

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)**

Институт машиностроения и автомобильного транспорта

Кафедра технологии функциональных и конструкционных материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к практическим и лабораторным работам по дисциплине  
**«Основы кристаллографии»**  
для направления подготовки  
**22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»**  
(уровень бакалавриата)

Составитель:  
Л.В.Картонова

Владимир – 2016 г.

УДК 548

**Методические указания** к практическим и лабораторным работам по дисциплине «Основы кристаллографии» для направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» (уровень бакалавриата)/ Владим. гос. ун-т; Сост.: Л.В.Картонова. Владимир. 2016. – 57 с.

Содержит методические указания к практическим и лабораторным работам по дисциплине «Основы кристаллографии» для направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» (уровень бакалавриата)

Библиогр.: 5 назв.

## ВВЕДЕНИЕ

*Целью дисциплины «Основы кристаллографии» является формирование инженерных знаний и навыков в области кристаллографии.*

В результате освоения данной дисциплины у студентов формируются основные общепрофессиональные и профессиональные компетенции, отвечающие требованиям ФГОС ВО, к результатам освоения ОПОП ВО по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Таблица 1. Требования к результатам освоения программы бакалавриата

Код	Требования к результатам освоения программы бакалавриата
ОПК-5	способностью применять в практической деятельности принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды
ПК-6	способность использовать на практике современные представления о влиянии микро- и нано- структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями
ПК-11	способность применять знания об основных типах современных неорганических и органических материалов, принципах выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их применения при проектировании высокотехнологичных процессов

В результате освоения дисциплины «Основы кристаллографии» обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

**Знать:**

основные принципы описания и изучения кристалла и кристаллического состояния вещества (ОПК-5; ПК-6, 11).

**Уметь:**

самостоятельно изучать и рассматривать кристаллофизические особенности твердых тел с целью их применения и для получения различных свойств металлов и сплавов (ОПК-5; ПК-6, 11).

### **Владеть:**

способностью использовать на практике современные представления о влиянии микро- и нано- структуры на свойства материалов (ОПК-5; ПК-6, 11).

Лабораторные работы являются формой групповой аудиторной работы в небольших группах для освоения практических навыков с целью формирования основных компетенций, необходимых для освоения основной профессиональной образовательной программы (ОПК-2, 4). В табл. 2 представлен возможный перечень практических и лабораторных работ.

Таблица 2. Перечень практических и лабораторных работ

№ п/п	Наименование практических и лабораторных работ	Формируемые компетенции
1.	Изучение процесса кристаллизации азотнокислого свинца. Зарождение и рост кристаллов.	ОПК-5; ПК-6, ПК-11
2.	Изучение простых форм кристаллических многогранников	ОПК-5; ПК-6, ПК-11
3.	Анализ пространственных решеток. Определение кристаллографических индексов плоскостей.	ОПК-5; ПК-6, ПК-11
4.	Изучение методов рентгеноструктурного анализа (Расчет межплоскостных расстояний и рентгеновской плотности вещества)	ОПК-5; ПК-6, ПК-11
5.	Изучение методов рентгенофазового анализа	ОПК-5; ПК-6, ПК-11
6.	Изучение симметрии кристаллических многогранников (симметрии континуума)	ОПК-5; ПК-6, ПК-11
7.	Изучение типов изоморфных замещений	ОПК-5; ПК-6, ПК-11
8.	Изучение строения и свойств минералов	ОПК-5; ПК-6, ПК-11

Приступая к выполнению практической или лабораторной работы, студент должен заранее, при подготовке к работе, ознакомиться с методическими материалами по данной работе и с рекомендованной литературой, изложенными в практикуме по заданной тематике.

В течение очередного занятия студенты должны защитить оформленный отчет по предыдущей работе и выполнить следующую работу.

## РАБОТА N 1

### Изучение процесса роста кристаллов. Кристаллизация азотнокислого свинца.

Цель работы: изучить процесс образования кристаллов из жидкого состояния.

#### Задания

1. Используя учебники и пособия, пути образования кристаллов.
2. Изучить процесс образования кристаллов соли из жидкого состояния.
3. Проследить за процессом кристаллизации капли азотнокислого свинца  $Pb(NO_3)_2$ .
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Составить отчет.

#### Общие положения

Как известно, кристаллы могут образовываться как из жидких, так и газообразных и твердых фаз:

- кристаллизация из расплавов;
- кристаллизация из растворов;
- кристаллизация из газообразного состояния (возгонка);
- кристаллизация из твердого состояния.

*Кристаллизация из растворов* характеризуется тем, что растворитель отдает избыток растворенного в нем вещества. Такой вид кристаллизации достаточно часто наблюдается в природе. Примером может служить образование мощных отложений солей на дне озер.

Выпадение кристаллов возможно только из пересыщенных растворов, этого можно добиться следующим образом:

- испарением или выпариванием растворителя;

- введением в растворы веществ, которые понижают растворимость получаемых кристаллов;
- изменением температуры;
- изменением давления.

В природе процессы кристаллизации из растворов широко распространены. Наглядный пример – мощные залежи каменной соли. Искусственную кристаллизацию применяют на химических предприятиях и проводят в исследовательских лабораториях.

В большинстве случаев растворимость веществ падает с понижением температуры, например у медного купороса ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Растворимость таких веществ характеризуется положительным температурным коэффициентом растворимости.

В лабораторных условиях кристаллические тела проще всего получают из растворов.

В определенном объеме растворителя при определенных температуре и давлении какое-либо твердое вещество может растворяться лишь до известного предела.

Раствор, в котором при данных условиях происходит растворение новых добавочных порций этого твердого вещества, называется *ненасыщенным*.

Раствор, в котором при данных условиях прибавление новых порций того же твердого вещества не сопровождается их дальнейшим растворением и который вместе с тем не содержит избытка растворенного вещества, называется *насыщенным*.

В связи с тем, что с изменением температуры растворимость вещества изменяется (при повышении температуры - обычно растет), можно, изменив температуру (снизив ее), получить из насыщенного раствора неустойчивый, так называемый *пересыщенный раствор*. Его можно также получить путем испарения растворителя. Такой раствор по сравнению с насыщенным раствором содержит избыток растворенного вещества. С течением времени этот избыток обычно выделяется в виде кристаллического осадка. Если ввести в пересыщенный раствор мелкие кристаллики или даже пылинки растворенного веще-

ства, то сразу же начинается кристаллизация. Твердые частицы, способные вызвать кристаллизацию, называются «затравками».

Для получения кристаллов необходим пересыщенный раствор. Однако если вещество выпадает слишком быстро, то крупных, хорошо ограненных кристаллов не получается. Последние чаще всего развиваются лишь при достаточно медленно протекающей кристаллизации. Поэтому рекомендуется по возможности осторожно переводить насыщенный раствор в пересыщенное состояние. Такой переход проще всего осуществляется изменением температуры или увеличением концентрации путем удаления части растворителя.

С увеличением количества частиц растворенного вещества в растворе или с уменьшением скорости их движения (например, при понижении температуры) частицы начинают закономерно группироваться, образуя вначале мельчайшие кристаллики (зародыши), вырастающие затем в более крупные кристаллы.

Краткое описание метода получения кристаллов из водных растворов в условиях простейшего лабораторного оборудования:

Необходимо предварительно приготовить навеску (измельченное в порошок вещество) той или иной соли, взятой в качестве материала для кристаллизации. Приготовленную навеску ссыпается в стеклянную или фарфоровую емкость и заливается требуемое количество воды с помощью градуированной мензурки. Емкость необходимо покрыть стеклом, чтобы ускорить растворение соли в воде при нагреве. Полученный таким образом раствор рекомендуется отфильтровать. Отфильтрованная жидкость помещается в специальный стакан с широким дном и низкими стенками, так называемый кристаллизатор. В кристаллизаторе раствор остывает и достаточно интенсивно испаряется. Последнему способствует характерная форма кристаллизатора, создающая большую поверхность испарения.

В результате охлаждения и испарения получаем сначала насыщенный, а затем пересыщенный раствор. При этом в кристаллизаторе начинают выпадать кристаллики, вырастающие с течением времени. На следующий день после приготовления раствора полезно выбрать несколько наилучших из выпавших кристалликов, слить осторожно

раствор в чистый кристаллизатор и поместить туда отобранные кристаллы. От времени до времени следует готовить свежий раствор и переносить в него выращиваемые кристаллы. Для получения более или менее равномерно ограненных кристаллических многогранников требуется или ежедневно перекладывать растущие кристаллы с грани на грань, или же подвешивать их на волоске или нити.

### **Содержание отчета**

1. Название, цель работы и задание.
2. Описание процесса образования кристаллов поваренной соли выпадают из водного раствора  $\text{Na,Cl}$ .
3. Схема строения закристаллизовавшейся капли азотнокислого свинца и необходимыми объяснениями и выводами.
4. Список используемой литературы.

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы пути образования кристаллов?
2. Опишите процесс образования кристаллов из поваренной соли.
3. Каково строение кристаллического слитка?

## РАБОТА N 2

### Изучение простых форм кристаллических многогранников

Цель работы: изучение простых форм кристаллических многогранников.

#### Задания

1. Используя литературные источники, простые формы кристаллических многогранников и их производные.
2. Определить название форм кристаллических многогранников, предложенных преподавателем.
3. Проверить соотношение элементов огранки некоторых кристаллических многогранников, результаты внести в таблицу.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Составить отчет.

#### Общие положения

Под формой кристаллов подразумевается совокупность всех его граней. По внешней форме или облику (габитусу) кристаллы весьма многообразны.

По характеру своего внешнего ограничения кристаллы разделяются на две группы:

- простые формы;
- сложные (комбинационные) формы.

*Простыми формами* называются такие многогранники, которые состоят из одинаковых граней, имеющих симметричное расположение. Примерами простых форм служат октаэдр, тетраэдр, куб.

*Сложные (комбинационные) формы* или *комбинации простых форм* представляют собой комбинацию в одном кристалле нескольких простых форм. В природе подавляющее большинство кристаллов представляет комбинацию простых форм.

*Простые формы* могут быть как закрытыми, т. е. замыкающими со всех сторон пространство, так и открытыми, не замыкающими целиком пространство.

В кристаллографии установлено, что число простых форм, входящих в различные кристаллографические комбинации, является строго ограниченным и равняется 47. Для их обозначения применяется терминология, в основу которой положены следующие слова:

моно – один  
ди – два, дважды,  
три – три, трёх, трижды,  
тетра – четыре, четырех, четырежды  
пента – пять, пятью,  
гекса – шесть, шестью,  
гепта – семь, семью,  
окта – восемь, восемью,  
дека – десять,  
додека – двенадцать,  
эдра – грань,  
гония – угол,  
пинакс – доска,  
клино – наклоняю.

