

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ - ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт металлургии, машиностроения и транспорта
Кафедра технологии и исследования материалов

В. В. Паромов

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕКСТУР МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ
МЕТОДОМ ПРЯМЫХ ПОЛЮСНЫХ ФИГУР**

Учебное пособие для самостоятельной
работы студентов

Санкт-Петербург
2013

Оглавление

Условные обозначения.....	3
1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕКСТУРЕ	4
2. СТЕРЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ.....	7
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ	10
3.1. Прямая полюсная фигура.....	10
3.2. Обратная полюсная фигура	11
3.3. Сравнение информативности ППФ и ОПФ	12
3.4. Прямые методы исследования текстур	13
1. Металлографический метод исследования текстур.....	13
2. Рентгеновский метод исследования текстур	14
Методика съёмки и построения прямых ПФ.....	15
4. РАБОТА СО СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИЕЙ	24
4.1. Определение угла между полюсами	24
4.2. Поворот полюсов вокруг заданной оси	25
4.3. Определение индексов направления.	27
1. Определение индексов направления в стандартной проекции	27
2. Определение индексов НН и НП на ППФ {100}	27
5. РАСШИФРОВКА ПРЯМЫХ ПОЛЮСНЫХ ФИГУР.....	28
Последовательность расшифровки ППФ.....	31
Литература	35

Условные обозначения

ППФ — прямая полюсная фигура;

ОПФ — обратная полюсная фигура;

ФРО — функция распределения ориентировок кристаллитов;

КТ — кубическая текстура $\{001\}\langle 100\rangle$;

θ — угол Вульфа — Брэггов для «отражающих» плоскостей $\{hkl\}$;

НН — нормаль к плоскости прокатки;

НП — направление прокатки;

ПН — нормаль к НП, лежащая в плоскости прокатки;

α — угол наклона или поворота образца, соответственно, вокруг горизонтальной (Y) или вертикальной (Z) осей гониометра,

β — угол поворота образца вокруг нормали (n) к его плоскости.

1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕКСТУРЕ

Термин «*текстура*» означает *строение* (например, ткани), расположение частей, построение (например, какого-либо произведения). Различают понятия *механической* текстуры и *кристаллографической* текстуры. Более широким понятием является понятие структуры, которое включает в себя оба предыдущих понятия. Текстура оказывает существенное влияние на свойства металла.

Под структурой металлов в общем смысле понимается их реальное строение, включающее все его характеристики: тип решётки, её ориентацию, энергию и тип связи атомов, дефекты кристаллической решетки, включения, трещины и т.д. Химический состав металла является одним из факторов, влияющих на структуру и свойства.

В более узком смысле под структурой понимают *видимое* строение металла, определяемое различными методами. В этом смысле структуру подразделяют на макро-, микро- и субструктуру в зависимости от размеров элементов строения, выявляемых при исследовании. *Макроструктурой* называется строение металлов, определяемое при визуальном осмотре, а также с помощью лупы или бинокулярного микроскопа с увеличением до 30 - 50 раз. *Микроструктурой* называется строение металла или сплава, изучаемое с помощью оптического металлографического микроскопа с увеличением от 50 до 1000 - 2000 раз. Под с у б с т р у к т у р о й (тонкой структурой) понимают дислокационную структуру (отдельные дислокации, различные их образования, субзёрна) внутри зерен, скопления атомов примесей и др. элементы, изучаемые с помощью методов высокого разрешения (электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и др.). Для более полного представления о структуре металлов необходимо исследование его на различных уровнях. На уровне визуального понимания структуры понятия текстуры и структуры не перекрываются, т.е. это самостоятельные характеристики, влияющие на свойства металла. Например, в разных металлах с одинаковой структурой может быть разная текстура и свойства. В этом случае тип кристаллической решётки, химический состав, его неоднородность, остаточные напряжения и др. уже не включаются в понятие структуры и являются самостоятельными характеристиками металла (не характеристиками *видимой* структуры). Но все они характеризуют структуру в обобщённом смысле.

Механическая текстура – это преимущественная вытянутость или сплюснутость *вторых фаз (включений)* и (или) *зерен* в направлении главных дефор-

маций без учета расположения кристаллографических плоскостей и направлений в этих зернах. Так, например, в холоднокатаном металле зерна имеют сплюснутую форму в вертикальном направлении и вытянутую в продольном. Механическая текстура не дает большой информации об анизотропии свойств деформированного металла, но всё же влияет на анизотропию.

Кристаллографическая текстура представляет собой *преимущественную ориентацию* кристаллической решётки (кристаллографических плоскостей и направлений) зёрен относительно выбранных в пространстве металла плоскостей и направлений (внешних направлений, осей образца). Например, при исследовании *текстуры прокатанного листа* определяют, какие кристаллографические плоскости зёрен параллельны плоскости листа и какие кристаллографические направления в этих зернах ориентированы вдоль направления прокатки (НП).

В дальнейшем будем вести речь о кристаллографических текстурах, поэтому будем называть их просто текстурами.

На рисунке 1.1,*а* показано, что в плоскости листа лежит кристаллографическая плоскость (001), а вдоль направления прокатки ориентировано направление [100], на рисунке 1.1,*б* – плоскость (001) и направление [110], соответственно. Поскольку в кристаллах существует совокупность равноценных плоскостей и направлений, например, три плоскости типа {100} и три направления типа <100>, то говорят об *ориентировке текстуры* {001}<100>, где фигурными или острыми скобками определяют, соответственно, совокупность всех равноценных плоскостей или направлений. Частную ориентировку (001)[100] называют *компонентой (компонентом) ориентировки*. Так как в листе направление прокатки (НП) лежит в плоскости прокатки (соответственно, перпендикулярно нормальному направлению к плоскости - НН), то для компоненты ориентировки текстуры прокатки (hkl)[uvw] выполняется *условие перпендикулярности направлений*:

$$hu + kv + lw = 0, \quad (1.1)$$

где h, k, l – индексы Миллера НН; u, v, w – индексы НП. Это условие должно всегда проверяться при расшифровке текстуры идеальными ориентировками (см. ниже).

Зёрна в металле (точнее, их кристаллическая решётка) могут быть ориентированы хаотично (*беспорядочная текстура*, металл нетекстурован). Это возможно, например, в порошке, если порошинки имеют равноосную форму. В компактном материале получить хаотичную ориентацию зёрен практически не-

возможно (в том числе в прессованном порошке). В нетекстурованном металле имеются любые ориентации решётки кристаллитов в равном количестве.

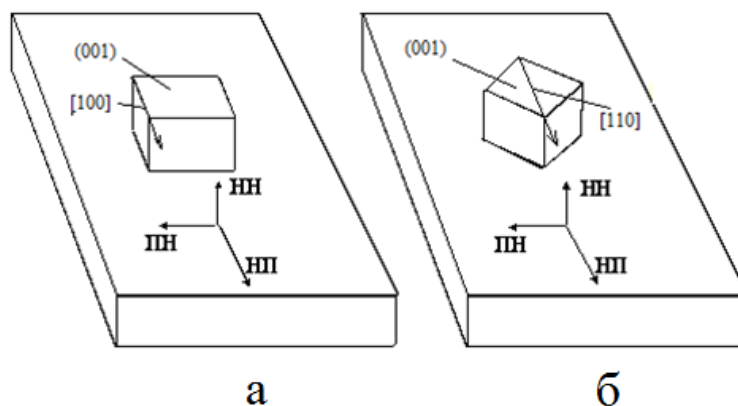


Рис. 1.1. Схематическое изображение текстуры листа: а – $(100)\langle 100 \rangle$; б – $(100)\langle 110 \rangle$; НН – направление прокатки, ПН – поперечное направление, НН – направление нормали (перпендикуляра) к поверхности

Если множество зерен имеет *предпочтительные* ориентации кристаллографических плоскостей и направлений в пространстве металла, то говорят, что металл обладает кристаллографической текстурой (или текстурован). В этом случае есть не все возможные ориентировки, как в нетекстурованном металле. Металл может иметь несколько *преимущественных ориентаций* зерен (ориентировок текстуры) или одну. Если в изделии есть несколько групп кристаллитов, каждая из которых характеризуется своей ориентировкой, то текстуру называют *многокомпонентной*. Если все кристаллиты поликристалла имеют одну преимущественную ориентировку, то текстуру называют *однокомпонентной*. В последнем случае свойства металла будут близки к свойствам монокристалла. Количество ориентировок текстуры и степень их рассеяния определяют *остроту текстуры*.

Характерную *совокупность ориентировок текстуры* для данного металла или вида обработки называют *типом текстуры* (например, текстура типа меди, типа латуни; или: текстура прокатки, текстура волочения). Тип текстуры зависит от типа кристаллической решётки, химического состава, энергии дефекта упаковки, вида воздействия на металл (литьё, осаждение, прокатка, волочение, термообработка и т.д.). Существуют различные способы классификации текстур.

Кристаллографические текстуры во многом определяют *анизотропию* механических и физических свойств металлов, поэтому их изучению уделяется

большое внимание. Можно отметить, что управление текстурой с помощью технологии дает возможность регулировать пластичность и прочность в требуемом направлении, что особенно важно для холодной деформации малопластичных металлов; дает возможность снижения сопротивления деформации, а, следовательно, и энергозатрат на деформацию и себестоимость готового изделия. Кроме текстуры, на анизотропию механических свойств металлов сильное воздействие оказывает ориентированное расположение включений (границ) второй фазы и примесей вдоль вытянутых границ зёрен.

Ориентировки текстуры и их долю в текстуре описывают различными методами, в том числе с использованием стереографической проекции.

2. СТЕРЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ

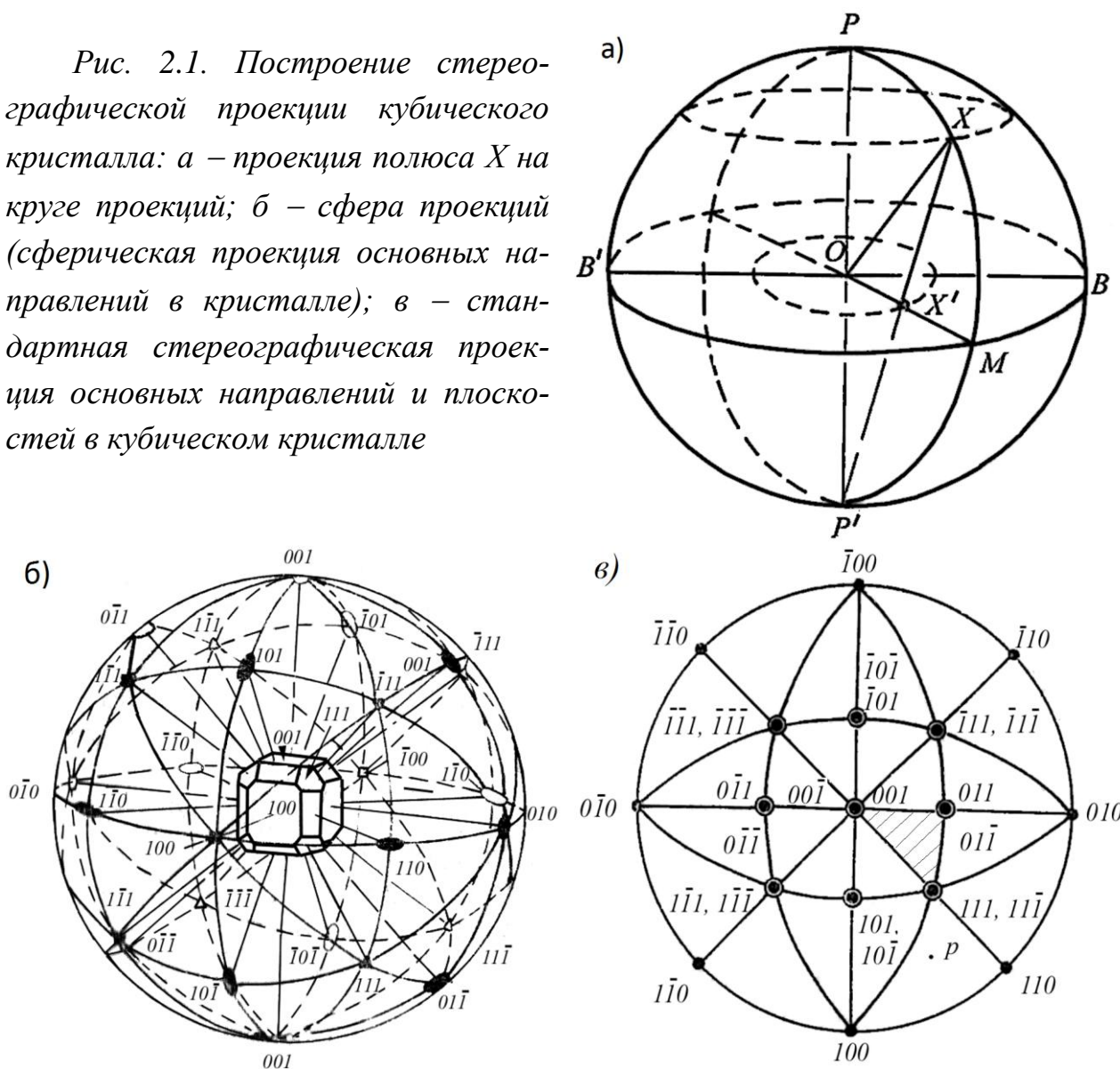
Стереографическая проекция применяется в кристаллографии для отображения плоскостей, граней и направлений на плоскости. Стереографическая проекция получается из сферической (рис. 2.1). Примером может служить проекция глобуса на плоскость – географическая карта. Любое направление или плоскость, проведенные через центр сферы, пересекаются со сферой (рис. 2.1а). Точка X является сферической проекцией направления OX , а окружность на сфере – проекцией плоскости $PMP'P$. Сферическая проекция неудобна, поэтому используют стереографическую проекцию. Стереографическая проекция X' точки X получается как точка пересечения луча зрения $P'X$ с плоскостью проекции $VB'MB$. Луч зрения проводят из точки зрения P' - южного полюса.

