линий с плоскостью шлифа не выполняется и использование формулы (15) приведет к ошибочному результату.

Относительная погрешность найденной плот­ности линий системы определяется погрешностью нахож­дения среднего числа точек следов на единице площади шлифа ***М***. Относительную ошибку определения ***М*** и плот­ности линий ***ΣL*** можно вычислить по формуле:

εотн =100%, (57)

в которой ***t*** - нормированное отклонение;

***z*** - число точек следов линий на шлифе, подсчитанных при выполнении анализа;

**К**- коэффициент, близкий к единице.

Нормированное отклонение выбирают в зависимости от требуемой доверительной вероятности **Р**результата анализа.

Точность и достоверность результата анализа прове­ряют по формуле (57) в зависимости от общего числа точек пересечений секущих с линиями проекционного изображения.

32. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И СТЕПЕНИ ОРИЕНТАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ В ОБЪЕМЕ СПЛАВА МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННЫХ СЕКУЩИХ ПЛОСКОСТЕЙ (С. А. САЛТЫКОВ)

Выше рассмотрено определение плотности линейных элементов в объеме сплава при условии, что они изометричны, т. е. не имеют никакой преимущественной направ­ленности в объеме сплава. На практике, однако, часто встречаются системы линейных элементов, имеющих частичную или полную ориентацию в пространстве. На­пример, если граничные поверхности однофазной полиэд­рической структуры получили пространственную ориен­тацию в результате пластической деформации, то и линии ребер полиэдров также приобретают частичную про­странственную ориентацию, степень которой зависит от степени деформации металла. Волокна пластичных не­металлических включений в проволоке или в прутке пред­ставляют практически полностью ориентированную си­стему линий, параллельных оси проволоки или прутка.

Рассмотрим зависимости между плотностью ориенти­рованных линий и их следов на секущей плоскости для двух основных видов пространственной ориентации — линейной и плоскостной.

В системе линий полностью ориентированных линейно все линии системы параллельны между собой и парал­лельны оси ориентации. Примером такой системы линий могут служить нитевидные неметаллические включения, которые в проволоке или в прутке представляют группу почти точно прямолинейных волокон различной длины, параллельных линии ориентации, которой является осе­вая линия проволоки или прутка.

Тогда суммарная длина всех отрезков нитевидных включений в единице объема проволоки будет равна:

**ΣLлин = M┴** мм/мм3 (59)

Следовательно, плотность системы линий, имеющих полную линейную ориентацию в пространстве, равна среднему числу точек следов этих линий на единице площади секущей плоскости, направленной перпенди­кулярно к оси ориентации.

На поперечных шлифах, расположенных по длине прутка или проволоки, среднее число пересечений с ните­видными неметаллическими включениями (или с други­ми линейными элементами структуры), приходящееся на единицу площади шлифа, является статистически посто­янной величиной. Поэтому, определив по одному или по нескольким поперечным шлифам среднее число сечений неметаллических нитевидных включений на 1 мм2 шлифа **M*┴,*** находим по формуле (59) их суммарную протяжен­ность в единице объема металла.

В системе линий полностью плоскостно-ориентирован­ных все линии параллельны данной плоскости - плоско­сти ориентации. Но проекции этих линий на плоскость ориентации направлены случайно, т. е. являются изомет­рической системой линий.

Для этого случая получим:

мм/мм3, (60)

т. е. суммарная протяженность линий полностью плоско­стно-ориентированной системы линий **ΣL*пл***  равна числу следов линий на единице площади шлифа, плоскость ко­торого перпендикулярна к плоскости ориентации, умно­женному на коэффициент **π/2**.

Таким образом, нами получены два равенства (59) и (60), по которым можно определить плотность линейных элементов структуры в системах линий, полностью ориен­тированных параллельно линии ориентации или плос­кости ориентации. Рассмотрим методы определения плотности линейных элементов и степени их ориентации, если система линий имеет частичную линейную или пло­скостную ориентацию. При этом будем исходить из до­пущения, что частично ориентированная система линий может быть разделена на две доли, из которых одна изометрична, а вторая полностью ориентирована либо ли­нейно, либо плоскостно.

ЧАСТИЧНО ЛИНЕЙНО ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЛИНИИ

Представим систему линий ребер полиэдров однофаз­ной структуры холоднотянутой проволоки, как пример частично линейно ориентированной системы линий, осью ориентации которых является осевая линия прово­локи.