*К открытым простым формам* относятся:

*моноэдр* (рис. 2.1, а) – простая форма, состоящая из одной грани;

*диэдр* (рис. 2.1, б) – простая форма, состоящая из двух пересекающихся граней;

*пинакоид* (рис. 2.1, в) – простая форма, состоящая из двух параллельных граней;

*пирамиды* – простые формы, состоящие из трех или большего числа граней, пересекающихся в одной точке (рис. 2.2). По форме поперечного сечения пирамиды называются: тригональная (рис. 2.2, а), тетрагональная (рис. 2.2, б), гексагональная (рис. 2.2, в) и т. д.;

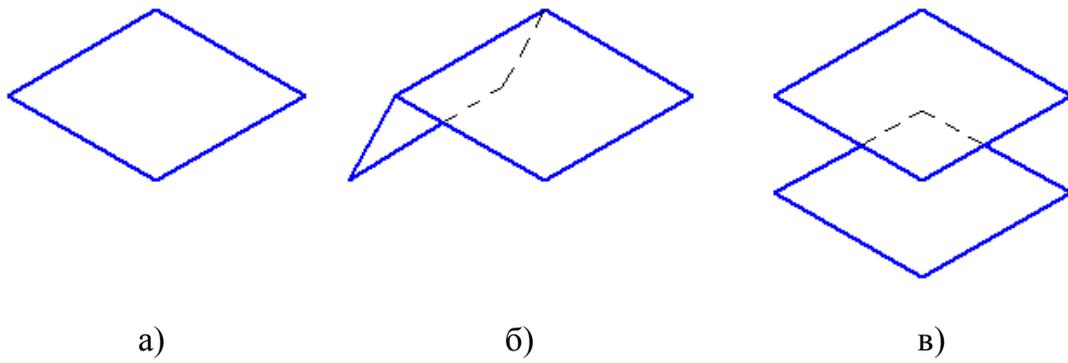


Рис. 2.1. Моноэдр (а), диэдр (б), пинакоид (в)

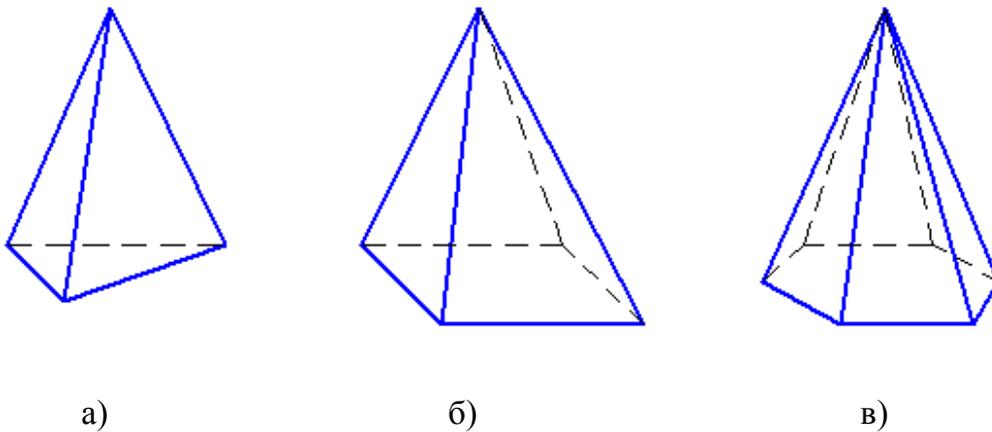
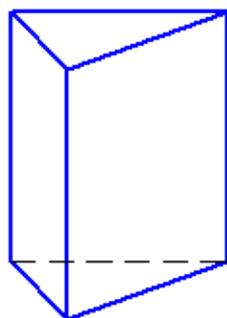


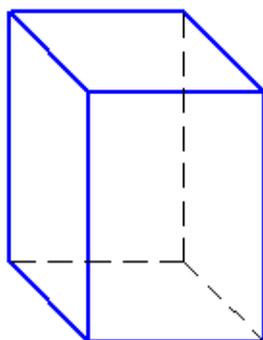
Рис. 2.2. Пирамиды

*призмы* – простые формы, состоящие из трех или большего числа граней, пересекающихся по параллельным ребрам (рис. 2.3). По форме поперечного сечения призмы называются: тригональная (рис. 2.3, а), тетрагональная (рис. 2.3, б), гексагональная (рис. 2.3, в) и т. д.;

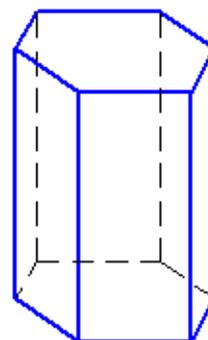
*дипирамиды* (рис. 2.4), представляющие собой две одинаковые пирамиды, сложенные своими основаниями. Названия дипирамид так же, как призм и пирамид зависят от формы их сечения: тригональная (рис. 2.4, а), тетрагональная (рис. 2.4, б), гексагональная (рис. 2.4, в) и т. д.



а)

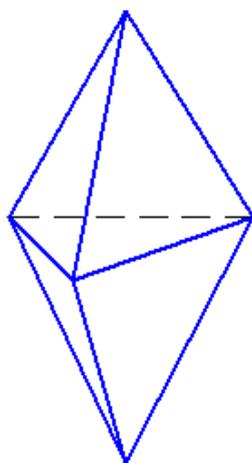


б)

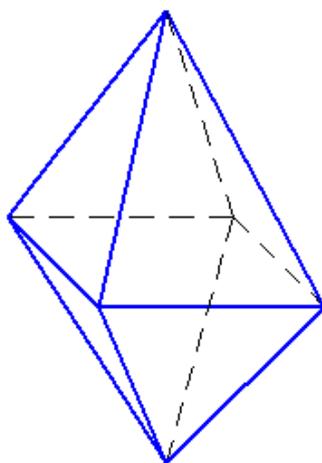


в)

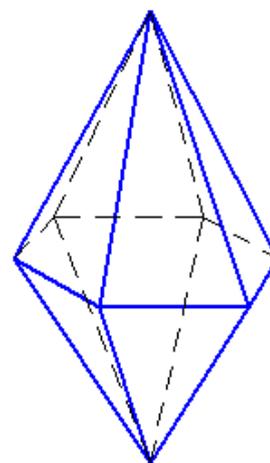
*Рис. 2.3. Призмы*



а)



б)



в)

*Рис. 2.4. Дипирамиды*

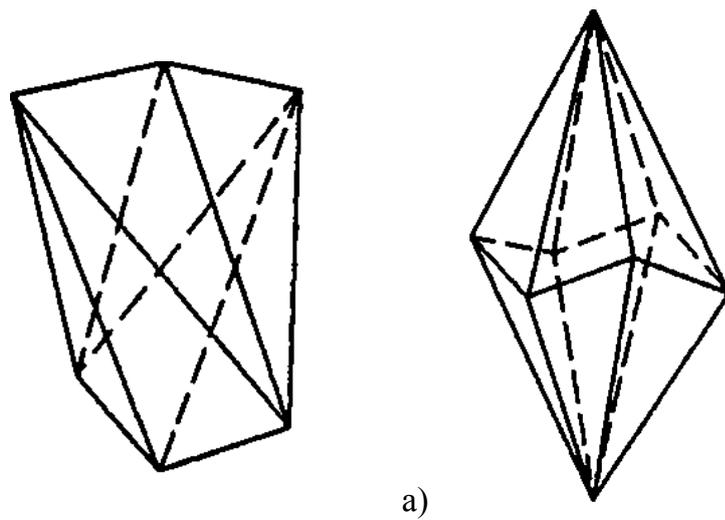
К закрытым простым формам относятся:

*скаленоэдры* (рис. 2.5, а) – простые формы, также сходны с дипирамидами, с боковыми гранями в виде разносторонних треугольников (скалено – разносторонний);

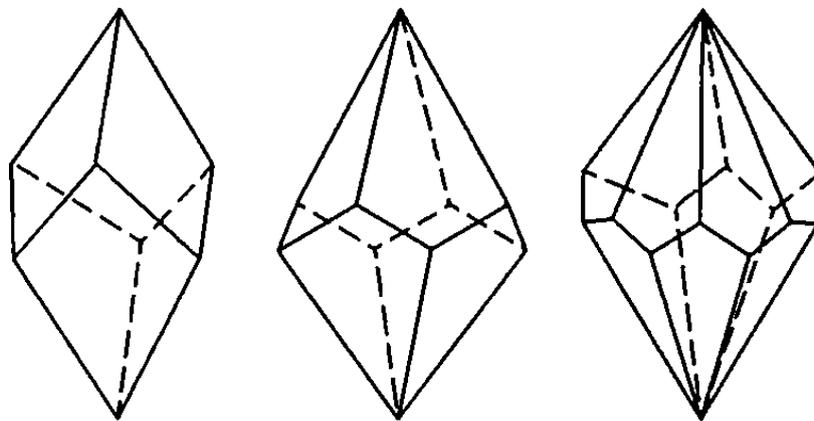
*трапециоэдры* (рис. 2.5, б) – простые формы, сходные с дипирамидами, но с боковыми ребрами, не параллельными между собой;

*ромбоэдр* (рис. 2.6, а) – простая форма, грани которой имеют форму ромбов;

*тетраэдры* (рис. 2.6, б) – простые формы, состоящие из четырех треугольных непараллельных граней.