Кроме стереографической, используется гномостереографическая проекция. На первой отображают проекции кристаллографических направлений и плоскостей, а на второй - перпендикулярные им плоскости и направления, соответственно. Для изображения текстуры используется гномостереографическая проекция плоскостей, но в литературе её часто называют стереографической (видимо, потому, что это короче). В кубических кристаллах стереографическая проекция направления и гномостереографическая - перпендикулярной ей плоскости совпадают, поэтому полносную фигуру можно назвать стереографической проекцией.

Поместим кристалл в центр сферы большого диаметра и от кристаллографических плоскостей кристалла, например, $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ и других, проведем нормали. Эти нормали называются кристаллографическими направлениями (для кубических кристаллов они имеют те же символы, что и перпендикулярные им плоскости, как указано выше); они пересекутся со сферой в раз-

личных точках, которые называют *полюсами* (рис. 2.1б). Совокупность полюсов на поверхности сферы называют *сферической проекцией*. Как и кристалл, помещенный в сферу, сферическая проекция обладает симметричным расположением полюсов.

Рис. 2.1. Построение стереографической проекции кубического кристалла: а – проекция полюса X на круге проекций; б – сфера проекций (сферическая проекция основных направлений в кристалле); в – стандартная стереографическая проекция основных направлений и плоскостей в кубическом кристалле



На рис. 2.1,б показано расположение полюсов на сферической проекции, а на рис. 2.1,в – на стереографической проекции. Как видно, стереографическая проекция также обладает симметрией, поэтому часто пользуются только сектором в $1/8$ часть стереографической поверхности. Широко применяется также *стандартный стереографический треугольник* (001) - (011) - (111) (заштрихован на рис.2.1в).

На *стандартной стереографической проекции* направления $\langle 100 \rangle$, образующие декартову систему координат, располагаются в плоскости проекций и перпендикулярно ей (см. рис.2.1в).

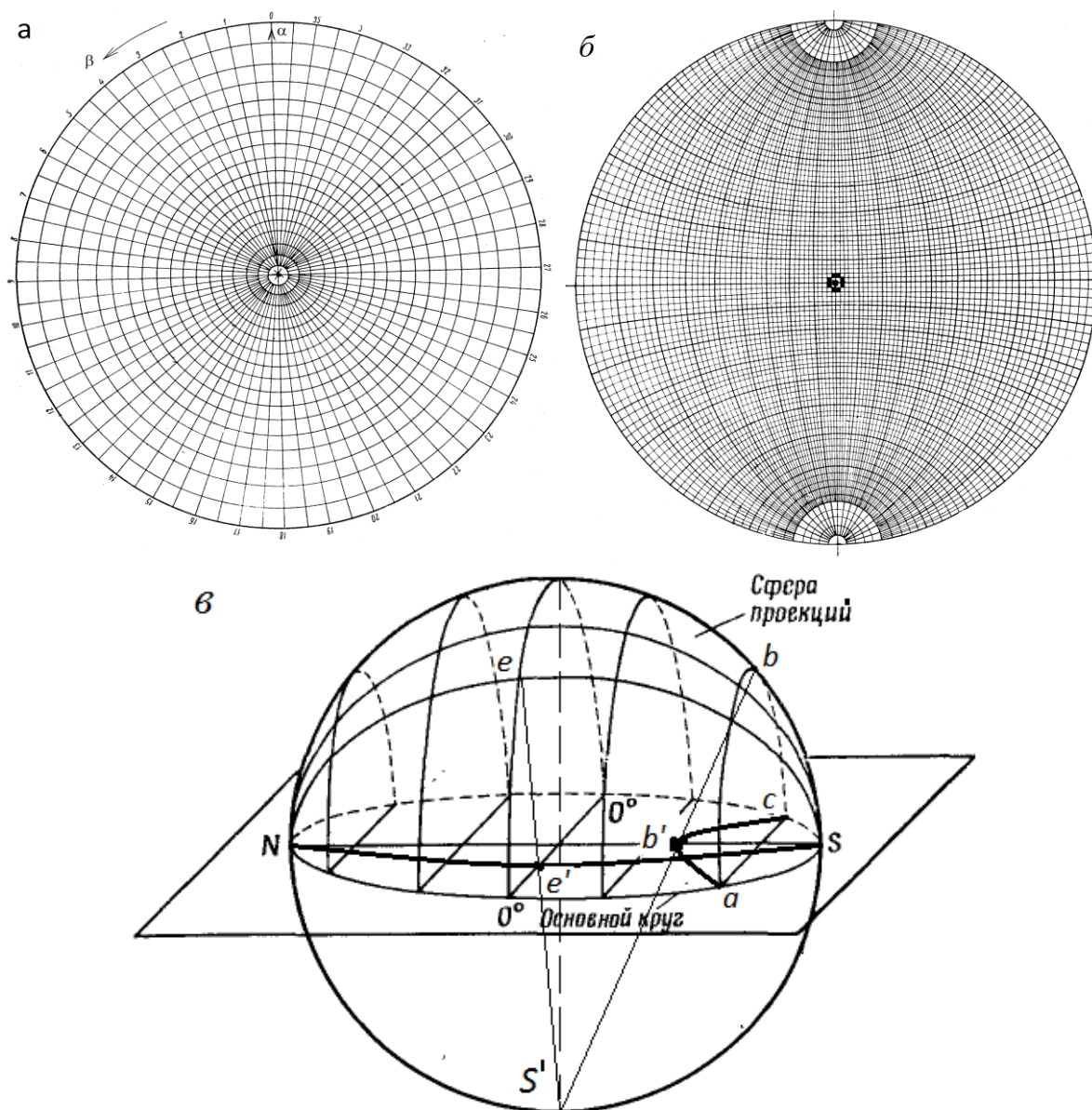


Рис. 2.2. Сетки Болдырева (а) и Вульфа (б); в – схема построения сетки Вульфа.

Для построения полюсных фигур применяется *сетка Болдырева* (рис.2.2а), полученная проекцией параллелей и меридианов на плоскость проекций из южного полюса S' . На ней расстояние между параллелями измеряется углом α , изменяющимся от нуля до 90° , а расстояние между меридианами измеряется углом β , изменяющимся от 0 до 360° .

Для выполнения измерений углов между полюсами на стереографической проекции и других преобразований (см. гл. 4) используют *сетку Вульфа* (рис.2.2б), которая получена путем проекции меридианных и широтных кругов из точки зрения, лежащей на экваториальной плоскости сферической проекции (рис. 2.2в). На последнем рисунке дуги $ab'c$, $Se'N$ – проекции соответствующих параллели и меридиана.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ

На практике используют *прямые и косвенные методы* исследования текстур. К *косвенным* методам относятся методы, основанные на измерениях *анизотропии механических или физических свойств*, например, измерении предела текучести или магнитной проницаемости. *Прямыми* методами исследования текстуры считают *рентгенографический, металлографический, электроннооптический и нейтроннографический*. Наиболее часто используется первый. Электроннооптический позволяет определить ориентировку отдельных зёрен или субзёрен, нейтроннографический – определить среднюю текстуру по толщине толстого образца (рентгенографическим методом можно изучить на просвет текстуру образца толщиной в доли миллиметра). Развиваются и другие методы исследования, позволяющие локализовать текстуру.

Данные прямых методов исследования наносят на стереографическую проекцию с построением *обратной полюсной фигуры (ОПФ)* или *прямой полюсной фигуры (ППФ)*, либо рассчитывают *функцию распределения кристаллитов по ориентациям (ФРО)*. Исследование текстуры включает в себя: подготовку образца, съёмку ОПФ или ППФ, построение ПФ или ФРО, расшифровку ПФ (индексацию ориентировок и определение доли каждой ориентировки в текстуре). Все эти этапы можно выполнять вручную, либо с использованием компьютера. Для освоения методов студенту необходимо выполнить их вручную.

3.1. Прямая полюсная фигура

Гномостереографическая проекция какой-либо атомной плоскости в кристалле с нанесенными на нее интенсивностями отражений (или плотностями распределений) от исследуемой плоскости называется полюсной фигурой (ПФ). Если съёмка текстурной кривой $I(\alpha, \beta)$ (см. рис.3.7) производится путем поворота образца на углы α, β (рис. 3.4) и полюсная фигура отражающих плоскостей строится в координатах внешних осей образца, то такие *полюсные фигуры* называются *прямыми (ППФ)* (рис. 3.1). Таким образом, в результате съёмки *прямых полюсных фигур* определяют углы нормалей к кристаллографическим плоскостям (например, плоскостям $\{111\}$) относительно внешних осей образца (при прокатке листов это НН, НП и ПН) и в полученной точке указывается относительная интенсивность (рис. 3.2). При одной и той же ориентации зёрен (один и тот же образец) вид ППФ будет зависеть от отражающих плоскостей (см. рис. 3.1). Строят обычно 2 – 4 ППФ для разных отражающих плоскостей,

чтобы получить точную расшифровку текстуры (для ГЦК – металлов это плоскости (111), (100), (110) и (311). Им соответствуют рентгеновские линии (111), (200), (220) и (311)).

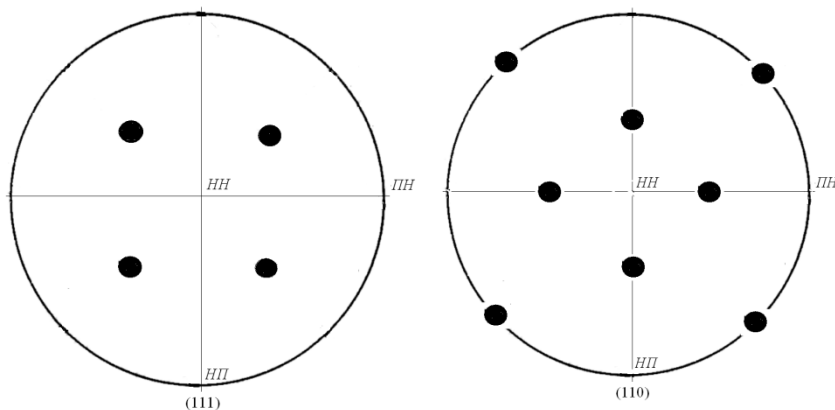


Рис.3.1. ППФ {111} и {110} для ориентировки (001)[100] в листе (плоскость (001) совпадает с НН, а направление [100] – с НП)

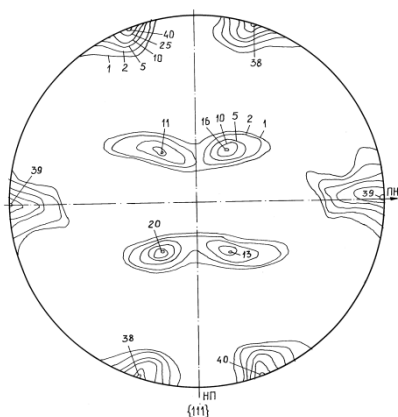


Рис. 3.2. ППФ {111} холоднокатаной алюминиевой фольги толщиной 65 мкм. Основная ориентировка {110}[112]

3.2. Обратная полюсная фигура

Обратная полюсная фигура - это стандартная кристаллографическая проекция, представляющая собой распределение ориентировок внешних осей образца (при прокатке листов строят обычно ОПФ НН, то есть съёмку осуществляют с плоскости прокатки) относительно стандартных осей кристаллической решетки (для кубических металлов – оси {100}). ОПФ строится в стандартном стереографическом треугольнике (рис. 3.3).