Поперечное сечение проволоки пересекает ориентиро­ванные и изометрично расположенные линии системы, а продольное - только изометрично расположенные линии (поскольку ориентированные линии параллельны этой плоскости и не могут быть ею пересечены). Поэтому среднее число следов ребер полиэдров на продольной плоскости, проходящей через осевую линию проволоки, обозначим **М*║.***

На поперечном шлифе, плоскость которого перпенди­кулярна к оси проволоки, среднее число пересечений только с полностью линейно ориентированными линия­ми системы определится разностью **М┴ - М║.**

Полную длину линий системы в единице объема про­волоки, т. е. плотность линий, имеющих частичную ориен­тацию, определим равенством:

**ΣL= = М┴  + М║** мм/мм3  (61)

Степень линейной ориентации линий системы нахо­дим как отношение линейно ориентированной доли ли­ний к полной плотности их, определяемой равенством (61):

100%. (62)

ЧАСТИЧНО ПЛОСКОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЛИНИИ

В качестве системы линий с частичной плоскостной ориентацией рассмотрим линии ребер полиэдров однофаз­ного металла после холодной листовой прокатки. В та­кой структуре линии ребер полиэдров преимущественно параллельны плоскости листа, которая и является пло­скостью ориентации линий системы.

Плоскость шлифа, параллельная плоскости листа, пе­ресечет только линии изометрической доли системы, но не пересечет ориентированные линии, поскольку они па­раллельны плоскости такого шлифа. Следовательно, среднее число следов линий ребер полиэдров на единице площади шлифа, параллельного плоскости листа **М*║.***

На шлифе, плоскость которого перпендикулярна к плоскости листа, будут наблюдаться следы линий ребер полиэдров как ориентированной, так и изометрической долей линий. Только ориентированным параллельно пло­скости листа линиям принадлежат следы, число кото­рых обусловлено разностью **М┴- М*║.*** .

Полная плотность линий ребер рассматриваемой час­тично плоскостно-ориентированной системы равна

**ΣL= 1,57М┴ + 0,43 М *║***мм/мм3 (63)

Степень плоскостной ориентации линий системы нахо­дим как отношение плоскостно-ориентированной доли линий к полной плотности их, выраженное в процентах

 (64)

При пользовании формулами (59)—(64) следует помнить, что **М*║*** — среднее число точек следов линий на единице площади шлифа, плоскость которого параллель­на оси или плоскости ориентации, а **М*┴-*** среднее число точек следов на единице площади шлифа, плоскость ко­торого перпендикулярна к оси или плоскости ориента­ции.

Сделанное выше допущение о том, что любую систе­му ориентированных линий можно разделить на изомет­рическую и полностью ориентированную доли не явля­ется строгим, поэтому методы определения плотности и степени ориентации частично ориентированных систем линий являются приближенными. Это не относится к методам определения плотности полностью ориентированных систем линий, так как формулы (69) и (70) являются математически строгими.

VIII. ЧИСЛО МИКРОЧАСТИЦ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА СПЛАВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПО РАЗМЕРАМ

33. СЕЧЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ СЛУЧАЙНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ ИЛИ ЛИНИЕЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПО РАЗМЕРАМ

Если в структуре сплава отсутствует транскристаллиза­ция, и он не был пластически деформирован, микрочас­тицы в объеме сплава расположены и ориентированы случайным образом. На плоскости шлифа, пересекаю­щей сплав, образуются случайные сечения его микро­частиц. При пересечении этой плоскостью микрочастицы, форма которой выпукла, может быть получено только одно сечение.

Число сечений выпуклых микрочастиц на единице площади шлифа определяется четвертым основным сте­реометрическим соотношением (18), согласно которому

**п =N** мм-2,

где ***п*** — число сечений микрочастиц на 1 мм2 площади шлифа;

***N*** — число микрочастиц в 1 мм3 объема сплава;

— средняя высота микрочастиц, мм (см. раздел II).

Из величин, входящих в это соотношение, мы можем определить экспериментально только число ***n***, что недо­статочно для нахождения интересующего нас числа мик­рочастиц в единице объема сплава **N**. Поэтому требует­ся дополнительная информация для определения числа **N** и данных о распределении микрочастиц по их раз­мерам.