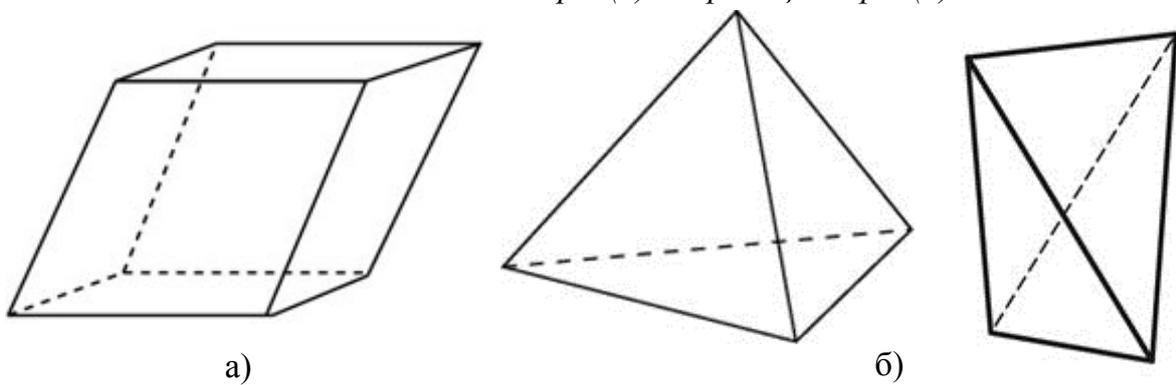


a)



б)

*Рис. 2.5. Скаленоэдры (а) и трапециоэдры (б)*



a)

б)

*Рис. 2.6. Ромбоэдр (а) и тетраэдры (б)*

Кроме того, к кубической сингонии относятся следующие простые формы:

*куб* (рис. 2.7, а) – форма, состоящая из шести квадратных граней;

*октаэдр* (рис. 2.7, б) – форма, состоящая из восьми равносторонних треугольных граней;

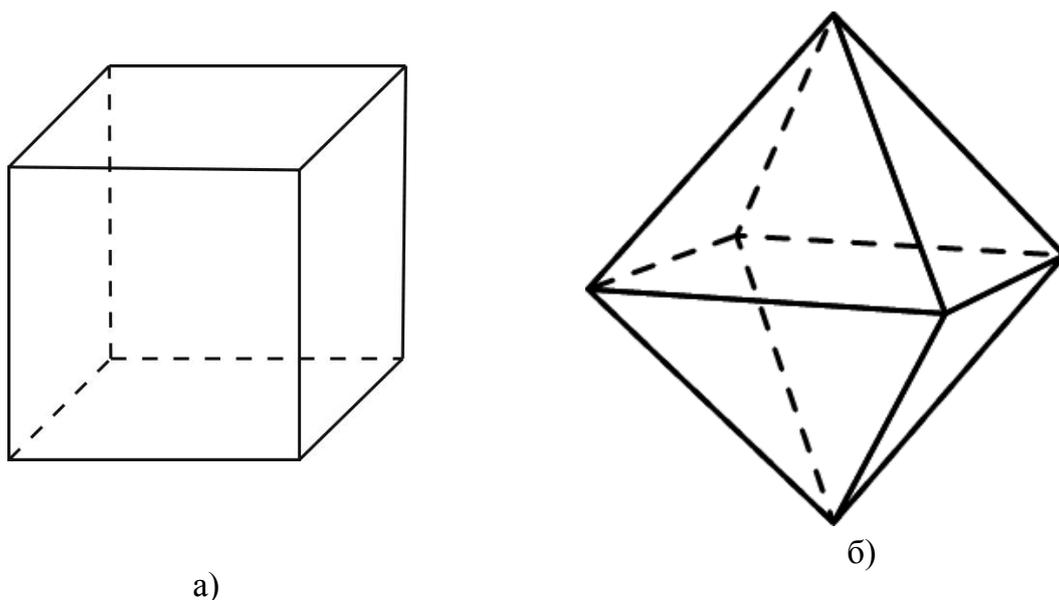


Рис. 2.7. Куб (а) и октаэдр (б)

*кубический тетраэдр* (рис. 2.8, а) – форма, состоящая из четырех равносторонних треугольных граней;

*тригонтритетраэдр* (рис. 2.8, б) – форма, производная из тетраэдра (на каждой грани тетраэдра по три грани в виде равнобедренного треугольника);



Рис. 2.8. Тетраэдр (а) и тригонтритетраэдр (б)

*тетрагонритетраэдр* (рис. 2.9, а) – форма, производная из тетраэдра (на каждой грани тетраэдра по три неправильных четырехугольника);

*пентагонритетраэдр* (рис. 2.9, б) – форма, производная из тетраэдра (на каждой грани тетраэдра по три пятиугольника);

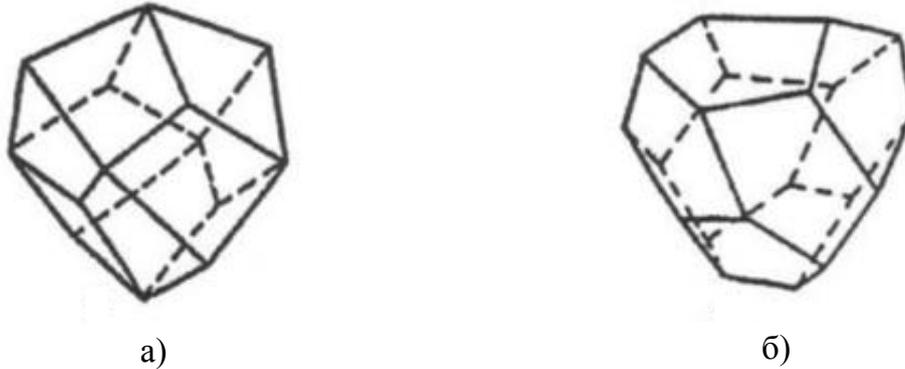


Рис. 2.9. Тетрагонритетраэдр (а) и пентагонритетраэдр (б)

*ромбододекаэдр* (рис. 2.10, а) – форма, состоящая из двенадцати граней в виде ромба;

*пентагондододекаэдр* (рис. 2.10, б) – форма, состоящая из двенадцати пятиугольников;



Рис. 2.10. Ромбододекаэдр (а) и пентагондододекаэдр (б)

*тетрагексаэдр* (рис. 2.11, а) – форма, производная из куба (на каждой грани куба по четыре равнобедренных треугольника);

*гексатетраэдр* (рис. 2.11, б) – форма, производная из тетраэдра (на каждой грани тетраэдра по шесть равнобедренных треугольников);



Рис. 2.11. Тетрагексаэдр (а) гексатетраэдр (б)

*дидодекаэдр* (рис. 2.12, а) – двадцатичетырехгранник;  
*тетрагонтриоктаэдр* (рис. 2.12, б) – форма, производная из октаэдра (на каждой грани октаэдра по три неправильных четырехугольника);

*тригонтриоктаэдр* (рис. 2.12, в) – форма, производная из октаэдра (на каждой грани октаэдра по три грани в виде равнобедренных треугольников);

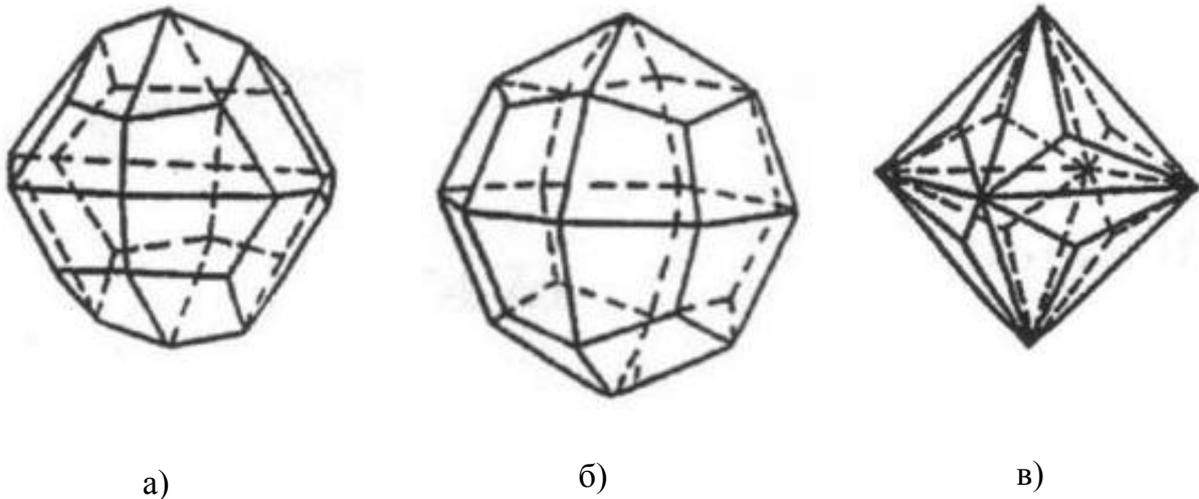
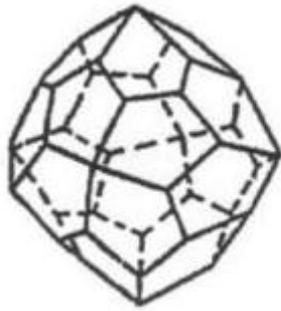


Рис. 2.12. Дидодекаэдр (а), тетрагонтриоктаэдр (б)  
и тригонтриоктаэдр (в)

*пентагонтриоктаэдр* (рис. 2.13, а) – форма, производная из октаэдра (на каждой грани октаэдра по три пятиугольника);  
*гексооктаэдр* (рис. 2.13, б) – 48-гранник.



а)



б)

Рис. 2.13. Пентагонтриоктаэдр (а) и гексаоктаэдр (б)

Названия простых форм кубической сингонии даны по следующему принципу: первая часть слова (тригон, тетрагон, пентагон) характеризует очертания данной формы (тригон = три + гон = = треугольник, тетрагон = тетра + гон = четырехугольник и т. д.); вторая часть слова (тритетраэдр, триоктаэдр) указывает:

а) от какой простой (материнской) формы данная форма является произвольной;

б) сколько граней данной формы расположено на каждой материнской форме;

в) чему равно число граней данной формы.

### Содержание отчета

1. Цель работы, задание
2. Рисунок и название форм кристаллических многогранников, предложенных преподавателем.
3. Соотношение элементов огранки некоторых кристаллических многогранников, оформленные в виде таблицы.
4. Список используемой литературы.

## Соотношение элементов огранки некоторых кристаллических многогранников

Многогранник	Число граней	Число вершин	Число ребер
Тетраэдр			
Гексаэдр			
Октаэдр			

5. Рисунок предложенного преподавателем многогранника.

### Контрольные вопросы

1. Что такое простая форма кристаллов?
2. Что обозначает слово «гония»?
3. Нарисуйте тетраэдр. Определите в нем количество вершин, ребер, граней.
4. Что такое октаэдр?
5. Какие формы кристаллов относятся к открытым простым формам?
6. Какие формы кристаллов относятся к закрытым простым формам?
7. Каково число простых форм, входящих в различные кристаллографические комбинации?
8. Что понимается под сложной формой многогранников?

## РАБОТА № 3

### Анализ пространственных решеток.

### Определение кристаллографических индексов плоскостей

Цель работы: изучение кристаллического строения металлов.

#### Задания

1. Используя литературные источники, зарисовать элементарную кристаллическую решетку и параметры решетки для металла, указанного преподавателем.

2. Определить координационное число.

3. Определить базис ячейки.

4. Ознакомиться с системой обозначения граней и направлений.

Построить плоскость по индексам, указанным преподавателем.

5. Ответить на контрольные вопросы.