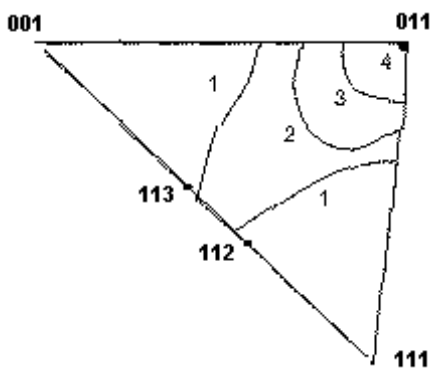


Рис.3.3. ОПФ листа алюминия с основными плоскостями (011) в плоскости листа (цифры у изолиний указывают долю ориентировки, т.е. ориентировка (011) наиболее интенсивная, т.е. - основная)

В каждой точке ОПФ известна кристаллографическая ориентация отражающих плоскостей, лежащих в плоскости образца (т.е. символ Бравэ - {hkl}) и их доля в текстуре. Причем в каждой точке накладываются отражения от разных зёрен, но с одинаковой кристаллографической плоскостью в плоскости шлифа, при этом кристаллографические направления в НП этих зёрен разные.

Поскольку в дальнейшем рассматривается методика построения только ППФ, кратко рассмотрим методы построения ОПФ.

Есть разные *методы построения ОПФ: метод Харриса, метод Митчелла и Роуланда, метод Куртасова* и др. При съёмке обратных полюсных фигур по *методу Харриса* положение счетчика по отношению к первичному рентгеновскому пучку не остается постоянным. Определяют кривую распределения интенсивности отраженного от образца рентгеновского пучка при непрерывном изменении угла Θ . Снимают профиль ряда линии НКЛ для образца и эталона и определяют интегральную интенсивность каждой линии из условия пропорциональности её площади диаграммы, ограниченной кривой распределения интенсивности и линией фона. При съёмке угол поворота образца α остается неизменным (как правило, $\alpha=0$), а изменяется угол падения рентгеновского пучка θ (угол отражения). Угол θ устанавливают для каждой из интересующих плоскостей, например, (100), (110), (111), (112), (113) и т.д. Для каждого θ выполняется оборот образца вокруг своей оси, $\beta=0\dots360^\circ$, для усреднения результатов. Так как количество рентгеновских линий ограничено, то построенные этим методом ОПФ мало информативны.

По второму методу ОПФ рассчитывают из ППФ. На современных дифрактометрах этот метод является основным. *Метод Куртасова* требует ускоренной съёмки ППФ (для расчёта применяются суммарные интенсивности линий при дискретных углах α и $\beta=0\dots360^\circ$) и позволяет быстро построить ОПФ как на новых, так и на старых дифрактометрах.

Современные приборы для определения текстур (рентгеновские текстурные *дифрактометры* – дифрактометры общего назначения, оснащённые *гониометром* и *текстурной приставкой*; гониометр – прибор для измерения углов) имеют программное обеспечение для построения прямых и обратных полюсных фигур и определения функций распределения ориентировок. Стоимость их доходит до 1 млн.\$

3.3. Сравнение информативности ППФ и ОПФ

Как видим, текстура на рисунках 3.2 и 3.3 одинаковая – ориентировка $\{110\}[112]$, а выглядят ПФ совершенно по-разному, и методики их съёмки и построения различны. Можно отметить, что съёмка ППФ дает информацию об имеющихся ориентировках $\{hkl\}\langle uvw\rangle$, но не их доле в текстуре (точнее, даёт приблизительную информацию о доле), а съёмка ОПФ – об имеющихся ориентировках по плоскости $\{hkl\}$ и их доле в текстуре, но не даёт сведений об ориентации этих плоскостей по направлению. При этом интенсивность суммирует-

ся для всех плоскостей $\{hkl\}$ в плоскости съёмки вне зависимости от их ориентации по направлению прокатки. То есть по ОПФ нельзя определить долю отдельной ориентировки с учётом кристаллографического направления в НП. Полную информацию о текстуре даёт только обработка 2-4 ППФ с построением ФРО. Однако, построение ППФ или ОПФ, или ППФ + ОПФ во многих случаях достаточно для целей исследования.

ОПФ более информативна для проволоки, чем ППФ, т.к. в ней образуется волокнистая текстура, для характеристики которой достаточно указать только направление вдоль проволоки, но для листов больше информации можно получить из ППФ (потому что на ней ориентировки определены по плоскости и по направлению, а на ОПФ – только по плоскости). Однако, в некоторых случаях, например, при расчёте показателей анизотропии механических свойств листов с использованием экспериментальных значений свойств в плоскости листа, достаточно менее трудоёмкой съёмки ОПФ.

3.4. Прямые методы исследования текстур

1. Металлографический метод исследования текстур

Металлографический метод основан на том, что различные кристаллографические плоскости взаимодействуют с различной интенсивностью с химическими реактивами. Например, за одно и то же время взаимодействия реактивы образуют в окислительной среде на зёрнах разной ориентации *оксиды различной толщины*, которые имеют различные цветовые оттенки (желтый, зеленый, красный и т.д.) в *поляризованном* свете. Выполнив травление в заданных условиях, можно определить долю зерен, окрашенных, например, в красный цвет, который дает в использованном реактиве плоскость, например, (111). Доля красного цвета на поверхности исследованного шлифа покажет долю зерен, ориентированных гранью (111) в плоскости образца, вырезанного, например, из листа.

Другой металлографический способ – определение ориентировок зёрен *по форме ямок травления*. Реактив быстрее растравливает определённые кристаллографические плоскости (в ГЦК – плоскости $\{111\}$), в результате образуется гранённая лунка, имеющая разную форму в различно ориентированных зёрнах. После определения ориентации и площади многих зёрен данные можно программно обработать и построить ППФ, ОПФ или даже ФРО, если известна точная площадь зёрен каждой ориентации.

Обе разновидности метода имеют ряд недостатков, которые препятствуют их широкому универсальному применению.

2. Рентгеновский метод исследования текстур

Рентгенографический метод (есть ещё рентгеновский фотометод) основан на явлении дифракции рентгеновских лучей. Каждой кристаллографической плоскости (hkl) , согласно закону Вульфа - Бреггов, соответствует свой угол отражения θ (рис. 3.4) для излучения определенной длины волны

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (3.1)$$

где λ – длина волны излучения; n – порядок отражения; d – межплоскостное расстояние исследуемой плоскости (hkl) . Тогда при заданных λ , d имеем вполне определенный угол отражения θ для плоскости (hkl) .

Индексы кристаллографической плоскости, которая может дать отражение, определяются углом установки счетчика рентгеновских квантов. Угол 2θ между продолжением первичного луча и отраженным лучом, попадающим в щель счетчика, связан с индексами отражающих плоскостей $\{hkl\}$ кубических кристаллов (высшая категория) следующей формулой:

$$\sin \theta = \frac{n\lambda \sqrt{h^2+k^2+l^2}}{2a} \quad (3.2)$$

где a - параметр кубической решетки (ребро элементарной ячейки Бравэ). Значения этого параметра и других данных для расчёта приводятся в справочниках (например, для ряда веществ – в работе [6]).

Возможные для съёмки рентгеновские линии зависят от типа кристаллической решётки металла (табл. 3.1).

Табл. 3.1

Индексы интерференций ГЦК и ОЦК металлов

ОЦК	110		200	211	220	310		222	321	400	411 330		420	332	422
ГЦК		111	200		220		311	222		400		331	420		422

Основным устройством для изучения текстуры с помощью рентгеновского метода служит рентгеновский *гониометр* (прибор для измерения углов), работающий по *принципу Брэгга-Брентано* (отражённый луч фокусируется на окружности 5, проведённой из оси гониометра через источник луча – анод рентгеновской трубки 1 и счётчик 3 – см. рис.3.4). Гониометр устанавливается на дифрактометре. На гониометре монтируется текстурная приставка (ГП 2, ГП 14 и др.), в которой крепится образец 4.

По данным рентгенографического измерения строится *полюсная фигура (ПФ)* по плотности распределения полюсов в пространстве вокруг поликристаллического образца. Плотность распределения полюсов выводится из пространственного распределения интенсивности дифрагированных рентгеновских лучей, отраженных от определенной кристаллографической плоскости. Этот метод пригоден лишь для случая, когда размеры зерен в поликристалле настолько малы, что в изучаемой области образца содержится достаточно большое число кристаллитов (не менее тысячи). Для увеличения количества зёрен, попадающих в отражающее положение, текстурная приставка может совершать возвратно-колебательные движения. Существуют методики построения ПФ для крупнозернистых образцов. Методики съёмки и построения прямых и обратных полюсных фигур отличаются.

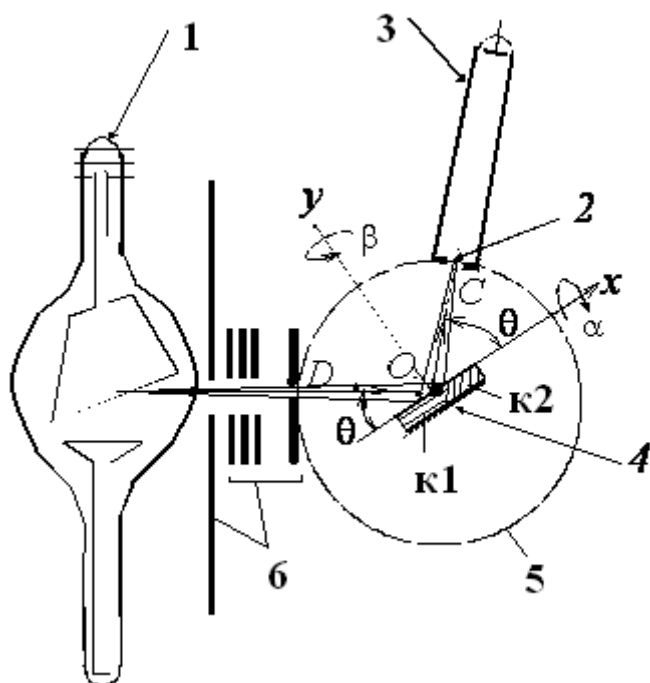


Рис. 3.4. Схема рентгеновской установки для исследования кристаллографической текстуры: 1 – рентгеновская трубка; 2 – входная диафрагма; 3 – счетчик отраженных импульсов; 4 – поворотный столик с образцом (текстурная приставка); образец установлен для съёмки на отражение; 5 – фокусирующая окружность Брегга-Брентано; 6 – горизонтальные и вертикальные щели, щели Соллера. k_1 , k_2 – кристаллиты с различной ориентацией отражающих плоскостей.

Методика съёмки и построения прямых ПФ

Прямая полюсная фигура $\{HKL\}$ представляет собой стереографическую проекцию выходов нормалей к одной заданной плоскости $\{hkl\}$ для всех кристаллов поликристалла и обозначается индексами этой плоскости. Для ее построения первоначально снимают текстурную кривую (НКЛ).

При исследовании образцов используются методы регистрации рентгеновских лучей с помощью *счетчика*, позволяющие выполнять количественный анализ деталей рассеяния ориентировок зерен (раньше использовался фотоме-

тод). Метод основан на измерении интенсивности отраженных рентгеновских лучей от исследуемого образца, попадающих в щель счетчика импульсов (см. рис. 3.4 и 3.5).

Поток рентгеновских лучей определенной длины волны испускает рентгеновская трубка 1 (рис. 3.4) (длина волны зависит от материала анода трубки). Он проходит через узкие горизонтальные и вертикальные щели 6 (могут также использоваться щели Соллера, но они значительно снижают интенсивность рентгеновских лучей) и попадает на исследуемый образец 4 с плоской поверхностью, который закреплен на поворотном столике текстурной приставки. Поворотный столик позволяет образцу вращаться вокруг собственной оси y (нормали к поверхности образца) на угол β , а также поворачиваться на угол α вокруг оси x приставки (горизонтальная ось, параллельная поверхности образца), изменяя положение образца относительно падающего пучка рентгеновского излучения и выводя в отражающее положение кристаллографические плоскости $\{hkl\}$ различных кристаллитов.

Существуют методы съёмки на отражение (с поверхности образца и тонкого подповерхностного слоя) и на просвет. На отражение можно снять только неполную ПФ до углов $\alpha=70 - 80^\circ$. Для получения текстурной кривой $\{HKL\}$ на отражение выполняется поворот образца вокруг горизонтальной оси приставки, а при съёмке на просвет - вокруг вертикали (ось гониометра), параллельной поверхности образца. Положение счетчика по отношению к рентгеновскому пучку при съёмке одной текстурной кривой (HKL) не изменяется.