Одним из видов дополнительной информации являет­ся распределение сечений микрочастиц, наблюдаемых на шлифе, по их размерам - площади или диаметру (если микрочастицы имеют шаровидную или близкую к ней форму). Другим видом такой информации может служить распределение длин случайных хорд, которые получаются при пересечении микрочастиц сплава слу­чайной прямолинейной секущей, которую проводят на плоскости шлифа.

Таким образом, для оценки размеров сечений микро­частиц можно выбрать распределение величин одного из трех следующих параметров, измеренных на шлифе: *а*) площади сечений микрочастиц на шлифе; *б*) длины случайных хорд, получаемых при пересече­нии микрочастиц случайной прямолинейной секущей. *в*) диаметров сечений шаровидных микрочастиц. Первые два параметра (площади сечений и длины хорд) являются универсальными, так как их можно при­менять для оценки размеров сечений микрочастиц любой формы, тогда как третий параметр (диаметры сечений) может быть использован для оценки сечений только шаровидных микрочастиц или близких к ним по форме. Од­нако поскольку измерение диаметров сечений намного проще измерения площадей сечений, распределение диа­метров предпочтительнее при условии, что форма мик­рочастиц позволяет оценить их сечения величиной диа­метра.

Для распределения сечений микрочастиц по разме­рам предварительно устанавливают ряд размерных ин­тервалов или групп. Практика стереометрической метал­лографии показала, что для получения правильного распределения размеров микрочастиц число размерных групп не должно быть меньше 7. Кроме того, используя только одно увеличение микроскопа, трудно распреде­лить сечения на группы, если число их превышает 12. Поэтому принято устанавливать число размерных групп в пределах от 7 до 12.

Путем предварительного просмотра шлифа устанав­ливают наибольший диаметр или наибольшую площадь сечений, наблюдаемых на шлифе. Исходя из этих вели­чин, устанавливают размерные интервалы диаметров или площадей сечений, а также число размерных групп.

Увеличение микроскопа подбирают таким образом, чтобы диаметр наибольших сечений был равен целому числу делений линейки окуляра в пределах от 7 до 12. Если, например, диаметр наибольших сечений равен 10 делениям линейки, число групп принимают равным 10. Отношение диаметра наибольших частиц к числу групп называется ценой разбивки. Поэтому при разбивке на 10 групп цена разбивки равна одному делению линейки окуляр-микрометра и размерные интервалы получаются равными: 0—1, 1—2, 2—3, ..., 8—9, 9—10. Измерение диа­метров сечений шаровидных микрочастиц выполняют по схеме, показанной на рис. 13.

Некоторые методы расчета числа микрочастиц и рас­пределения их по размерам требуют исходной информа­ции, в которой сечения микрочастиц распределены не по арифметическому ряду, а по размерным интервалам, построенным по геометрическому ряду. В этом случае раз­мер сечений каждой последующей группы получают умножением размера сечений предыдущей группы на посто­янный множитель—знаменатель прогрессии. Например, если знаменатель прогрессии равен 2, получаем следую­щие размерные интервалы по группам: 1—2, 2—4, 4—8 и т. д. Этот ряд может быть как возрастающим, так и убывающим (если знаменатель прогрессии меньше еди­ницы). Например, стандартную величину зерна опреде­ляют по шкале, в которой площадь зерна представляет убывающую прогрессию со знаменателем, равным 0,5, тогда как стандартная шкала чисел зерен на 1 мм2  пло­щади шлифа построена как возрастающая прогрессия со знаменателем, равным 2.

При разбивке сечений на размерные группы, постро­енные по геометрическому ряду, удобнее пользоваться убывающими рядами, поскольку сечения наибольшего размера, встречающиеся на шлифе легко определить предварительным осмотром. Умножая наибольший раз­мер сечений на знаменатель убывающей прогрессии, определяют размерные интервалы последующих групп.

Перейдем к рассмотрению третьего, после диаметра и площади сечения, параметра, распределение размеров которого позволяет рассчитывать число микрочастиц в объеме сплава и распределение их по размерам. Как по­казывает рис. 26, пересечение структуры прямолинейной секущей создает внутри микрочастиц отрезки этой се­кущей — случайные хорды. Мы можем легко измерить эти хорды, сгруппировать их по длине и определить чис­ло хорд каждой размерной группы на единице длины се­кущих прямых. Таким образом, получаем распределение случайных хорд по длине, которое и служит исходной ин­формацией для расчета числа микрочастиц в единице объема и распределения их по размерам. Порядок из­мерения длин хорд при визуальном наблюдении структу­ры описан ранее

Наибольший размер хорды устанавливают предвари­тельным осмотром площади шлифа, по форме и размеру наибольших наблюдаемых сечений микрочастиц. Исходя из этого размера, определяют размерные интервалы групп и число групп разбивки так же, как это описано для величин диаметров сечений микрочастиц.