6. Составить отчет.

#### Общие положения

Согласно принципу минимизации потенциальной энергии каждый атом стремится взаимодействовать с максимально большим числом атомов. Структурами плотнейших упаковок обладают кристаллы многих химических элементов.

Металлы образуют в основном три типа решеток (рис. 3.1): объемно центрированную кубическую (R, Na, Li, Ti<sub>β</sub>, Fe<sub>α</sub> и др.), гранецентрированную кубическую (Ca<sub>α</sub>, Ce, Ag, Au, Cu, Fe<sub>γ</sub>, Ni и др.) и гексагональную плотноупакованную (Mg, Ti<sub>α</sub>, Zn, Ca<sub>β</sub> и др.).

*Объемно центрированная кубическая (ОЦК) решетка.* В элементарной ячейке такой решетки девять атомов (восемь – в вершинах куба и один – в центре). Каждый угловой атом входит в восемь соседних ячеек, следовательно, на одну ячейку приходится  $n = 8 \cdot 1/8 + 1 = 2$  атома.

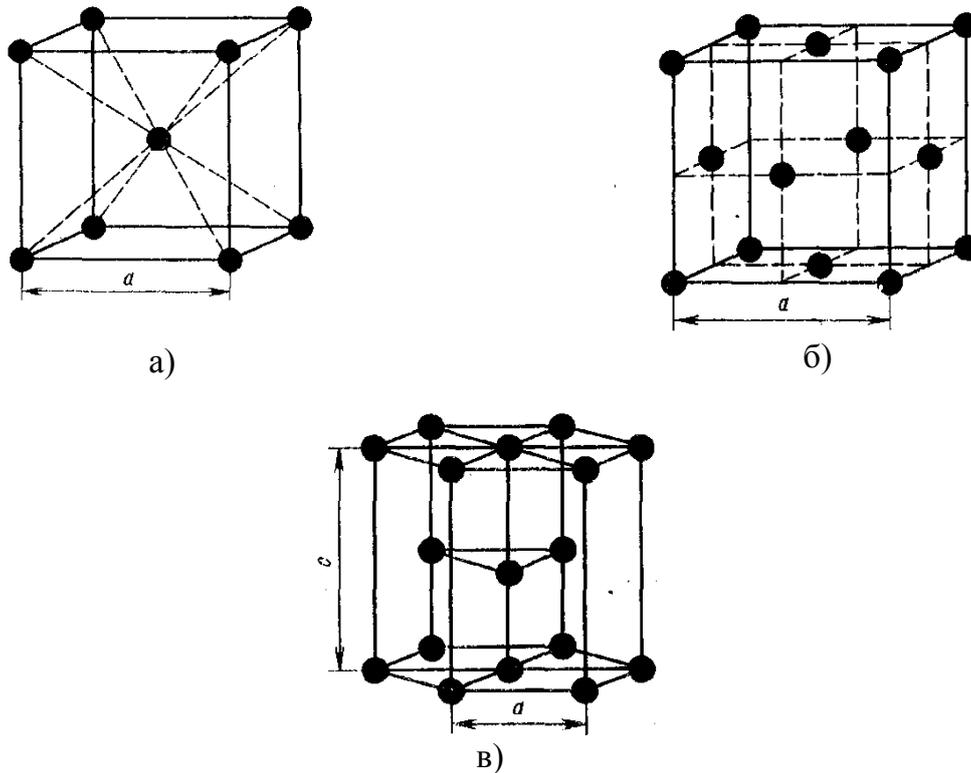


Рис. 3.1. Кристаллические решетки металлов:  
 а – объемно центрированная кубическая;  
 б – гранецентрированная кубическая;  
 в – гексагональная плотноупакованная

*Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК).* В элементарной ячейке такой решетки 14 атомов (8 – в вершинах и 6 – на гранях куба). Каждый угловой атом входит в восемь ячеек; каждый атом, находящийся в центре грани, входит в две соседние ячейки, в центре ячейки атома нет. Следовательно, на одну ячейку приходится  $n = 8 \times 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$  атома.

*Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ).* В элементарной ячейке такой решетки 16 атомов. Верхние центральные атомы входят в две соседние ячейки; атомы, образующие вершины призмы, входят в шесть соседних ячеек; атомы, лежащие внутри призмы, целиком принадлежат данной ячейке. Следовательно, на одну ячейку приходится  $n = 2 \cdot 1/2 + 12 \cdot 1/6 + 3 = 6$  атомов.

Элементарная кристаллическая ячейка характеризуется координационным числом, под которым понимают число атомов, находящихся на наиболее близком равном расстоянии от избранного атома.

В объемно центрированной кубической решетке (рис. 3.2, а) атом А находится на наиболее близком равном расстоянии от восьми атомов, расположенных в вершинах куба, то есть координационное число этой решетки равно 8 (К8).

В гранецентрированной кубической решетке (рис. 3.2, б) атом А находится на наиболее близком расстоянии от четырех атомов 1, 2, 3, 4, расположенных в вершинах куба, от четырех атомов 5, 6, 7, 8, расположенных на гранях куба, и от четырех атомов 9, 10, 11, 12, принадлежащих расположенной рядом кристаллической ячейке. Атомы 9, 10, 11, 12 симметричны атомам 5, 6, 7, 8. Следовательно, для гранецентрированной кубической решетки координационное число равно 12 (К12).

В гексагональной плотноупакованной решетке (рис. 3.2, в) атом А находится на наиболее близком расстоянии от шести атомов 1, 2, 3, 4, 5, 6, расположенных в вершинах шестигранника, и от трех атомов 7, 8, 9, расположенных в средней плоскости призмы. Кроме того, атом А находится на таком же расстоянии еще от трех атомов 10, 11, 12, принадлежащих кристаллической ячейке, лежащей ниже основания. Атомы 10, 11, 12 симметричны атомам 7, 8, 9. Таким образом, для гексагональной плотноупакованной решетки координационное число равно 12 (Г12).

Чем выше координационное число, тем выше плотность упаковки кристаллической решетки, т. е. объем, занятый атомами.

Плотность кристаллической решетки также характеризуется *коэффициентом компактности*.

Коэффициент компактности  $Q$  равен отношению суммарного объема атомов, входящего в решетку, к объему решетки:

$$Q = \frac{4\pi R^3 n}{3V} 100,$$

где  $R$  – радиус атома (иона);  $n$  – базис или число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку;  $V$  – объем элементарной ячейки.

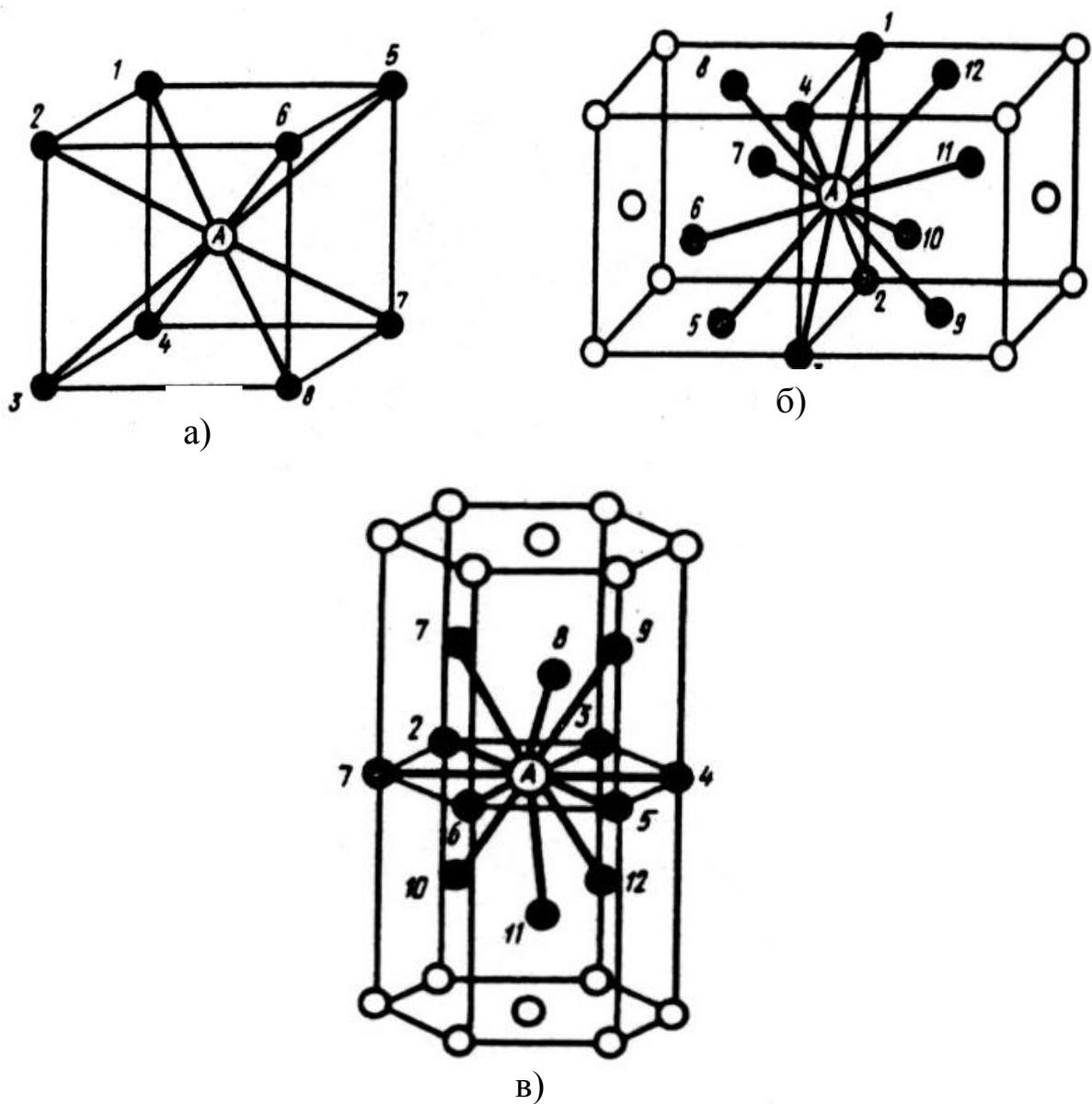


Рис. 3.2. Координационное число в различных кристаллических решетках для атома А: а – объемно центрированная кубическая (К8); б – гранецентрированная кубическая (К12); в – гексагональная плотноупакованная (Г12)

Принцип определения базиса показан выше: для ОЦК  $n = 2$ , для ГЦК  $n = 4$ , ГПУ  $n = 6$ .