Для съёмки и построения *полной прямой полюсной фигуры* совмещают два метода съёмки - *на отражение (метод Шульца)* и *на просвет* (для этого готовят тонкий образец шлифовкой и полировкой). Движение образца зависит от метода съёмки.

Съёмка на отражение, метод наклона (метод Шульца)

При съёмке *на отражение* зарегистрированная счетчиком интенсивность рентгеновских лучей пропорциональна количеству и площади тех кристаллитов вблизи поверхности образца, нормаль к отражающей кристаллографической плоскости $\{hkl\}$ которых лежит в плоскости рентгеновского пучка под углом к нему $90^\circ - \Theta$.

Для получения полюсной фигуры необходимо различно ориентированные плоскости семейства $\{hkl\}$ (в кристаллитах k_1 и k_2 на рисунках 3.4 и 3.5) привести в отражающее положение (перпендикулярно плоскости рисунка 3.4 и в вертикальное положение - на рис.3.5 б, в). Поскольку счетчик регистрирует

только интенсивности на экваторе круга отражений гониометра, то при наклоне образца на угол α вокруг направления ab , лежащего на его поверхности, в отражающее положение (параллельно оси гониометра O (рис. 3.4), под углом Θ к лучу) приводятся все кристаллографические плоскости, нормали n которых наклонены к поверхности образца на данный угол и выходят на диаметр образца cd (если образец круглый), перпендикулярный оси поворота (рис. 3.5). Далее, вращением образца вокруг нормали к его поверхности будут охватываться все плоскости решетки, нормали которых образуют конус с углом α вокруг нормали образца.

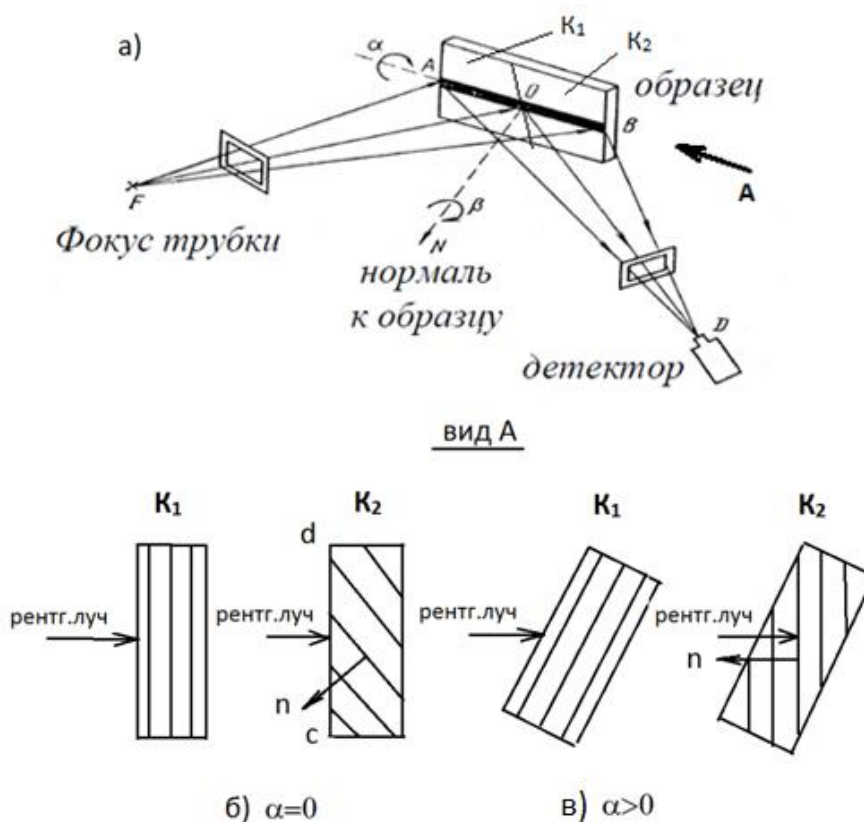


Рис. 3.5. Схема съёмки на отражение, метод наклона (а) и положение плоскостей $\{hkl\}$ в кристаллитах K_1 и K_2 относительно рентгеновского пучка в исходном положении образца (б) и после наклона его на угол α (в).

В исходном положении ($\alpha=0$) отражают кристаллиты K_1 с плоскостями (hkl) , параллельными поверхности образца (рис. 3.5б). В кристаллите K_2 эти плоскости наклонены к плоскости пучка под углом α . После наклона образца на угол α в отражающее положение попадают плоскости кристаллита K_2 (рис. 3.6в). Если отложить этот угол на стереографической проекции и отметить в этих точках интенсивность отражения, то получим ПФ (hkl) для данных ориентировок кристаллитов.

Поворот исследуемого образца по углам альфа производится либо непрерывно, либо ступенчато (через 3-5 град.) с одновременной записью интенсивности зарегистрированного счетчиком пучка. Соотношение скоростей наклона образца и вращения вокруг оси приставки при непрерывном движении определяет шаг спирали Архимеда для построения полюсной фигуры.

Образец в начальном положении устанавливается на столике таким образом, чтобы направление нормали к образцу находилось в плоскости, включающей падающий и отраженный от образца пучки. Этот угол принимается за нулевое положение ($\alpha=0$). Выставляется угол 2θ между осью падающего пучка и осью счетчика отраженных импульсов. При этом на счетчик попадают отраженные импульсы, количество которых пропорционально общей площади зерен, выходящих на поверхность образца исследуемой плоскостью (hkl), имеющей межплоскостное расстояние d (см. формулу (3.2)).

В этом положении ($\alpha=0$) образец поворачивают на угол 360° вокруг своей оси (один полный оборот) для того, чтобы вся совокупность плоскостей $\{hkl\}$ от всех зёрен могла дать отраженный сигнал от падающего на образец пучка. Если бы в отражение попадали одни и те же зёрна, то интенсивность в этом положении не должна была бы меняться.

После первого полного круга при $\alpha=0$ образец поворачивают на угол $\alpha=2,5\div 5^\circ$ и вновь проворачивают вокруг своей оси на 360° , продолжая записывать график $I(\beta)$ для второго круга. Эту процедуру продолжают до углов разворота образца $\alpha=70\div 75^\circ$. Обычно образец разворачивают только до углов $\alpha=70^\circ-75^\circ$, поскольку при больших углах могут возникать большие искажения ввиду нарушения фокусировки луча. Съёмку можно осуществлять при одновременном изменении углов α , β , что особенно удобно при съёмке на неавтоматизированном дифрактометре β . При этом график интенсивности отражения рентгеновских лучей будет иметь вид, показанный на рисунке 3.7а (изображение сильно сжато по горизонтали). Для построения ПФ в этом случае используется сетка Вульфа в виде спирали Архимеда с переменным шагом (рис. 3.8).

Для определения относительной интенсивности отражения рентгеновских лучей от исследуемого текстурованного образца, представленной на рис. 3.7а в виде кривой I , проводят такую же съёмку для бестекстурного образца (этало-на). Бестекстурный образец получают обычно из металлического мелкодисперсного порошка равноосной формы, полученного из того же материала, что и исследуемый текстурованный образец. Порошок хорошо перемешивают, добавляют связующее вещество (глицерин или технический вазелин), вновь пере-

мешивают, а затем заполняют полученной смесью специальную кварцевую кювету. Исследование интенсивности отражения в зависимости от углов α и β должно на эталоне показать постоянное значение $I(\beta)=\text{const}$ до углов $\alpha=30-45^\circ$. При больших углах интенсивность падает из-за дефокусировки. Эту величину принимают за единицу отражения (кривая 2 на рис. 3.7а). Интенсивность отражения $I(\alpha, \beta)$ от текстурированного образца считают в единицах эталона: $I_{обр}(\alpha, \beta)/I_{эт}(\alpha, \beta)$.

Съёмка на просвет.

При съёмке на просвет образец вращается вокруг нормали n (рис. 3.6) и осуществляется поворот образца вокруг оси y (ось гониометра) (дискретно с шагом $3 - 5^\circ$ или непрерывно).

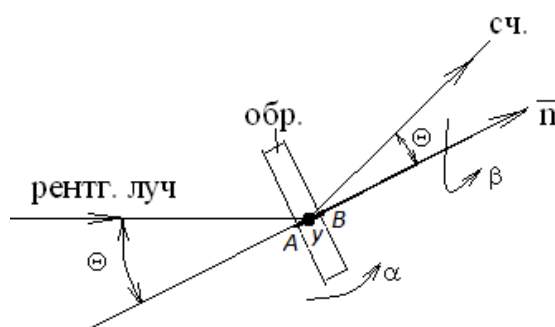


Рис.3.6. Схема съёмки на просвет: AB – отражающая плоскость; y, n – оси вращения

В исходном положении отражать будут плоскости $\{hkl\}$, перпендикулярные поверхности образца (AB на рис. 3.6). Они будут перпендикулярны плоскостям, отражающим в исходном положении в методе отражения (рис. 3.5б) и их стереографическая проекция будет находиться на наружном круге ($\alpha=90^\circ$). При повороте на угол α от 90° до 70° будет снята наружная часть ППФ. Состыковав её с ППФ, снятой на отражение от 0° до 70° , получим полную прямую ПФ. Достоинством метода является возможность усреднения данных о текстуре по всей толщине образца, но толщина образца ограничена $0,1 - 0,5$ мм из-за ослабления луча. Метод особенно эффективен для исследования фольг. Однако, при повороте на угол α около $90^\circ - \Theta$ происходит резкое ослабление луча с последующим его перекрытием. При изменении угла α меняется толщина металла, проходящего лучом и ослабляется его интенсивность, что требует внесения поправки в зарегистрированную интенсивность.

Построение ПФ.

При исследовании листовых материалов обычно плоскостью проекции для прямых полюсных фигур является плоскость прокатки. За системы координат

принимают направления прокатки (НП), поперечное направление (ПН) и направление нормали (НН) к плоскости прокатки. На плоскости проекций НП и ПН изобразятся полюсами на пересечении вертикального и горизонтального диаметров, соответственно, с большим кругом проекций, а НН - в центре круга (см. рис. 3.1). Любая точка полюсной фигуры определяет ориентацию кристаллической решетки относительно выбранных направлений НН - НП - ПН и её интенсивность.

При построении полюсные фигуры, снятые на просвет и на отражение отличаются точкой начала отсчета. Если в методах на просвет и на отражение в начальном положении образец выставлять НП вверх (вдоль оси гониометра), то за начальную точку отсчета углов β при построении полюсной фигуры методом на отражение принимают вертикальный диаметр - НП. Измерение угла α осуществляется от центра ПФ (от НН). В случае построения ее методом съемки на просвет за начало принимается точка на периферии полюсной фигуры, соответствующая направлению ПН. Это становится понятным из сравнения схем съёмки на рис. 3.5 и 3.6.

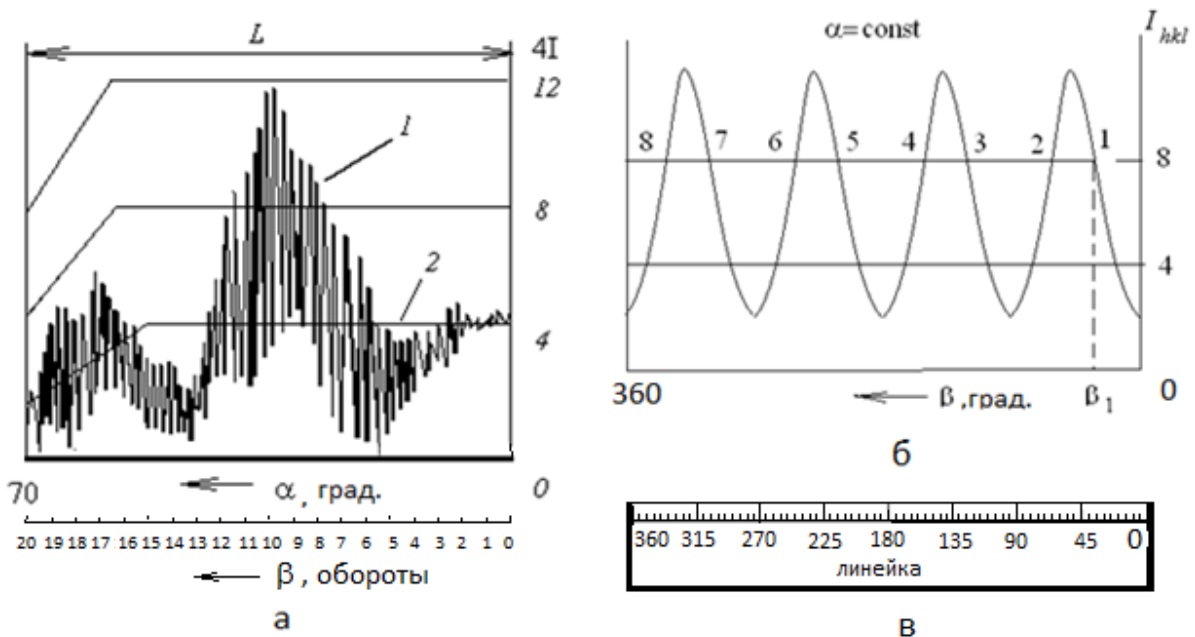


Рис. 3.7. Текстурная кривая $\{200\}$ (а), полученная съемкой на отражение (ускоренная ППФ): кривая 1 – интенсивность отражения от текстурированного образца; 2 – интенсивность отражения от бестекстурного эталона; текстурная диаграмма для одного оборота по углу β (б) при $\alpha = \text{const}$; линейка для измерения углов β (в).