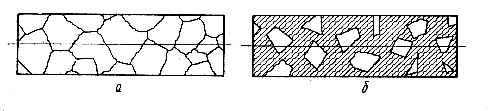


Рис. 26 Образование хорд при пересечении граничных поверхностей однофазной (*а*) и двухфазной (*б*) структур случайной секущей прямой

Как видно из рис.26, в однофазной полиэдрической структуре число хорд на единице дли­ны секущей прямой равно числу точек ее пересечений с поверхностями микрочастиц. Отсюда ясно, что общее число хорд всех размеров на единице длины случайных секущих полностью определяется удельной поверхностью полиэдров **ΣS** в соответствии со *вторым основным* *стере­ометрическим соотношением (14****):***

**zh=0.5 ΣS** мм-1 , (65)

где ***zh*** — общее число хорд на 1 мм длины секу­щих.

В двухфазной структуре (рис. 26) число хорд всех размеров на единице длины секущих прямых вдвое меньше числа точек пересечений **m**, если сечения микрочастиц не соприкасаются между собой.

34. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО ЧИСЛА ШАРОВИДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ СПЛАВА МЕТОДОМ ОБРАТНЫХ ДИАМЕТРОВ (С. А. САЛТЫКОВ)

Выведенное ранее пятое основное соотношение (19) устанавливает простую и математически строгую зависи­мость между числом шаровидных микрочастиц в единице объема сплава ***N*** и суммой обратных диаметров се­чений микрочастиц на единице площади:

 мм-3,

где - среднее значение величин, обратных диамет­рам сечений микрочастиц на шлифе, мм-1;

***п***— число сечений микрочастиц на 1 мм2 площа­ди шлифа.

В отличие от методов, рассматриваемых далее, метод обратных диаметров позволяет определить только общее число шаровидных микрочастиц в единице объема сплава, но не распределение их по размерам. Преимуществом метода является простота определения, малая трудоем­кость и строгость методики.

Для получения надежного результата необходимо повторить измерения в ряде по­лей зрения, равномерно распределенных по площади шли­фа, чтобы общее число измеренных сечений микрочастиц составило примерно 150—200.

Практически измерение диаметров сечений микрочас­тиц удобно выполнять по схеме, показанной на рис. 13. Структуру наблюдают в окуляр с линейкой. Шлиф пере­мещают в направлении, перпендикулярном к линейке, од­новременно фиксируя диаметры сечений, проходящих че­рез диаметральную линию линейки. Должны быть изме­рены все сечения, центры которых проходят в пределах длины линейки. Зная цену деления линейки окуляра, пе­реводят величины диаметров сечений, измеренные в де­лениях шлифа, в миллиметры.

Площадь шлифа, просмот­ренную при анализе, определяют как произведение дли­ны линейки, приведенной к плоскости шлифа, на путь перемещения шлифа, зафиксированный микрометрическим винтом столика микроскопа. Дальнейший расчет чи­сла **N** понятен.

35. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ШАРОВИДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ СПЛАВА И ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РАЗМЕРОВ (ДИАМЕТРОВ) ПО АРИФМЕТИЧЕСКОМУ РЯДУ (Э. ШАЙЛЬ)

В любой реальной системе шаровидных микрочастиц диаметры их изменяются непрерывно. Но для осуществ­ления расчета числа микрочастиц в единице объема и распределения их по размерам приходится исходить из допущения, что диаметры микрочастиц изменяются прерывисто (или дискретно). Пусть диаметр наибольших мик­рочастиц в данной системе равен ***Dk=k∆.*** Тогда прини­маем, что в этой системе существуют только микрочас­тицы, диаметры которых равны ***∆, 2∆, 3∆, ..., k∆,*** но нет микрочастиц, диаметры которых имеют какие-либо про­межуточные значения.