Таким образом, для ОЦК коэффициент компактности 68 %, для ГЦК – 74 %, ГПУ – 74 %.

При определении положения атомных плоскостей в кристаллических пространственных решетках удобно использовать индексы

Миллера. Для того чтобы установить индексы Миллера, элементарную решетку необходимо вписать в пространственную систему координат и положение любого узла кристаллической решетки относительно произвольно выбранного начала координат будет определяться заданием координат  $x, y, z$ .

За единицу измерения вдоль каждой оси принимается период решетки, т. е. для одной элементарной ячейки эти координаты равны параметрам  $a, b, c$  соответственно. Для удаленной от начала координат ячейки координаты узла определяются  $x = ma, y = nb, z = pc$ , где  $m, n, p$  – целые числа. Если за единицу измерения длин вдоль осей решетки выбрать величины  $a, b, c$ , то координатами узла будут просто числа  $m, n, p$  (индексы узла). Положение плоскости определяется отрезками, которые она отсекает на осях решетки. За индексы плоскостей принято брать обратные отрезки:  $h = 1/m, k = 1/n, l = 1/p$ . Эти числа заключают в круглые скобки. На рис. 3.3 показано графическое изображение наиболее важных плоскостей в кубической решетке. Если плоскость не пересекает какую-нибудь ось, например  $x$ , то соответствующий индекс Миллера равен нулю, например  $(011)$ .

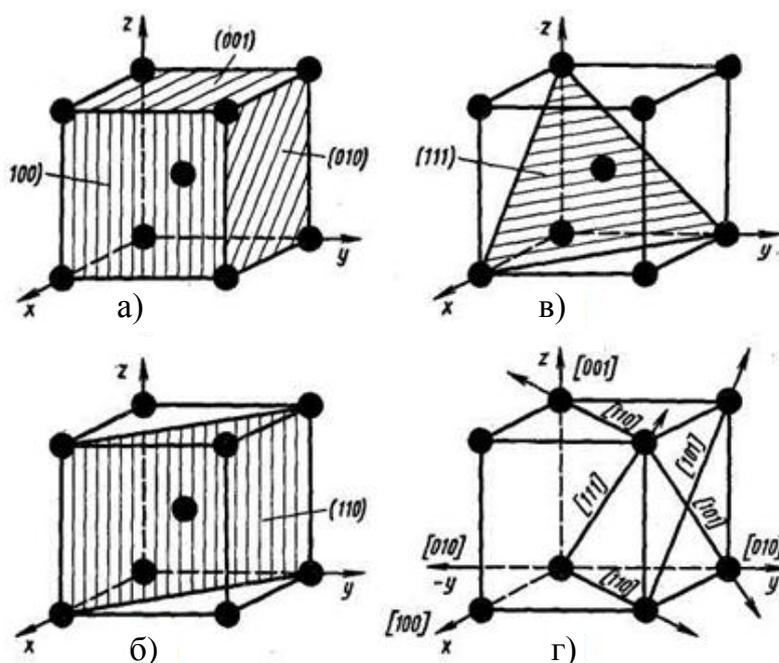


Рис. 3.7. Кристаллографические индексы плоскостей (а – в) и направлений (г) в ОЦК решетке [6, с. 15]

Для рассмотрения явлений, происходящих в решетке, также применяются индексы направлений. Кристаллографические индексы направлений заключают в квадратные скобки (рис. 3.3, г).

### **Содержание отчета**

1. Название, цель работы, задание.
2. Изображение кристаллической решетки для металла, указанного преподавателем, с указанием параметров решетки.
3. Запись координационного числа, определение базиса.
4. Изображение кристаллической решетки с указанием на ней кристаллографической плоскости по указанному преподавателем индексу плоскости.
5. Список используемой литературы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое пространственная решетка, элементарная ячейка?
2. Какие пространственные решетки встречаются среди металлов?
3. Координационное число и методика его вычисления.
4. Определение базиса решетки.
5. Кристаллографические индексы плоскости и направления.
6. Порядок нахождения кристаллографических индексов.

## **РАБОТА № 4**

### **Изучение методов рентгеноструктурного анализа (Расчет межплоскостных расстояний и рентгеновской плотности вещества)**

Цель работы: изучить рентгеновский метод исследования структуры металлов и сплавов.

#### **Задания**

1. Используя учебники и пособия, изучить условия получения рентгеновских лучей и их свойства, ознакомиться с выводом уравнения Вульфа-Брегга, лежащего в основе изучаемого метода порошка (рентгеноструктурного анализа поликристаллических веществ методом Дебая-Шерера).

2. Ознакомиться с устройством рентгеновского аппарата камеры РКД и рентгеновской трубки.

3. Освоить методику установления вещества по межплоскостным расстояниям.

4. Рассчитать рентгеновскую плотность исследуемого вещества.

5. Ответить на контрольные вопросы.

6. Составить отчет.

#### **Общие положения**

Рентгеноструктурный анализ – один из современных методов исследования атомно-кристаллической структуры материалов рентгеновскими лучами. Наибольшую информацию он дает при исследовании кристаллов, однако при рентгеноструктурном анализе выбор объектов для исследования практически ничем не ограничен. В настоящее время получены весьма важные результаты, касающиеся структур как органических, так и неорганических жидкостей, полимеров,

стеклообразных веществ, аморфных тел, жидких металлов и сплавов и др.

В основе рентгеноструктурного анализа лежат:

- сильная проникающая способность рентгеновских лучей;
- способность этих лучей дифрагировать от структурных единиц кристалла, периодически повторяющихся в пространстве.

Рентгеновские лучи возникают при резком торможении быстро движущихся электронов о поверхность анода в рентгеновской трубке. Рентгеновская трубка является источником волн, различных по длине и интенсивности. Следует отметить, что характер рентгеновского излучения может существенно изменяться в зависимости от режима работы и устройства трубки.

При сравнительно низких напряжениях электроны, не проникая вглубь отдельных атомов вещества анода, в основном тратят свою энергию на нагрев анода и лишь около одного процента – на излучение.

Принято считать, что такое излучение состоит из множества следующих друг за другом различных по длине и интенсивности волн и называется белым излучением. Состав белого излучения зависит от скорости свободных электронов (беспрепятственно перемещающихся в безвоздушном пространстве) и не зависит от вещества анода.

С повышением напряжения скорость электронов возрастает, достигая значений, при которых движущиеся электроны в состоянии проходить электронные уровни атомов анода. При этом атомам сообщается некоторая дополнительная энергия, которая в той или иной степени возвращается окружающему пространству в виде ряда волн, характерных по своим длинам только для данного типа атомов. Возникающие при этом волны определенных длин составляют характеристическое излучение рентгеновской трубки.

Состав характеристического излучения зависит от вещества анода и не зависит от скорости свободных электронов (от приложенного к трубке напряжения).

Таким образом, рентгеновская трубка может рассматриваться как источник двух излучений, независимых друг от друга, – белого и

характеристического. В практике структурного анализа чаще всего используют характеристические лучи. Это связано с тем, что при использовании данного излучения известна длина волн таких лучей.

Кристалл является естественной дифракционной решеткой для рентгеновского излучения, так как в нем расстояние между атомами того же порядка, что и длина волны рентгеновских лучей. При прохождении рентгеновского излучения через кристалл происходит рассеивание данного излучения на свободных зарядах – электронах, и возникает вторичное характеристическое излучение, которое фиксируется на рентгенограммах или специальными счетчиками электронных импульсов. Так как электроны в кристалле располагаются непосредственно вокруг атомных ядер, то по отражению вторичных рентгеновских лучей можно определить расположение атомов в структуре кристалла.

Один из распространенных методов рентгеноструктурного анализа – *метод порошка (метод Дебая – Шерера)*. Для исследования применяют образец в виде цилиндрика диаметром 0,3 – 0,5 мм, спрессованного из поликристаллического порошка или выполненного из поликристаллической проволоки диаметром 0,2 – 0,6 мм, т. е. в методе порошков в качестве объекта исследования применяют поликристаллическое вещество, состоящее из частиц с линейными размерами не больше нескольких микрон. Образец помещают в центр цилиндрической камеры и направляют на него монохроматический рентгеновский луч. В таком образце всегда присутствуют кристаллики любой ориентации, поэтому найдутся такие, в которых группы параллельных между собой плоских сеток будут располагаться по отношению к первичному рентгеновскому лучу под углами  $\theta$ , удовлетворяющими условиям отражения по уравнению Вульфа – Брегга, которое приведено ниже.

Каждое вещество (фаза) обладает своей кристаллической решеткой. Семейства атомных плоскостей, образующих эту решетку, обладают характерным только для данной решетки набором значений межплоскостных расстояний  $d$ . Знание межплоскостных расстояний  $d$  исследуемого металла позволяет установить, с каким веществом (фа-

зой) мы имеем дело.

Пусть узкий пучок монохроматических рентгеновских лучей с известной длиной волны  $\lambda$  падает на совокупность большого числа кристаллов (кристаллическую решетку), которая может быть охарактеризована семейством параллельных плоскостей с определенными межплоскостными расстояниями. При взаимодействии рентгеновских лучей с кристаллическим веществом (рис. 4.1) возникает дифракционная картина, максимумы интенсивности которой удовлетворяют уравнению Вульфа – Брегга:

$$n\lambda = 2d\sin\theta,$$

где  $n$  – порядок дифракции (целое число 1, 2, 3 и т. д.);  $\lambda$  – длина волны рентгеновских лучей;  $d$  – межплоскостное расстояние;  $\theta$  – угол скольжения лучей (угол рассеяния).

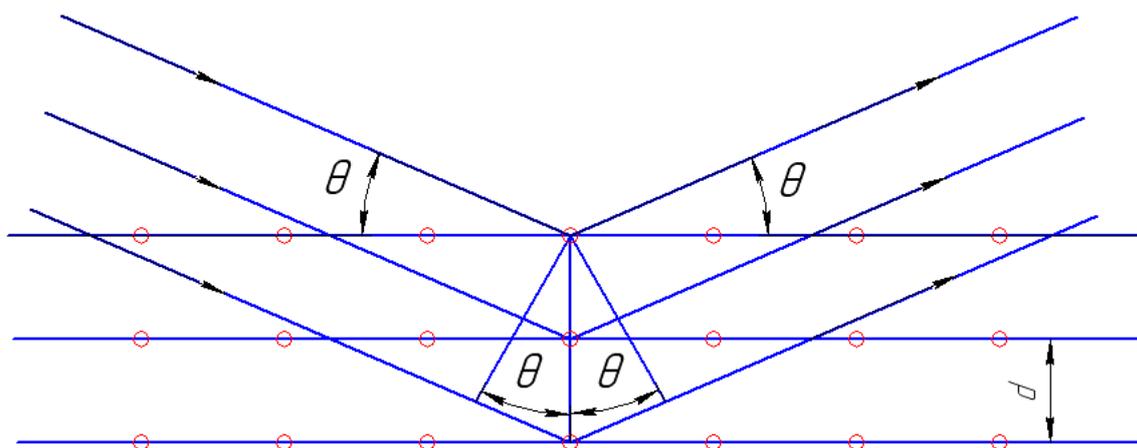


Рис. 4.1. Отражение рентгеновских лучей от атомных плоскостей кристалла

Из уравнения Вульфа – Брегга следует, что

$$\frac{d}{n} = \frac{\lambda}{2\sin\theta}.$$

Так как длина волны характеристического излучения, в котором получена рентгенограмма, известна, то задача определения межплоскостных расстояний  $d/n$  ( $d_i$ ) сводится к нахождению углов  $\theta$  для всех линии.