Для анализа текстуры исследуемого образца на стандартную стереографи-

ческую проекцию для какой-либо плоскости (например, для плоскости $\{001\}$ на рис. 2.1) при помощи спирали Архимеда (рис. 3.8) наносят интенсивность отражений $I(\alpha, \beta)$. Шаг спирали за оборот соответствует шагу поворотов по углу α ($2,5 - 5^\circ$). За исходную точку отсчета, как было указано, принимают направление прокатки (НП). Процесс нанесения измеренных значений и проведения изолиний показан на рис. 3.9. На текстурограмме (рис. 3.7б) измеряют специальной линейкой (рис. 3.7в) углы β при постоянном значении угла α или переменном, если движение идёт по спирали. Для измерения углов применяется линейка, построенная в масштабе одного оборота образца на текстурограмме, т.е. расстояние от нуля до 360° на рис. 3.7б делится с шагом 5° . Измерение углов начинается с самого высокого уровня (уровень 12 на рис. 3.7а). Передвигая линейку с оборота на оборот, наносят все точки данного уровня интенсивности на сетку Вульфа (рис. 3.9а). Затем ближайшие точки соединяют изолинией и обозначают её интенсивность (рис. 3.9б, 3.10а). При этом нельзя соединять точки, лежащие через виток, если на промежуточном витке точек нет (рис. 3.10б). Затем опускаются на текстурограмме на уровень ниже и замеры и построения продолжают. При соединении точек более низкого уровня нельзя пересекать изолинии уже построенных уровней.

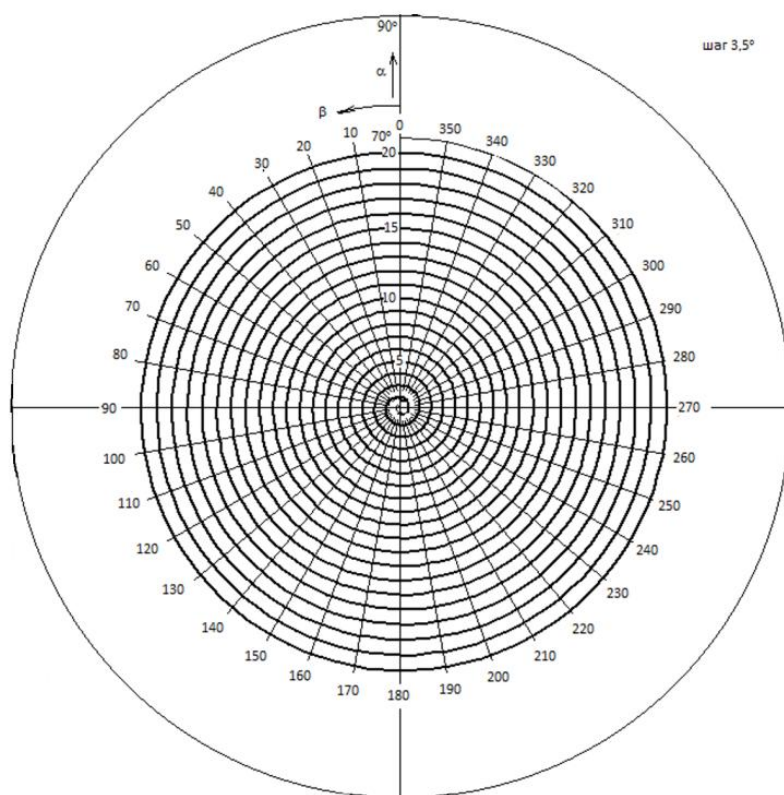


Рис. 3.8. Сетка Болдырева в виде спирали Архимеда с шагом по углу $\alpha=3,5^\circ$ за оборот для построения ПФ, снятой на отражение (до угла $\alpha=70^\circ$).

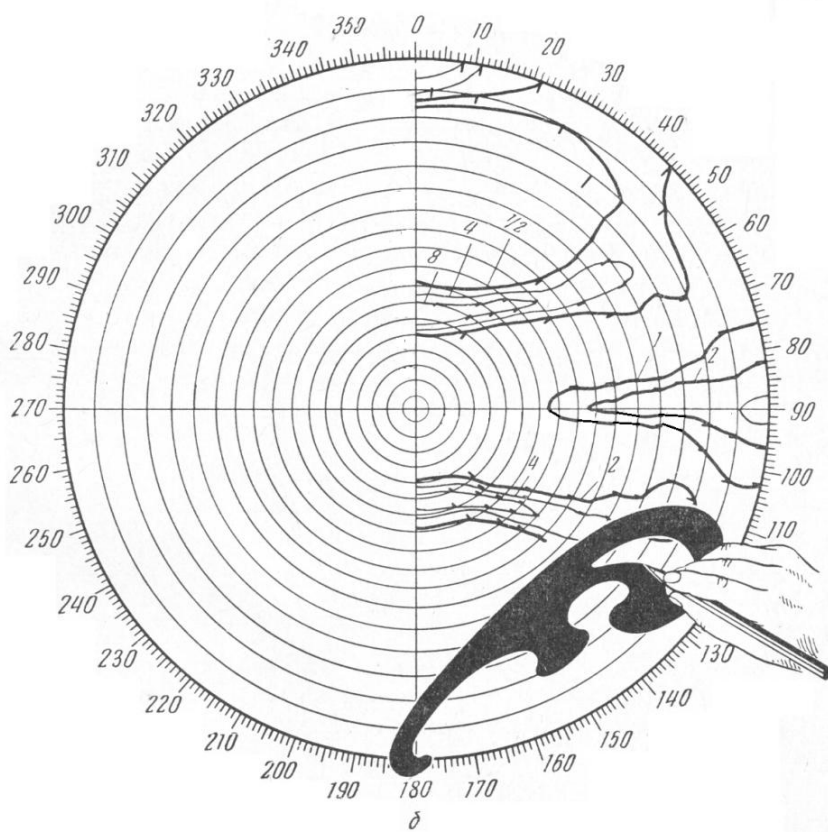
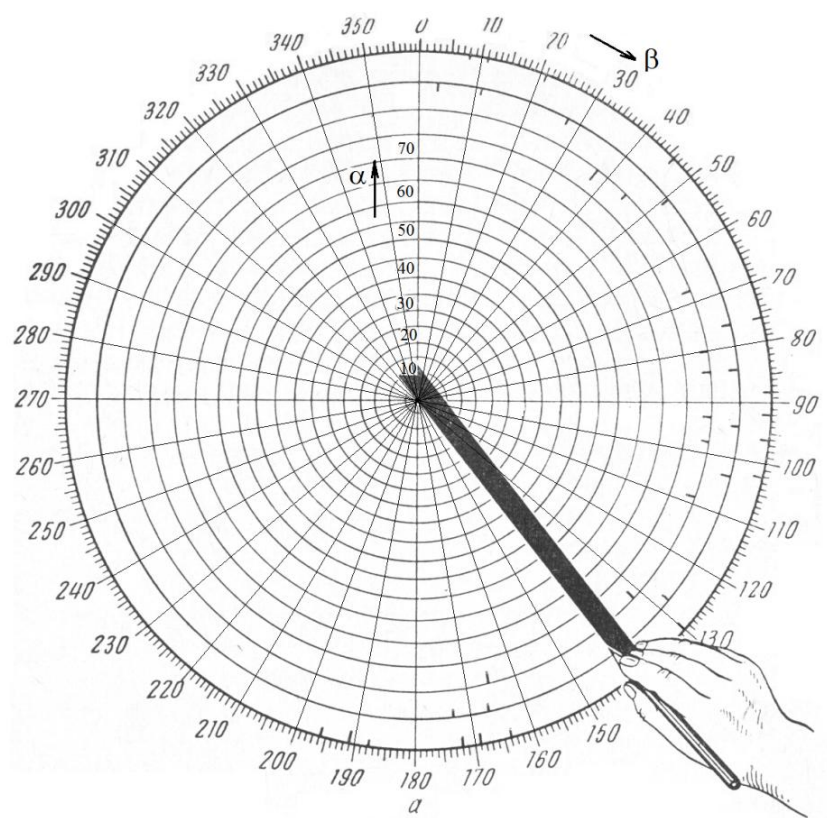


Рис. 3.9. Построение ППФ: а – нанесение измеренных значений; б – проведение высотных изолиний.

Построение полюсной фигуры по сути напоминает построение топографической карты, на которой высоты гор или холмов показаны не цветом, а изолиниями, определяющими некоторую высоту. Например, 100 м - линия, показывающая высоту ландшафта 100 м над уровнем моря. Аналогичные линии присутствуют на полюсной фигуре. Число 8 на рис. 3.9б, например, показывает интенсивность отражений от исследуемой плоскости $\{hkl\}$, измеренную в единицах отражений от бестекстурного эталона. Чем больше это число, тем выше интенсивность текстуры (острота текстуры). Если текстура слабая и для отражения нюансов текстуры надо строить промежуточные линии (например, $\frac{1}{2}$ на рис. 3.9б), то в этом случае интенсивность эталона принимают за 2 или 4 ед., а не за 1 ед.

Для расшифровки текстуры требуется построение 2 – 4 ППФ. Для ГЦК – металла строят чаще всего ППФ (111) и (100). Если их недостаточно, снимают и строят (110) и (311).

Таким образом, исследование текстуры включает в себя: подготовку образца, съёмку ОПФ или ППФ на рентгеновском дифрактометре, построение ПФ или ФРО (современные дифрактометры оснащены компьютером и ПФ строится автоматически. Также может быть построена ФРО), расшифровку ПФ (индексацию ориентировок и определение доли каждой ориентировки в текстуре). Чтобы разобраться с расшифровкой ППФ, необходимо ознакомиться с операциями, совершаемыми с помощью сетки Вульфа (см. гл.4).

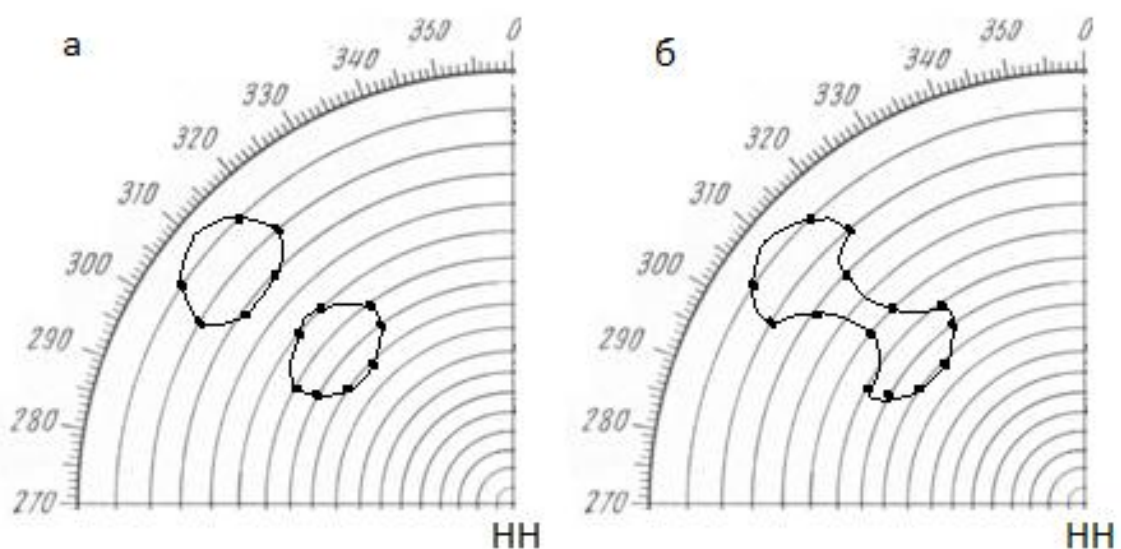


Рис. 3.10. Соединение точек одного уровня на ПФ: а – правильно; б – неправильно.