Такое допущение вполне правомерно, если принятое число размерных групп ***k*** достаточно велико. Обычные числа групп разбивки диаметров микрочастиц составляют 8-12. Отношение диаметра наибольших микрочастиц в си­стеме **Dk** к числу групп разбивки ***k*** называют ценой или шагом разбивки ***∆.***

На случайной плоскости, пересекающей систему ша­ровидных микрочастиц, получаются их сечения, диамет­ры которых могут изменяться в пределах от нуля до **Dk*.*** Второе допущение, которое мы делаем, заключается в том, что диаметры наибольших сечений микрочастиц, наблюдаемых на шлифе, принимаем за действительный диаметр наибольших микрочастиц, имеющихся в данной системе **Dk*.***

Ознакомимся с принципом последовательного расчета числа микрочастиц каждой размерной группы по мето­ду Шайля на конкретном примере, когда число размер­ных групп равно 10, а диаметр наибольших микрочастиц равен D10. Тогда микрочастицы первой размерной груп­пы имеют диаметр, равный 0,1 D10, второй 0,2 D10, тре­тий 0,3 D10 и т.д., а последней, 10-й группы, D10. Число микрочастиц каждой размерной группы в 1 мм3 сплава соответственно обозначим **N1, N2, N3, ...,** **N10.**

Сечения микрочастиц, полученные на плоскости шли­фа, также делят на 10 размерных групп. В первую груп­пу войдут сечения диаметром от нуля до 0,1 D10, во вто­рую—от 0,1 D10 до 0,2 D10, в третью—от 0,2 D10 до 0,3 D10 и т.д., а сечения последней, 10-й, группы, будут иметь диаметры от 0,9 D10 до D10. Число сечений каждой размерной группы на 1 мм2 шлифа обозначаем соответ­ственно **n1, n2, n3,** .**.., n10.**

Ясно, что все сечения последней размерной группы могут принадлежать только микрочастицам наибольше­го размера 10-й группы. Для того чтобы микрочастицы, имеющие диаметр D10, образовали на плоскости шлифа сечения диаметром от 0,9 D10 до D10, центры этих микрочастиц должны находиться от плоскости шлифа на рас­стоянии от нуля до ***h*** .

Определив число микрочастиц наибольшего размера, можно легко рассчитать числа сечений в группах от 1-й до 9-й включительно, которые принадлежат наибольшим микрочастицам. Исключим из числа сечений 9-й группы те, которые принадлежат микрочастицам наибольшего размера) т. е. 10-й группы. Очевидно, что оставшееся чис­ло сечений 9-й группы может принадлежать только мик­рочастицам 9-й группы, диаметр которых равен 0,9 D10 . Рассуждая так же, как и ранее, можно вычислить число микрочастиц 9-й группы и последовательно чис­ла микрочастиц всех остальных размерных групп.

36. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ШАРОВИДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ СПЛАВА И ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РАЗМЕРОВ (ДИАМЕТРОВ) МЕТОДОМ УКРУПНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ (С. А. САЛТЫКОВ)

При изучении количественных закономерностей, свя­зывающих показатели свойств металлов и сплавов или параметры технологических процессов их обработки с размерами и числом микрочастиц, приходится опериро­вать не с таблицами или графиками распределения микрочастиц по размерам, а с оп­ределенными количественными значениями параметров распределения - средним диаметром микрочастиц, сред­ним квадратичным отклонением диаметра или коэффи­циентом вариации, числом микрочастиц в единице объ­ема и др. Для получения перечисленных показателей распределения микрочастиц нет необходимости строить, статистическую кривую распределения микрочастиц по размерам при помощи методов, описанных выше. Эти показатели можно получить значительно проще и с мень­шей затратой труда, если известен вид функции рас­пределения шаровидных микрочастиц по величине диа­метра.

Ранее было показано, что распределение диаметров шаровидных микрочастиц самых различных по составу и происхождению фаз вы­ражается функцией логарифмически нормального рас­пределения, т.е. функция распределения логарифмов диаметров микрочастиц отвечает закону нормального распределения Гаусса.

С.А. Салтыков предлагает следующую простую зависимость между общим числом микрочастиц в единице объема сплава **N** и тремя параметрами пространственной структуры, которые наи­более легко и точно определить по структуре шлифа:

мм-3 (66)

Последняя формула является основной формулой ме­тода укрупненных показателей, позволяющего определить все параметры распределения шаровидных микрочастиц, если оно подчиняется закону логарифмически нормаль­ного распределения. Как видно из формулы (66), чтобы найти общее число микрочастиц в единице объема спла­ва, экспериментально требуется определить по шлифу следующие три параметра.