Рентгеноструктурный анализ производят на рентгеновском аппарате УРС-60, где источником рентгеновских лучей является рент-

геновская трубка БСВ-4. Рентгеновской камерой называется устройство, позволяющее регистрировать на рентгеновской пленке дифракционные рентгеновские максимумы, которые затем расшифровываются. В методе порошка используется рентгеновская камера РКД, в которой исследуемое вещество в виде порошка наклеивается на стеклянную нить. Результат взаимодействия рентгеновских лучей с исследуемым веществом в виде рентгенограммы (дебаеграммы) подлежит расшифровке, что и является практической задачей данной работы.

### Порядок выполнения работы

Первое задание выполняется при подготовке к лабораторной (практической) работе.

Для выполнения второго задания студенты в сопровождении преподавателя посещают лабораторию рентгеноструктурного анализа, где непосредственно знакомятся с рентгеновской аппаратурой.

Третье задание выполняется индивидуально. По рентгенограмме поликристаллического вещества, снятой в камере Дебая (РКД), определив углы и межплоскостные расстояния  $d$ , с помощью определителя межплоскостных расстояний установить, с какого вещества была снята рентгенограмма (произвести идентификацию вещества).

Четвертое задание, как и третье, выполняется индивидуально. Для исследуемого вещества определяется его рентгеновская плотность, которая совпадает с плотностью вещества для веществ с неискаженной структурой.

Для облегчения расчетов рентгенограммы по определению межплоскостных расстояний рекомендуется заносить исходные данные, результаты замеров и расчеты в табл. 4.1 и заполнять ее последовательно по столбцам.

Расчет рентгенограммы для определения межплоскостных расстояний и идентификации веществ (к заданию 3).

Длина волны излучения  $\lambda =$  , Å

Диаметр камеры 57,3 мм.

Радиус исследуемого образца  $\rho =$

Таблица 4.1

№ п/п	$2L_{изм}$ , мм	$\theta_{приб}$ , град	Поправка на погло- щение $\Delta\rho$ , мм	$2L_{исп}$ , мм	$\theta_{точн}$ , град	$\sin\theta$	$d_i$ расч. А	Табл. знач. $d_i$ А
1								
2								
3								
4								

Столбец 1. Для расчета выбирают четыре линии, которые цифрами отмечены на рентгенограмме.

Столбец 2. С помощью линейки измеряют расстояние  $2L$  между парой указанных линий, симметрично расположенных относительно входного отверстия (с точностью до 0,2 мм).

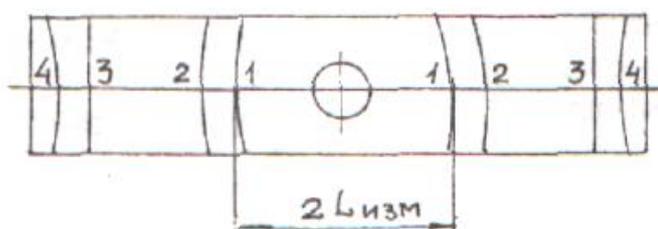


Рис. 4.2. Схематическое изображение рентгенограммы

Столбец 3. Приближенные значения угла  $\theta_{прибл}$  определяют по формуле, град.:

$$\theta_{прибл} = 2L_{изм} / 2.$$

Столбец 4. Более точное значение угла находят с учетом поправки на поглощение. Чтобы упростить расчеты, в специальной таблице для каждого значения  $\theta$  дано значение  $\Delta\rho$  в зависимости от известного радиуса  $\rho$  исследуемого образца.

Столбец 5. Величину  $2L_{испр}$  получают из формулы

$$2L_{испр} = 2L_{изм} - \Delta\rho,$$

где  $\Delta\rho$  - поправка на поглощение, выбранная из табл.1 приложения 1.

Столбец 6. Угол  $\theta_{\text{точн}}$  в градусах рассчитывают по формуле, град.

$$\theta_{\text{точн}} = 2L_{\text{испр}} / 2 ,$$

(например,  $\theta_{\text{точн}} = 42,6^\circ / 2 = 21,3^\circ$ ).

Столбец 7. Определяется  $\sin\theta$  с точностью до четвертого знака после запятой.

*Примечание.* При отсутствии калькулятора с функцией определения синуса значения угла  $\theta_{\text{точн}}$  записывают в градусах и минутах (например,  $21,3^\circ = 21^\circ 18'$ , т.к.  $0,3 \times 60' = 18'$ ). Значения  $\sin\theta$  с точностью до четвертого знака после запятой выбирают из тригонометрических таблиц.

Столбец 8. Используя значение  $\sin\theta$  и известную длину волны рентгеновского излучения, с помощью уравнения Вульфа-Брегга рассчитывают межплоскостные расстояния  $d_{i \text{ расч.}}$

$$d_{i \text{ расч.}} = \lambda_\alpha / 2 \sin\theta.$$

Столбец 9. Табличные значения  $d_{\text{табл.}}$

С помощью справочной табл. 4.2 следует определить вещество, для которого табличные значения  $d_{\text{табл.}}$  совпадают с расчетными значениями межплоскостных расстояний  $d_{\text{расч.}}$ . Записать название вещества.

Определение рентгеновской плотности вещества (к заданию 4). После выполнения расчета рентгенограммы и идентификации исследуемого вещества необходимо, пользуясь справочной табл. 4.2, найти тип кристаллической решетки вещества, координационное число и параметр решетки найденного вещества.

Рентгеновская плотность вещества  $\rho$  рассчитывается по формуле, г/см<sup>3</sup>:

$$\rho = nA / a^3,$$

где  $\rho$  - плотность исследуемого вещества;

$n$  - число атомов в элементарной ячейке;

$A$  - вес одного атома в а.е.м. ( $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \times 10^{-24} \text{ г}$ );

$a$  - параметр ячейки .

Таблица 4.2.

№ п/п	Элемент	Межплоскост. расстояние $d$ , Å	Параметр ячейки $a$ , Å	Атомный радиус $r$ , Å	Координационное число	Температура плавления $t_{пл}$ , °С	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Атомный вес $A$ , а.е.м.
1	Be	1,97	$a=2,28$ $c=3,60$	1,13	Г12	1350	1,85	9
2	Fe	2,01	2,86	1,26	К8	1535	7,87	56
			3,65		К12			
3	Ni	2,038	3,52	1,24	К12	1455	8,9	58,7
4	Cu	2,08	3,61	1,28	К12	1083	8,96	63,5
5	V	2,14	3,04	1,31	К8	1900	6,11	51
6	Mo	2,22	3,14	1,4	К8	2620	10,2	96
7	W	2,23	3,16	1,41	К8	3410	19,3	184
8	Pt	2,25	3,92	1,38	К12	1773	21,4	195
9	Al	2,33	4,05	1,43	К12	659	2,7	27
10	Au	2,35	4,08	1,44	К12	1163	19,3	197
11	Ag	2,36	4,08	1,44	К12	960	10,5	108
12	Zn	2,46	$a=2,66$ $c=4,94$	1,39	Г6	419	7,31	65,4
13	Ti	2,54	$a=2,95$ $c=4,68$	1,46	Г12	1668	4,51	47,9
14	Mg	2,77	$a=3,21$ $c=5,21$	1,6	Г12	651	1,74	24,3
15	Pb	2,85	4,95	1,75	К12	327	11,34	207
16	Sn	2,91	6,49	1,58		232	7,29	118,7

### Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.
2. Расчет рентгенограммы, выполненный в виде табл. 4.1.
3. Расчет рентгеновской плотности исследуемого вещества.
4. Список используемой литературы.

### Контрольные вопросы

1. На каком физическом явлении основан рентгеноструктурный анализ?

2. Свойства и возбуждение рентгеновских лучей (тормозное и характеристическое излучения).
3. Вывод и смысл уравнения Вульфа-Брегга.
4. Что такое межплоскостные расстояния?
5. Почему линии на дебаеграмме имеют форму дуг?
6. Почему приближенное значение угла рассеяния  $\theta_{\text{прибл}}$  при расчете рентгенограммы, полученной в рентгеновской камере РКД, равно половине  $2L_{\text{изм}}$ ?
7. Практическое применение метода порошка (метода Дебая-Шерера) при фазовом анализе металлических сплавов.
8. Определение числа атомов в элементарной ячейке для ОЦК и ГЦК решеток.
9. Получение рентгеновских лучей для структурного анализа.
10. Устройство рентгеновской камеры типа РКД.

## **РАБОТА № 5**

### **Изучение методов рентгенофазового анализа**

Цель работы: приобретение навыков определения фазового состава материалов с помощью рентгенофазового анализа.

#### **Задания**

1. Получить представление об основах рентгенофазового анализа.
2. Ознакомиться с принципом работы и устройством рентгеновского дифрактометра.
3. Расшифровать рентгенограммы образцов неизвестного состава методом сравнения с рентгенограммами эталонов.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Составить отчет.

## Общие положения

Одним из современных методов определения фазового состава кристаллических тел является метод рентгенофазового анализа (РФА). В основу РФА положено явление дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке. Для выполнения качественного и количественного фазового анализа используется современная рентгеновская аппаратура – рентгеновские дифрактометры, что позволяет проводить анализ быстро и с большой точностью.

**Дифракционный максимум (рефлекс).** В случае взаимодействия порошка (или мелкокристаллического материала) с монохроматическими рентгеновскими лучами всегда найдется для каждого сорта плоскостей определенное число кристалликов, попавших в «отражающее» положение. В этом случае под углом  $\theta$  будет наблюдаться дифракционный максимум для данного сорта плоскостей, характеризующийся разной интенсивностью. Угловое положение максимума будет определяться значением  $d$ , а последнее – геометрией кристаллической решетки.