4. РАБОТА СО СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИЕЙ

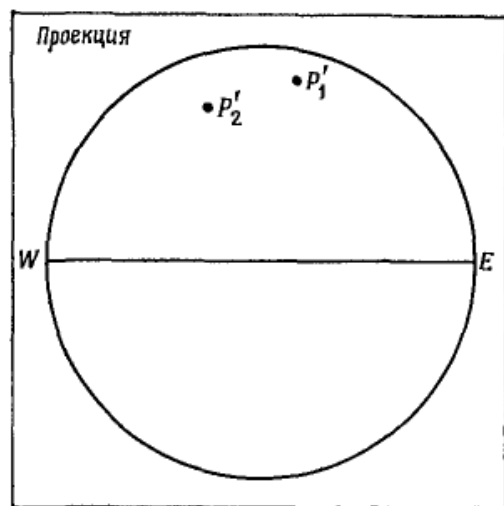
При расшифровке полюсной фигуры используют сетку Вульфа (рис. 2.2б). По ней определяют углы между полюсами, осуществляют поворот полюсов и др. операции. На сетке есть тонкие и жирные линии. Угол между тонкими линиями 2° , а между жирными – 10° .

При построениях стереографическая проекция вычерчивается на прозрачной бумаге (кальке) и накладывается па сетку Вульфа, а центры сетки и проекции фиксируются с помощью булавки таким образом, чтобы стереографическую проекцию можно было вращать над сеткой.

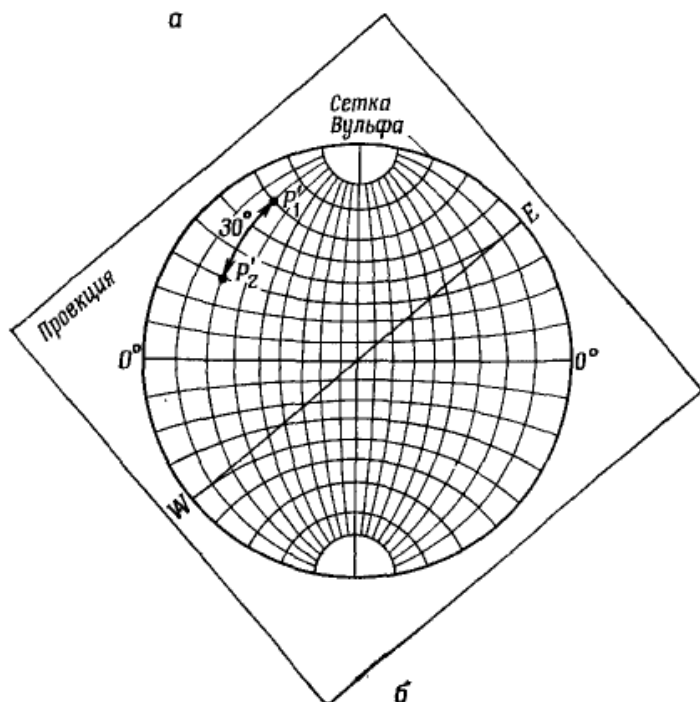
4.1. Определение угла между полюсами

Угол между полюсами внутри основного круга измеряется поворотом проекции до тех пор, пока оба полюса не лягут на один и тот же большой круг («меридианы» - большие круги, «параллели» - малые), после чего угол определяется по числу малых кругов, расположенных между полюсами (шаг сетки 2°)

(рис. 4.1, а, б). Углы между полюсами, расположенными на основном круге (это внешний круг), измеряются непосредственно по сетке. Если известны символы Бравэ направлений ($[hkl]$ и $[uvw]$), то в металлах с кубической решёткой угол между ними можно рассчитать по формуле (4.1).



а



б

Рис. 4.1. Определение угла между заданными полюсами.

а — стереографическая проекция двух полюсов P_1 и P_2 ; б — проекция повернута вокруг своего центра таким образом, что оба полюса теперь лежат на одном и том же большом круге сетки Вульфа. Угол между полюсами равен 30° .

$$\cos \rho = \frac{hu + kv + lw}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (4.1)$$

4.2. Поворот полюсов вокруг заданной оси

Часто бывает необходимо повернуть стереографическую проекцию вокруг заданной оси. Чтобы повернуть какой-либо полюс, например A_1 (рис. 4.2), вокруг полюса B , лежащего на основном круге, сетка поворачивается до тех пор, пока ось NS сетки не совпадет с диаметром основного круга, проходящим через полюс B .

Тогда A_1 поворачивается на требуемое число градусов вокруг B перемещением A_1 в A_2 по малому кругу (т.е. по параллели) (рис. 4.2). На рис. 4.2 представлен также случай, когда полюс при вращении оказывается вне основного круга. Истинная проекция C_2 , как видно из местоположения полюса C_2' , противоположного ему, должна лежать на том же малом круге, что и C_1 , (он лежит в нижней полусфере, точки которой отображаются крестиком).

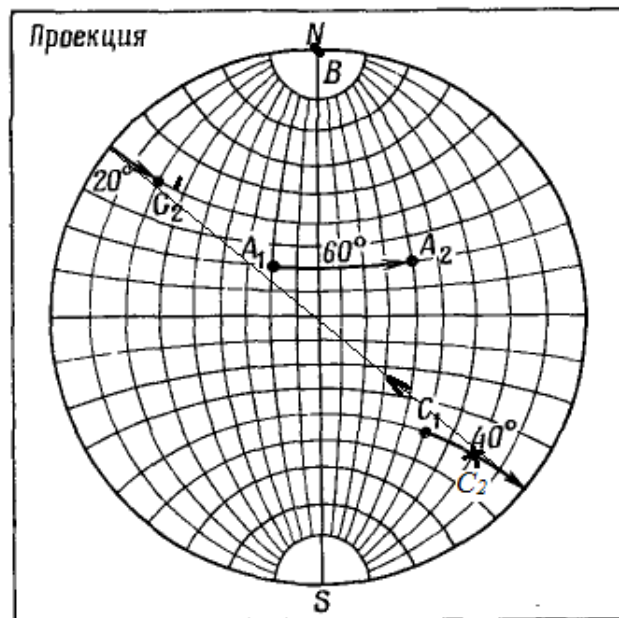


Рис. 4.2. Поворот полюсов вокруг оси, лежащей в плоскости проекции (ось совмещается с вертикальным диаметром сетки).

Если B не лежит на основном круге, можно использовать метод, иллюстрируемый на рис. 4.3. Сетка поворачивается до тех пор, пока NS не займет положение, перпендикулярное радиусу основного круга, проходящего через B . После этого B и A поворачивают вокруг оси NS , пока B не ляжет в центр основного круга (B' на рис. 4.3); точка A при этом переместится на тот же угол, что и полюс B , и придёт в A' . Если требуется повернуть A , скажем, на 40° по часовой стрелке вокруг B , то мы просто поворачиваем A' на 40° по часовой стрелке вокруг B' (используется сетка Болдырева, либо нужны циркуль и линейка) и получаем точку A'' . Это легко сделать, как показано на рис. 4.3.

Затем возвращаем B' обратно в B вращением вокруг NS , при этом A'' также вращается вокруг NS на тот же угол в том же направлении, и получаем точку A''' , которая и отвечает положению A после требуемого поворота.

Метод поворота без использования сетки Болдырева состоит в следующем (рис. 4.4). Для поворота C вокруг заданного направления B последний полюс выводят на внешний круг поворотом вокруг вертикального диаметра NS , а затем поворотом вокруг центра проекции – на вертикальный диаметр. Соответственно, одновременно поворачивается и полюс C . Затем полюс C поворачивают вокруг вертикального диаметра на заданный угол. При повороте вокруг вертикального диаметра полюса движутся по параллелям на одинаковые углы. Далее выполняется обратные повороты на своё место оси поворота B : поворачиваем сначала назад вокруг центра кальку, а затем делаем обратный поворот полюса B_1 , а вслед за ним и поворот полюса C_2 .

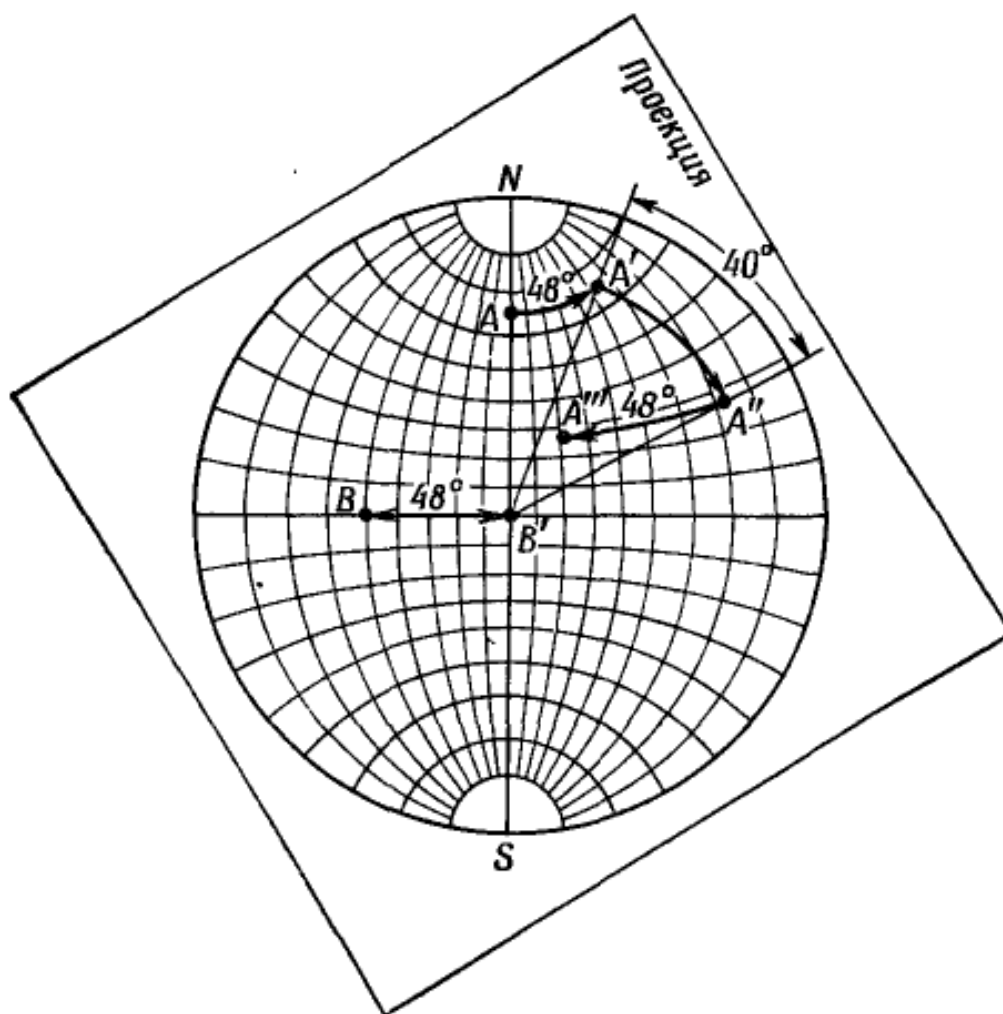


Рис. 4.3. Поворот полюсов вокруг наклонной оси (1-й метод).