1.Общее число сечений микрочастиц всех размеров на единице площади шлифа ***п***, мм -2. Определение выполняют по схеме, описанной в разделе 18, и формуле (33).

2. Суммарную поверхность шаровидных микрочастиц в 1 мм3 сплава **ΣS**, мм-1. Определение выполняют мето­дом случайных секущих с использованием основной формулы (14). Следует иметь в виду, что величина **ΣS**формулы (66) выражает суммарную поверхность шаровидных микрочастиц в еди­нице объема сплава. Если микрочастицы соприкасаются, образуя общую поверхность раздела, такая поверхность должна быть удвоена. Например, при анализе однофаз­ной полиэдрической структуры с равноосными микроча­стицами, все граничные поверхности одновременно при­надлежат двум смежным микрочастицам, поэтому вели­чина удельной поверхности **ΣS**, полученная методом случайных секущих должна быть удвоена, прежде чем ее вводят в формулу (66). Если сечения шаровидных микрочастиц полностью окружены матрицей, в формулу (66) вводят величину **ΣS**, определенную методом слу­чайных секущих, непосредственно. Если микрочастицы частично соприкасаются, при подсчете числа точек пере­сечений случайной секущей с поверхностями микроча­стиц, общими для двух микрочастиц, точку пересечения принимают за две.

3. Объемную долю сплава, занятую шаровидными микрочастицами или объемное содержание фазы, со­ставляющей эти микрочастицы в сплаве **ΣV*,*** мм3/мм3. Ее определяют точечным или линейным методом.

Показатели **ΣS**и **ΣV** сами по себе являются важней­шими параметрами пространственного строения сплава. Вместе с тем определив эти величины, а также величи­ну ***п***, мы получаем возможность вычислить не только число **N**, но и все параметры логарифмически нормаль­ного распределения размеров шаровидных микрочастиц.

Таким образом, при использовании метода укрупнен­ных показателей отпадает дифференцированная оценка сечений по размерам (измерение диаметров или хорд индивидуальных сечений), а также расчет числа микро­частиц в объеме сплава по размерным группам, т. е. наи­более трудоемкая и утомительная операция количест­венного микроанализа.

IX. ФОРМА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В СПЛАВЕ

37. ОДНОФАЗНАЯ ПОЛИЭДРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Если структура однофазна, полиэдрические микроча­стицы в своем стремлении к минимуму свободной энер­гии не могут принять форму шара, поскольку шары не заполняют пространства. В этом случае как было пока­зано выше, минимум свободной энергии достигается, если микрочастицы приобретают форму идеального полиэдра, который характеризуется следую­щими параметрами:

Число: граней . .. 13,397

ребер .... 34,192

вершин .... 22,795

Угол между гранями 120

Каждый из перечисленных параметров в отдельности может служить показателем средней формы микроча­стиц полиэдрической структуры. Степень приближения этих параметров в реальной структуре к параметрам идеального полиэдра является показателем степени ее приближения к равновесному состоянию.

Экспериментально доказано, что в зависимости от продолжительности отжига, числа граней и вершин среднего полиэдра, выраженные в процен­тах числа граней идеального полиэдра, возрастает по затухающим кривым.

Наиболее простым по выполнению является метод оценки формы полиэдрических микрочастиц однофазных структур, использующий дисперсию двугранных углов между гранями микрочас­тиц, которая выражает степень однородности этих углов по величине. Средняя величина двугранных углов между гранями полиэдров однофазной структуры всегда посто­янна и равна 120° (так как все ребра полиэдров в одно­фазной структуре служат общими вершинами трех дву­гранных углов). Выше было показано, что стремление структуры к минимуму свободной энергии приводит к выравниванию двугранных углов, каждый из которых в условиях идеального равновесия должен быть равен 120°. При этом дисперсия дву­гранных углов стремится к нулю.

Согласно седьмому основному стереометрическому соотношению (23), средняя величина двугранных углов  равна средней величине плоских углов , получаемых на случайной плоскости (на шлифе), пересекающей дву­гранные углы. Дисперсия двугранных углов определя­ется выражением (23).