### Дифракционный максимум (рефлекс).

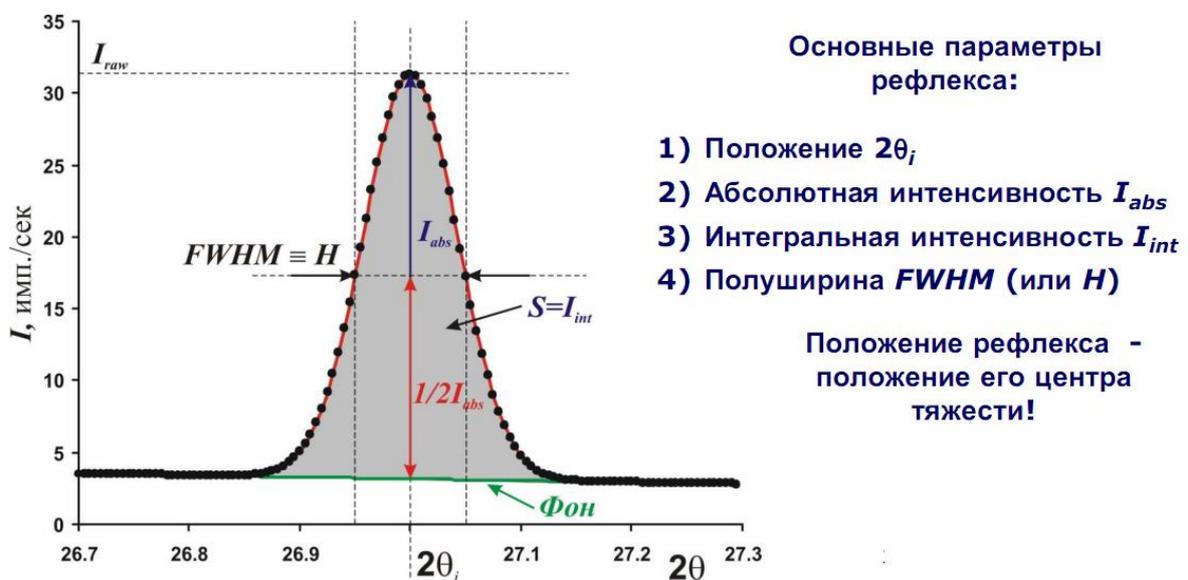


Рис. 5.1. Дифракционный максимум (рефлекс) и его характеристики.

Каждая фаза обладает своей кристаллической решеткой и характеризуется только ей присущим набором межплоскостных расстояний  $d_{hkl}$ , которые определяются по формуле, в этом случае на рентгенограмме присутствуют пики одного вещества.

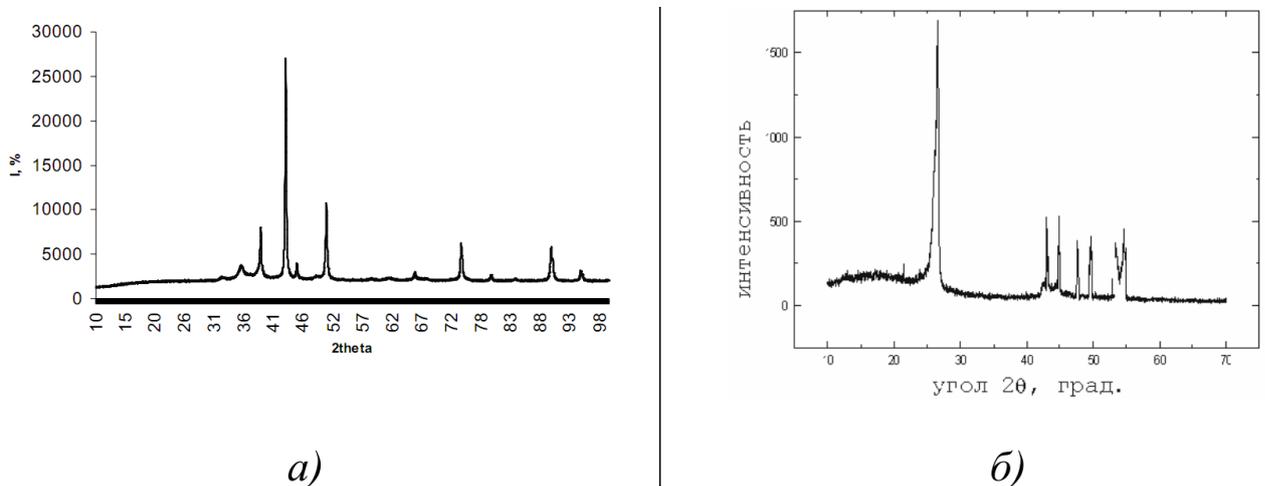


Рис. 5.2. Примеры рентгенограмм: а) меди, б) фуллерена C60.

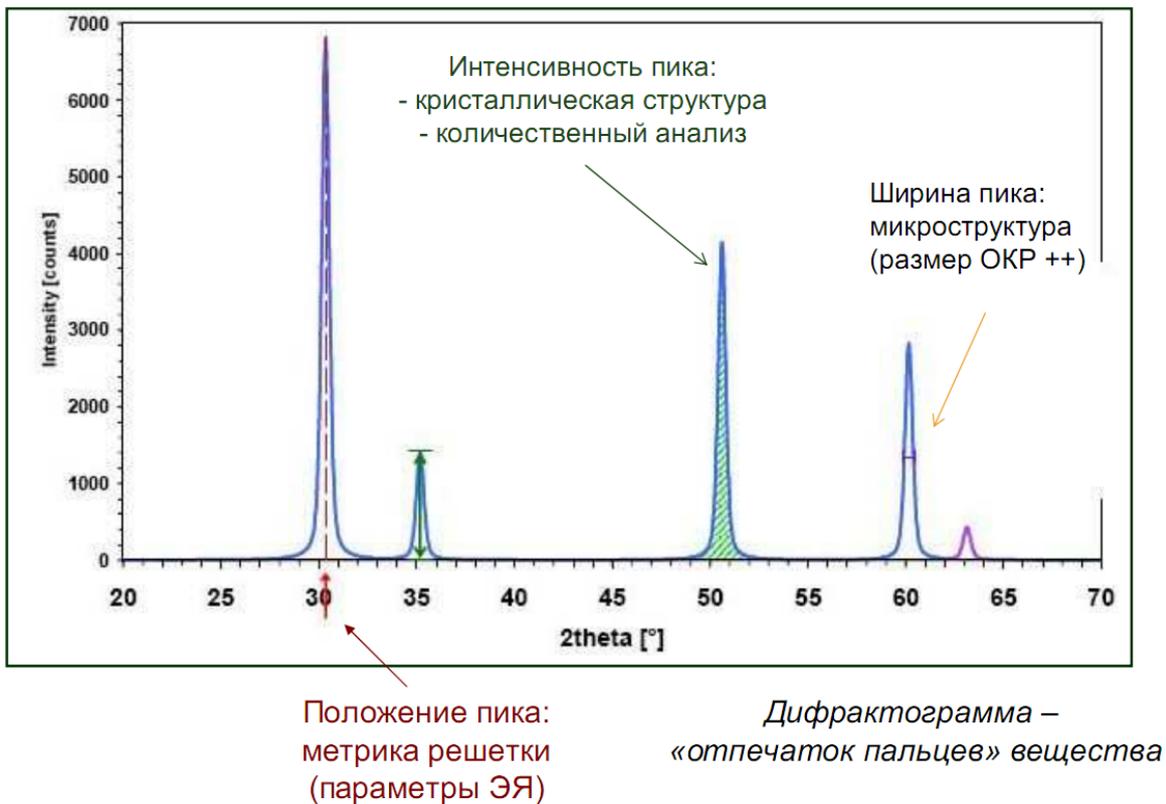


Рис.5.3. Информация, необходимая для расшифровки дифрактограммы.

Если исследуемый объект состоит из нескольких фаз, то каждой фазе будет соответствовать своя собственная дифракционная картина. В этом случае на рентгенограмме присутствуют пики всех фаз образца. Интенсивность рефлексов каждой фазы будет зависеть от ее количества в исследуемой смеси и степени кристаллизации.

*Расшифровка рентгенограмм с помощью ASTM.* Определение фазового состава изучаемого вещества производят путем сравнения экспериментального набора значений  $2\theta$  (угловое положение рентгеновского максимума),  $d_{hkl}$  (набором межплоскостных расстояний) и  $I/I_0$  (соотношение интенсивностей), найденных из рентгеновских спектров, с табличными значениями  $d_{hkl}$  и  $I/I_0$ , которые представлены в картотеке ASTM (American Society for Testing and Materials, <http://www.astm.org/>). Пример информационной карты ASTM приведен на рис. 5.4.

33-1160	*	d(A)	Int	h	k	l	d(A)	Int	h	k	l
Silicon Nitride		6.583	34	1	0	0	1.317	5	5	0	0
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		3.800	35	1	1	0	1.288	18	4	1	1
		3.293	100	2	0	0	1.267	7	3	3	0
Rad. Cu 1.54178		2.660	99	1	0	1	1.255	16	2	1	2
		2.489	93	2	1	0	1.144	3	4	2	1
		2.310	9	1	1	1	1.138	3	3	1	2
		2.194	10	3	0	0	1.096	4	5	1	1
Sys. Hexagonal	S. G. P6 <sup>3</sup> /m	2.180	31	2	0	1	1.083	3	4	3	0
		1.901	8	2	2	0	1.048	6	3	2	2
		1.892	5	2	1	1	1.022	4	4	1	2
		1.827	12	3	1	0	.991	3	5	2	1
		1.752	37	3	0	1	.976	4	5	0	2
		1.591	12	2	2	1	.959	3	1	0	3
		1.547	6	3	1	1	.955	5	3	3	2
		1.511	15	3	2	0	.949	8	6	1	1
		1.453	15	0	0	2	.903	4	4	4	1
		1.437	8	4	1	0	.887	5	3	0	3
		1.432	5	4	0	1	.872	6	7	1	0
		1.341	39	3	2	1	.871	5	6	2	1
		1.330	6	2	0	2	.868	5	4	3	2

Рис. 5.4. Пример карточки ASTM для Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Международным союзом кристаллографов было принято, что две линии совпадают, если отвечающие им значения  $d_{hkl}$  не отличаются друг от друга более, чем на  $0.03 \text{ \AA}$ . При проведении качественного РФА интенсивность используется как второй параметр.

Прежде чем приступить к поиску и идентификации фаз, нужно определить, с группой соединений какого элемента начать поиск. Для этого необходимо знать, с каким материалом проводят исследование,

иметь данные о химическом составе, условиях получения, легирующих элементах, режиме термообработки и т.д.