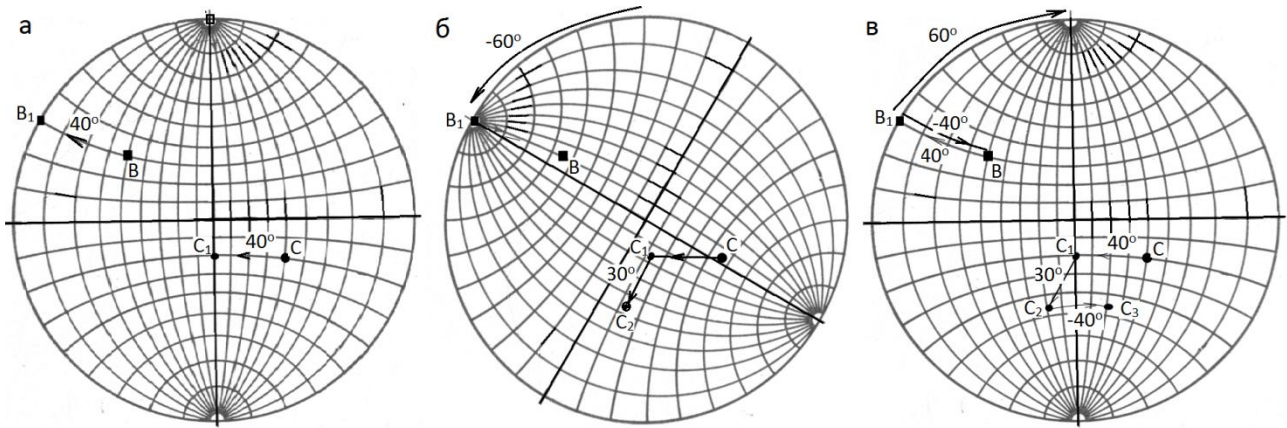


Рис.4.4. Поворот полюса C вокруг произвольно расположенной оси B (2-й метод): а – поворот полюсов вокруг вертикальной оси на 40° , чтобы полюс B попал на наружный (основной) круг; б – поворот сетки (или проекции полюсов) до совмещения B с северным полюсом (-60° для сетки); последующий поворот полюса C_1 вокруг вертикального диаметра на 30° ; в – поворот сетки в исходное положение (60°) и последующий обратный поворот полюсов на -40° . Полюс B возвращается в исходное положение, а C переходит в требуемое положение C_3 .

4.3. Определение индексов направления.

1. Определение индексов направления в стандартной проекции

Задан полюс A . Замеряем углы до него от полюсов (100) , (010) , (001) (именно в такой последовательности): $\alpha_1=125,3^\circ$, $\alpha_2=54,7^\circ$, $\alpha_3=54,7^\circ$. Находим косинусы углов и записываем их в круглых скобках через точку с запятой:

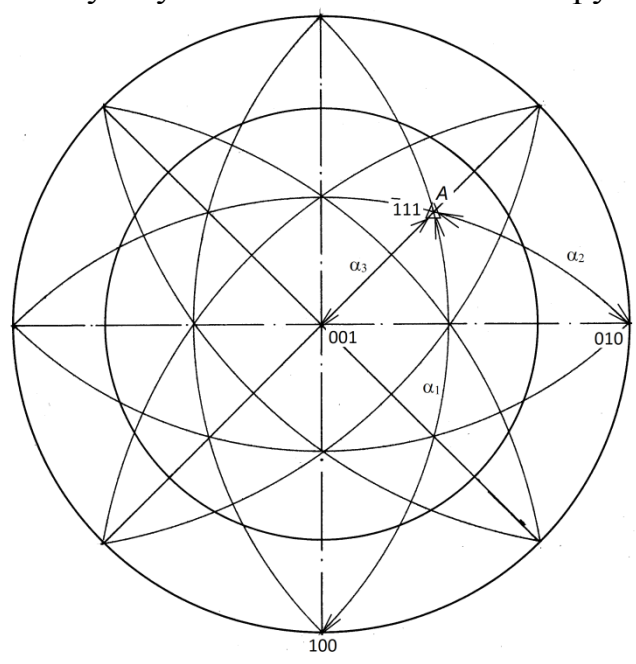
$(-0,578; 0,578; 0,578)$.

Приводим косинусы к взаимно простым целым числам, умножая или деля на одно и то же число (общий множитель). В данном случае числа равны, поэтому получаем:

$(T11)$.

Это и есть символ Бравэ направления A .

Рис. 4.5. К определению индексов направления в стандартной проекции



2. Определение индексов НН и НП на ППФ {100}.

Пусть на ППФ $\{100\}$ в результате её расшифровки мы определили положение полюсов $\{100\}$ для некой идеальной ориентировки $\{hkl\} \langle uvw \rangle$. Теперь требуется определить индексы этой ориентировки (рис. 4.6). Пусть 1-й полюс –

это $\langle 100 \rangle$, второй - $\langle 010 \rangle$ и третий - $\langle 001 \rangle$ (рекомендуется обозначать полюс, ближайший к НП - $\langle 100 \rangle$, ближайший к ПН - $\langle 010 \rangle$ и ближайший к НН - $\langle 001 \rangle$).

Замеряем углы α от НН до полюсов и углы β - от НП до полюсов. Получаем: $\alpha_1=74,5^\circ$, $\alpha_2=57,5^\circ$, $\alpha_3=36,5^\circ$; $\beta_1=40^\circ$, $\beta_2=67,5^\circ$, $\beta_3=120^\circ$. Находим косинусы и записываем их в соответствующих скобках: $(0,267;0,537;0,804)[0,766;0,383;-0,5]$. Приводим к целым числам: делим на наименьшее число в соответствующих скобках, получаем $(1;2,01;3,01)[2;1;1,305]$; Во вторых скобках домножаем все числа на 3, получаем $(1;2,01;3,01)[6;3;-3,915]$; учитывая неточность определения углов по сетке Вульфа $\pm 1^\circ$ (для угла $120^\circ \pm 1^\circ$ получим $\cos(120^\circ \pm 1^\circ) = -0,5 \pm 0,015$; делим на 0,383 и умножаем на 3, получаем $3,915 \pm 0,117$, т.е. число 4 лежит в этом диапазоне), округляем до целых и окончательно получаем ориентировку

$$(123)[63\bar{4}].$$

Проверяем условие перпендикулярности направлений НН и НП по формуле (1.1):

$$1*6+2*3-3*4=0.$$

Делаем вывод, что ориентировка определена правильно в пределах точности замеров.

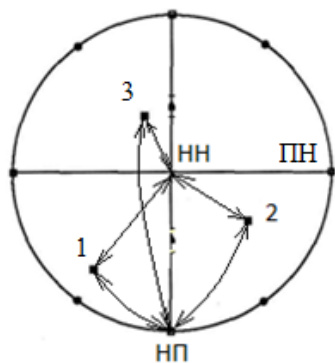


Рис. 4.6. К определению индексов НН и НП на ППФ $\{100\}$.

5. РАСШИФРОВКА ПРЯМЫХ ПОЛЮСНЫХ ФИГУР.

Кристаллические ориентировки листового материала часто настолько сложны, что описать текстуру словами трудно, а иногда и невозможно. Полюсные фигуры наиболее совершенно и точно воспроизводят текстуру. Представление текстуры при помощи прямых полюсных фигур является достаточно информативным. Однако для получения необходимой информации относительно свойств материала с данной текстурой или особенностей формирования полученной текстуры необходимо выполнить расшифровку полюсной фигуры и интерпретировать полученные данные.

Основные пути расшифровки полюсной фигуры - это описание ее либо с помощью идеальных ориентировок и рассеяния вокруг них, либо при помощи полных или неполных аксиальных текстур, либо при помощи функции распределения ориентировок.

С начала исследования текстур стремились описать текстуры с помощью так называемых идеальных положений или идеальных ориентировок. Под этим понимают ориентировки монокристаллов, которые рассматриваются по отноше-

нию к текстурам и характеризуются тем, что определенная кристаллическая плоскость располагается параллельно плоскости прокатки и одно направление, лежащее в этой плоскости, параллельно НП.

Если не удастся полностью описать текстуру с помощью одной ориентировки, то находят вторую или несколько идеальных ориентировок. Все положения кристаллитов, отклоненные от идеальных ориентировок, рассматривают как рассеяние и не учитывают (или задают рассеяние с помощью углов $\pm\delta$). Преимуществом такого способа является то, что текстура описывается просто, ориентировки можно сопоставлять между собой, если они не имеют сложных индексов, и теоретическое рассмотрение возникновения текстур облегчается.

Описание текстур с помощью идеальных ориентировок имеет историческое объяснение: в то время, когда впервые была определена текстура листового материала, еще не были известны полюсные фигуры.

Идеальная ориентировка определяется индексами кристаллографической плоскости (hkl) , лежащей в плоскости прокатки, и индексами кристаллографического направления $[uvw]$, лежащего в НП. То, что направление $[uvw]$ лежит в плоскости (hkl) , выражается уравнением (1.1).

В кубическом кристалле в общем случае для плоскости (hkl) имеется еще 47 равноценных плоскостей, индексы которых получаются из (hkl) в результате всех возможных перестановок и изменений знаков; т. е. можно произвольно переставлять индексы плоскости прокатки и менять их знаки. Но для индексов направления $[uvw]$ выбор ограничен, как это следует из уравнения (1.1).

Пусть (hkl) - индексы плоскости прокатки и $[uvw]$ — индексы направления прокатки. Если переставить индексы плоскости и произвольно изменить их знаки, то в общем случае необходимо это проделать и с индексами направления прокатки. Только тогда будет удовлетворяться уравнение (1.1), т. е. направление будет лежать в плоскости.

Следует упомянуть о различных формах скобок для обозначения плоскостей и направлений. Круглые скобки (hkl) означают единичную плоскость, например: (100) , $(\bar{1}00)$, (010) , $(0\bar{1}0)$, (001) или $(00\bar{1})$. В фигурных скобках $\{hkl\}$ обозначают все плоскости определенного типа, т. е. кристаллографически равнозначные плоскости кристалла. Например, для кубического кристалла $\{111\} = (111)$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(1\bar{1}\bar{1})$, $(11\bar{1})$, $(\bar{1}1\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ и (111) . Таким образом, $\{111\}$ означает как совокупность октаэдрических плоскостей, так и произвольно выбранную плоскость этого типа. В соответствующих случаях для направления применяются квадратные $[uvw]$ или острые $\langle uvw \rangle$ скобки.

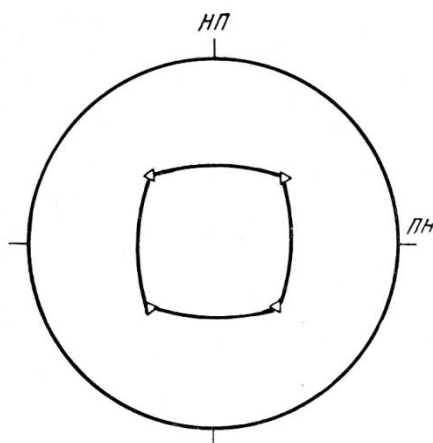


Рис. 5.1. Полюса (111) кубической ориентировки (001)[100]

Для определения идеальной ориентировки поступают следующим образом: совмещают путем наложения полюса плоскостей стереографической проекции монокристалла с максимумами полюсной плотности экспериментально полученной полюсной фигуры. Естественно, для полюсной фигуры (111) выбирают только полюса (111) монокристалла.

Соответственно симметрии ППФ листа, полюса монокристалла на полюсной фигуре повторяют 4 раза. Это повторение получается при зеркальном отображении в плоскостях: НН—НП и НН—ПН. При ориентации высокой симметрии, такой как кубическая (001) [100], зеркальное отображение не дает новых полюсов (рис. 5.1). При менее симметричных ориентировках полюса плоскостей удваиваются или повторяются четырехкратно, как показано на рис. 5.2а и 5.2б для идеальных ориентировок (001) [210] и (123) [412]. Получают две или четыре кристаллографически равнозначных компоненты идеальной ориентировки.

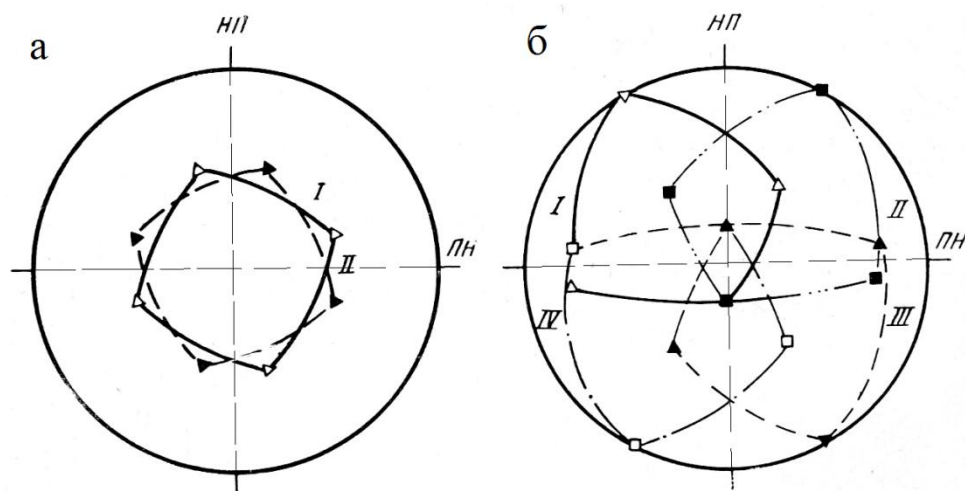


Рис. 5.2. Полюса {111} ориентировок: а - {001}<210> с двумя компонентами (I и II); б - {123}<412> с четырьмя компонентами (I - IV). Соответственно, обе позиции - ПФ (111).