При однофазной полиэдрической структуре средние величины двугранных углов в пространстве и их плоских сечений на шлифе равны 120°, а дисперсия двугранных углов определится выражением (25):

**D (Ф) =1,11(D (φ)- 486 град2**

Чтобы найти дисперсию двугранных углов, необходи­мо определить экспериментально, по шлифу, дисперсию плоских углов при вершинах сечений полиэдров.

Измерение плоских углов при вершинах сечений по­лиэдров удобно выполнять на микрофотографии, пользуясь прозрачным транспортиром, центр которого после­довательно совмещают с узловыми точками однофазной структуры, в которых сходятся по три граничных линии. Располагая окулярной вставкой с транспортиром, мож­но оценивать плоские углы и при визуальном наблюде­нии структуры. Величины углов можно определять, округляя их до целых десятков градусов (0, 10, 20°...). Направления линий границ у точки вершины угла опре­деляют величину угла, причем изменение направления граничных линий по мере удаления от этой точки не принимают во внимание. Измерение углов следует про­водить во всех узловых точках поля зрения или микро­фотографии (не выборочно). Для получения хорошо выраженной кривой частот достаточно измерить 150—200 углов при вершинах сечений полиэдров.

Все три показателя степени однородности дву­гранных углов (дисперсия, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации) по величине стремятся к нулю по мере приближения формы полиэдрических микрочастиц одно­фазной структуры к форме идеального полиэдра. Поэто­му их фактические величины, найденные эксперимен­тально, показывают степень приближения однофазной структуры к равновесному состоянию.

МИКРОЧАСТИЦЫ ДВУХ И МНОГОФАЗНЫХ СТРУКТУР

В двух- и многофазных структурах сравнительно ред­ко наблюдаются микрочастицы, имеющие форму много­гранников. Обычно поверхность микрочастиц бывает плавно изогнутой, без плоских граней и отчетливо вы­раженных ребер или вершин. Поэтому рассмотренные выше показатели формы не пригодны для оценки формы таких микрочастиц. Микрочастицы двух- и многофазных структур в матричной фазе (в отличие от однофазных) могут принять форму, со­ответствующую минимуму поверхности при данном объеме, т. е. близкую к шаровидной.

Поскольку в большинстве случаев форму микрочас­тиц двух- и многофазных структур нельзя оценить чис­лами граней, ребер и вершин или дисперсией двугранных углов, остается использовать для этой цели безразмер­ные соотношения между основными геометрическими параметрами, характеризующими размеры тела или микрочастицы. Такими параметрами являются:

Объем тела, мм3 ........ *V*

Поверхность тела, мм2 . . . . . . ***S***

Средняя площадь сечения тела, мм2 

Средняя высота тела, мм . . . . . 

Средняя длина хорды, мм . . . . 

Можно выбрать много различных вариантов безраз­мерных соотношений перечисленных параметров и по­этому предложено несколько показателей формы (коэф­фициентов формы, факторов формы и пр.) тел или мик­рочастиц. Рассмотрим один из них.

Фактор формы, показывающий отношение объема тела к площади его поверхности, может быть безраз­мерным, если площадь поверхности тела взять в степени 1/2, а объем тела — в степени 1/3. Принимая, что это от­ношение для шара должно быть равно 1, получаем сле­дующее выражение, определяющее пространственный фактор формы для любых тел:

 (67)

В табл. 7 приведены значения факторов формы **Фз**, вычисленные для некоторых геометрических тел.

Таблица 7 – Значения факторов форы различных геометрических тел

|  |  |
| --- | --- |
| Геометрическое тело | Показатель формы Ф3 |
| Шар  Пентагон додекаэдр  Кубооктаэдр  Цилиндр (L=D)  Октаэдр  Куб  Тетраэдр  Пластины размером ,мм  1х5х5  1х10х10  1х20х20  1х50х50 | 1,000  0,955  0,954  0,935  0,920  0,896  0,820  0,769  0,659  0,546  0,414 |

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография М.: Металлургия , 1970. 376 с.

2. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография М.: Металлургия , 1976. 272 с.

3. Чернявский К.С. Стереология в металловедении М.: Металлургия, 1977, 230 с.

4. Штремель М.А., Карабасова Л.В., Сатдарова Ф.Ф. Прочность сплавов. Лабораторный практикум. М.: МИСиС.-1982.- 110 с.