Последовательность расшифровки ППФ

В общем виде процесс заключается в том, что для определения идеальной ориентировки экспериментальную полюсную фигуру $\{hkl\}$ накладывают на стереографическую проекцию монокристалла и совмещают полюса $\{hkl\}$ с максимумами полюсной плотности таким образом, чтобы центры их совпадали.

Однако при такой расшифровке всегда остается элемент неопределенности вследствие влияния наложения ориентировок. Поскольку каждая ориентировка описывается не одним, а несколькими полюсами, не всегда возможно понять, какой полюс относится к той или иной ориентировке. Для повышения достоверности полученных данных выполняют съемку полюсных фигур для нескольких линий (НКЛ).

Если хотят найти идеальную ориентировку для экспериментально построенных ППФ, то для кубической системы исходят из полюсной фигуры $\{100\}$. На ней требуется определить позиции только 3-х полюсов $\{100\}$, между которыми углы по 90° . На ППФ $\{111\}$ уже требуется найти положение 4-х полюсов. Кроме того, по ППФ $\{100\}$ проще рассчитать индексы найденной идеальной ориентировки.

При расшифровке ППФ области повышенной полюсной плотности совмещают с полюсами $\{100\}$ идеальной ориентировки. Сначала помещают один из полюсов $\{100\}$ в выбранную точку ППФ. Эта точка находится в одном из максимумов на ППФ или на гребне (в середине области рассеяния). Начинают с наибольшего максимума. Затем второй полюс, отстоящий от первого на 90° , размещают в области повышенной полюсной плотности, используя приемы работы со стереографической проекцией, изложенные в главе 4. Напоминаем, что угол 90° измеряется вдоль больших кругов («меридианов»). После нахождения положения 2-го максимума, ищут положение 3-го, отстоящего от первых двух на 90° . Далее проверяют, чтобы 3-й полюс также находился в области повышенной полюсной плотности. Затем определяют индексы НН и НП по углам между этими направлениями и полюсами $\{100\}$ (см. п. 4.3) и записывают символ Бравэ полученной идеальной ориентировки $(hkl)[uvw]$.

Для примера рассмотрим расшифровку ППФ $\{100\}$ холоднокатаного алюминиевого листа с помощью ориентировки $\{110\}\langle 112\rangle$ (рис. 5.3).

Помещаем один полюс (100) в нижний левый максимум ($I=92$). Вторым полюсом помещаем в диагональном от первого максимуме на расстоянии 90° от первого, третий попадает на наружный круг. После измерения углов от центра ППФ до полюсов $\{100\}$ и от НП до этих же полюсов по методике п. 4.3 вычис-

ляем первую ориентировку $(110)[\bar{1}12]$. Вторую ориентировку - $(\bar{1}\bar{1}0)[\bar{1}12]$ находим симметричным преобразованием – поворотом вокруг вертикальной оси на 180° или отражением относительно вертикального или горизонтального диаметра. В данном случае способ преобразования не играет роли.

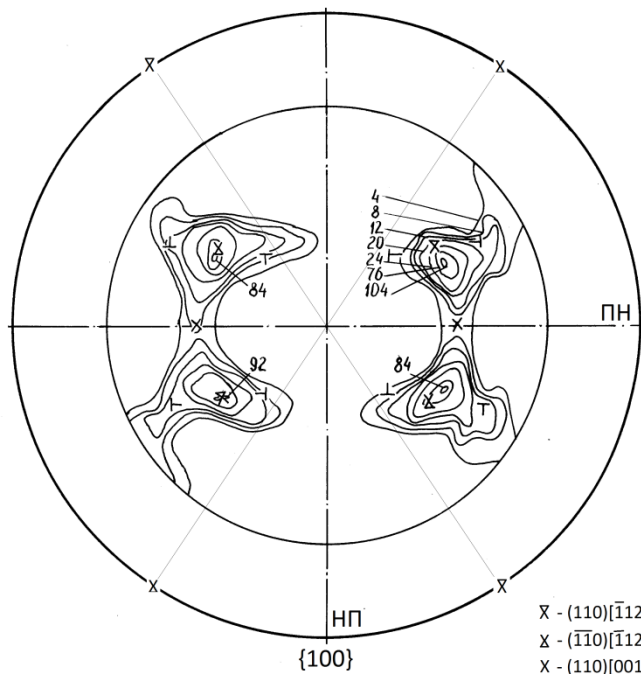


Рис. 5.3. ППФ $\{100\}$ холоднокатаного алюминия.

После определения положения полюсов $\{100\}$ на ППФ $\{100\}$ находят положение полюсов $\{111\}$ на ППФ $\{111\}$ того же образца для этой же идеальной ориентировки. Покажем это для ориентировки $(123)[63\bar{4}]$, для которой ранее определяли положение полюсов $\{100\}$ (см. п.4.3) (рис. 5.4). Для этого определяют положение 4-х полюсов

$\{111\}$ относительно НП и НН. На стандартной стереографической проекции кубического кристалла по уже найденным углам между НП, НН и полюсами $\{100\}$ отмечают полюса (hkl) (НН) и $[uvw]$ (НП) (рис. 5.4а), используя сетку Вульфа (см. рис. 2.2б). Затем поворачивают эти полюса с помощью сетки Вульфа, чтобы полюс (hkl) пришёл в центр проекции, а полюс $[uvw]$ – на наружный круг (на рис. 5.4а поворот вокруг диаметра OO' , перпендикулярного (001) - НП). Одновременно поворачивают и полюса $\{111\}$. Далее поворачивают полученную проекцию, чтобы полюс (uvw) (НП) расположился вертикально вниз. На рисунке 5.4в отдельно показана полученная ППФ $\{111\}$ ориентировки $(123)[63\bar{4}]$. После этого отмечают положение полюсов $\{111\}$ на ППФ $\{111\}$ образца и проверяют, что все они находятся в области повышенной полюсной плотности. Если хотя бы один полюс находится в области $I(hkl) \leq 1$, то такой ориентировки в текстуре нет. Интенсивность ориентировки приблизительно определяется по интенсивности наиболее слабого полюса из всех полюсов $\{100\}$ и $\{111\}$.

После нахождения первой идеальной ориентировки процедуры повторяют для остальных возможных ориентировок.

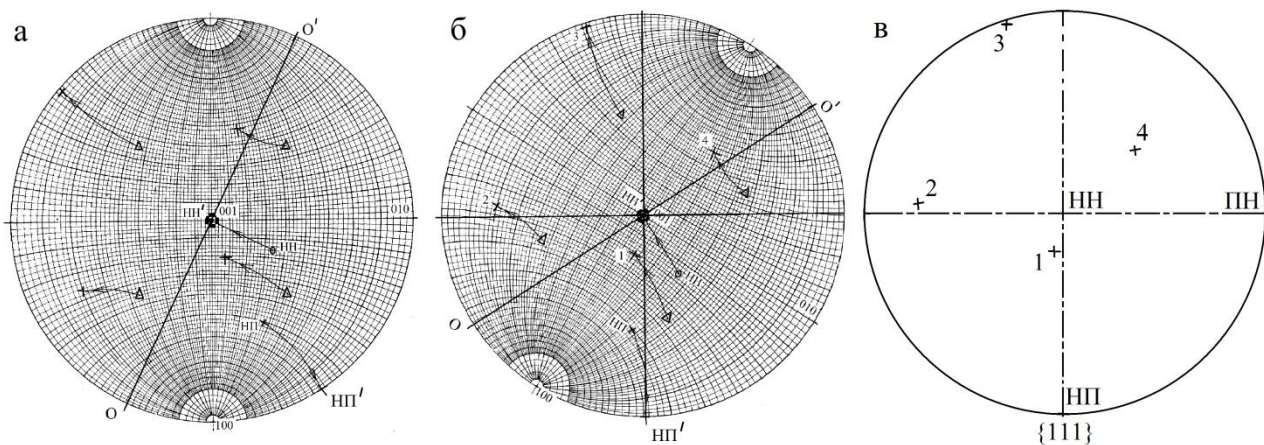


Рис. 5.4. Последовательность действий для получения ППФ $\{111\}$ идеальной ориентировки $(123)[63\bar{4}]$: а – поворот полюсов $\{111\}$ вокруг диаметра OO' ; б – поворот ППФ вокруг центра; в – ППФ $\{111\}$ идеальной ориентировки $(123)[63\bar{4}]$ (где (123) – NH, $[63\bar{4}]$ – НП)

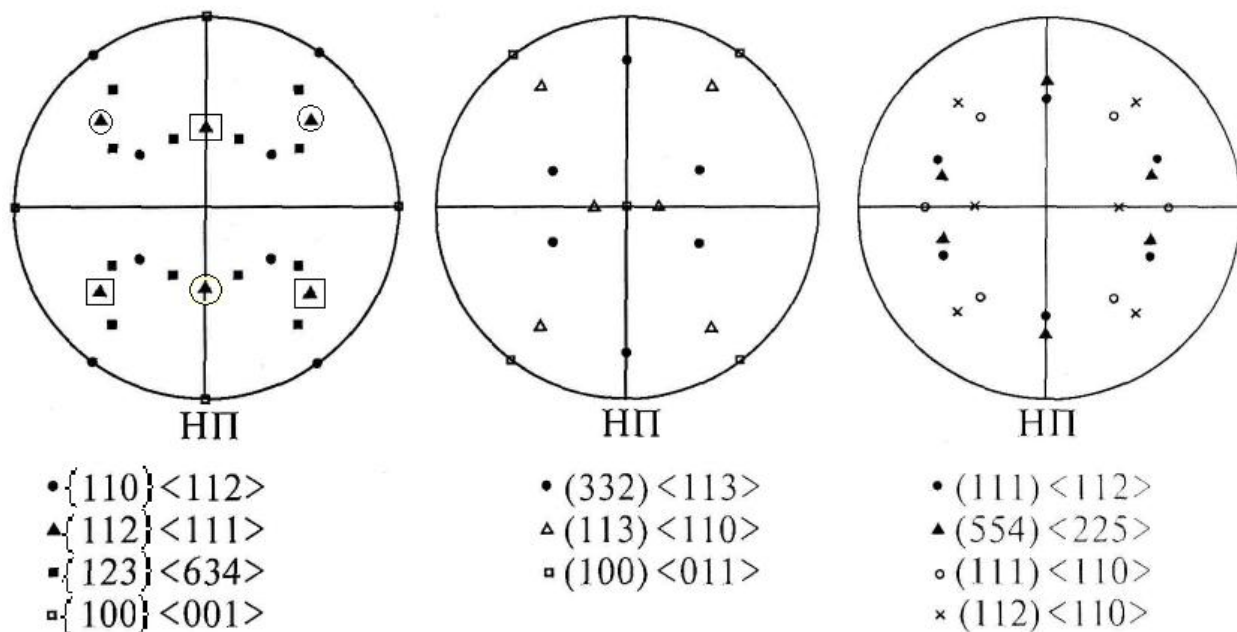


Рис. 5.5. Полюсные фигуры $\{200\}$ идеальных ориентировок типичных текстур прокатки (кружком и квадратом выделены две компоненты ориентировки $\{112\} \langle 111 \rangle$)

При прокатке листов ГЦК – металлов после больших степеней деформации образуются текстуры с ориентировками из одного и того же набора характерных ориентировок. Текстуры отличаются лишь сочетанием этих ориентировок и их интенсивностью. Чтобы каждый раз заново не повторять одни и те же операции для поиска ориентировок, их наносят на отдельную ППФ, которую в последующем накладывают на экспериментальную ППФ для её расшифровки. На рис. 5.5 приведены полюсные фигуры $\{100\}$, показывающие положения по-

люсов $\{001\}$ для идеальных ориентировок характерных текстур прокатки ГЦК - металлов.

Аналогичные комбинации характерных ориентировок существуют для ОЦК и ГПУ металлов.

Литература

1. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. Бородкина М. М., Спектор Э. Н. М.: «Металлургия», 1981. 272 с.
2. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: в 6 т./ Под общей ред. Б.А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. Том 3. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов/ Н.В. Волков, В.И. Скрытый, В.П. Филиппов, В.Н. Яльцев. М.: МИФИ, 2008. 808 с.
3. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М.: Мир, 1974. 496 с.
4. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. М.: Металлургия, 1969. 655 с.
5. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд. доп. и перераб. М.: МИСИС, 1994. 328 с.
6. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. Приложения. М.: Металлургия, 1970. 109 с.