Начальную информацию о состоянии вещества можно получить из внешнего вида рентгеновских спектров. Так, хорошо окристаллизованный и однородный по параметрам решетки материал дает узкие и высокие дифракционные пики, плохо окристаллизованный неоднородный материал - широкие и низкие. Рентгенограмма аморфного образца имеет характерный вид - это широкая линия (гало), угловая ширина  $2\theta = 10-20^\circ$ .

### **Содержание отчета**

1. Название, цель работы, задание.
2. Краткое содержание работы.
3. Индивидуальное задание.
4. Список использованной литературы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимают под дифракционным максимумом?
2. Что представляет собой дифрактограмма?
3. Какая информация необходима для расшифровки дифрактограммы?
4. Каким образом определяют фазовый состав изучаемого вещества?

## РАБОТА N 6

### Изучение симметрии кристаллических многогранников (симметрии континуума)

Цель работы: изучение симметрии кристаллических многогранников.

#### Задания

1. Используя литературные источники, изучить элементы симметрии.
2. Определяющие плоскости симметрии в равнобедренном треугольнике, квадрате, прямоугольнике, ромбе.
3. Описание элементов симметрии гексаэдра (куба), запись формулы симметрии.
4. Указать все элементы симметрии для многогранника, заданного преподавателем;
5. Ответить на контрольные вопросы.
6. Составить отчет.

#### Общие положения

Симметричность любой фигуры, включая многогранник, выявляется при помощи элементов симметрии.

*Под элементами симметрии* понимают вспомогательные геометрические образы (точки, прямые, плоскости), при помощи которых выявляется симметричность фигуры или многогранника.

В кристаллических многогранниках встречаются простые элементы симметрии (центр симметрии (центр инверсии), плоскость симметрии, поворотная ось), а также сложный элемент симметрии (инверсионная ось). Для обозначения элементов симметрии используются две системы обозначений: международная символика, приня-

тая Интернациональным союзом кристаллографов, и сохраняется старая символика, основанная на формулах симметрии.

*Центром инверсии* называется точка, находящаяся внутри фигуры (многогранника) и характеризующаяся тем, что любая прямая, проведенная через эту точку на равных расстояниях в обе стороны от нее, встретит одинаковые точки фигуры.

Для определения центра инверсии моделей кристаллов необходимо положить модель какой-нибудь гранью на стол. Центр инверсии имеется, если во всех случаях вверху оказывается грань, параллельная и равная первой. В случае, если же вверху окажется вершина или ребро, или грань, параллельная, но не равная первой, то центра инверсии у кристалла не существует.

Следовательно, центр инверсии представляет собой как бы зеркальную точку.

Куб имеет центр инверсии (центр симметрии) в точке пересечения его пространственных диагоналей (рис. 6.1). Обозначается центр симметрии буквой  $C$  (старое обозначение) и  $\bar{I}$  (международное обозначение). Графически отмечается буквой  $C$ .

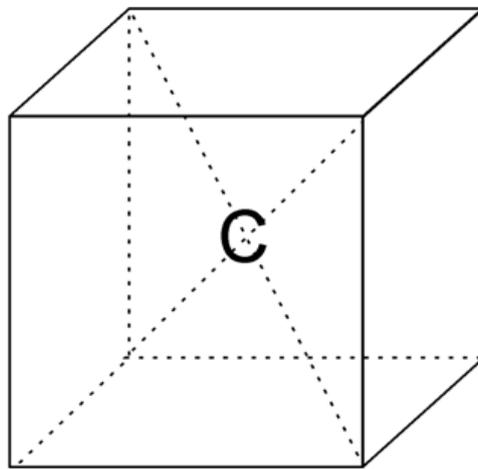


Рис. 6.1. Центр инверсии куба

*Плоскостью симметрии* называется воображаемая плоскость, делящая фигуру на две равные части, которые относятся друг к другу как предмет и его зеркальное изображение.

Для определения плоскостей симметрии модель многогранника необходимо установить в определенное положение, чтобы не посчитать одну и ту же плоскость несколько раз. Плоскости симметрии проходят через середины граней ребер, а также вдоль ребер или через противоположные вершины.

Обозначается плоскость симметрии буквой  $P$  (старое) и  $m$  (международное). Графически плоскость симметрии изображается сплошной линией. У фигуры (многогранника) может быть одна или несколько плоскостей симметрии, пересекающихся друг с другом. В кубе имеется девять плоскостей симметрии (рис. 6.2).

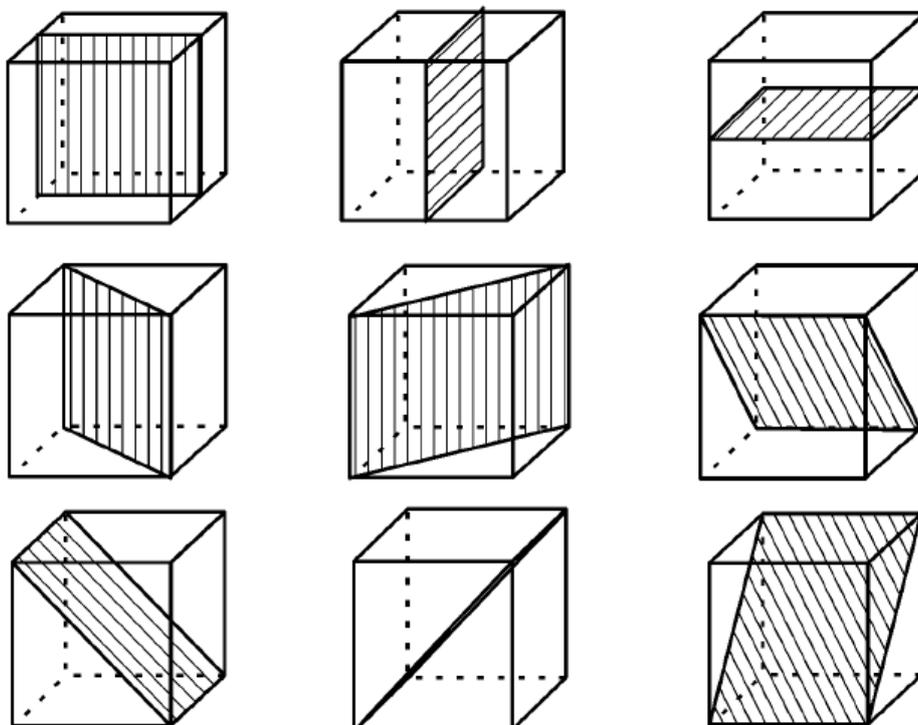


Рис. 6.2. Плоскости симметрии куба

*Осью симметрии (поворотная ось)* называется такая прямая линия, при повороте которой на  $360^\circ$  фигура (многогранник) совмещается сама с собой. Обозначения осей симметрии: старые – буквой  $L$  с цифровым индексом  $n$  –  $L_n$  ( $L_1, L_2, L_3, L_4, L_6$ ) и международные – арабскими цифрами, соответствующими порядку оси (1, 2, 3, 4, 6).

В кристаллических многогранниках возможны оси симметрии второго –  $L_2$ , третьего –  $L_3$ , четвертого –  $L_4$  и шестого –  $L_6$  порядков, оси симметрии пятого и выше шестого порядков невозможны. На рис. 6.3 показаны оси симметрии куба.

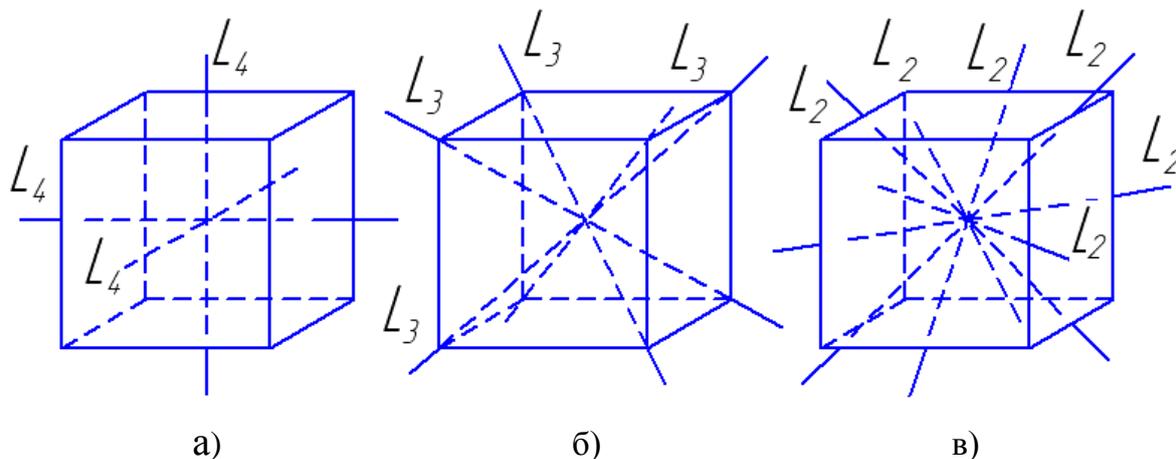


Рис. 6.3. Оси симметрии куба: а – три оси четвертого порядка ( $3L_4$ ); б – четыре оси третьего порядка ( $4L_3$ ); в – шесть осей второго порядка ( $6L_2$ )

*Инверсионная ось* – сложный элемент симметрии, позволяющий совмещать равные части фигуры путем двойной операции – поворота на определенный угол, задаваемый порядком оси, и отражения в точке на этой оси, как в центре симметрии. Обозначения инверсионной оси: старые  $L_{in}$ , и международные  $\bar{n}$ .

*Пример:* определение элементов симметрии куба.

В кубе имеется

- центр инверсии  $C$  (см. рис. 6.1);
- три оси четвертого порядка –  $3L_4$  (см. рис. 6.3, а), проходящие через середины граней куба;
- четыре оси третьего порядка –  $4L_3$  (см. рис. 6.3, б), проходящие через вершины куба;
- шесть осей второго порядка –  $6L_2$  (см. рис. 6.3, в), проходящие через середины ребер куба;
- девять плоскостей симметрии (см. рис. 6.3).

Вышесказанное может быть выражено формулой:  $3L_44L_36L_29PC$ .

Совокупность всех элементов симметрии определяет вид симметрии. В кристаллографии по видам симметрии все кристаллы раз-

деляются на 32 класса, которые, в свою очередь, разделяют на семь систем или сингоний, указанных выше. Сингонии делятся на три категории: низшую, среднюю и высшую (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Категории и сингонии

Категория	Сингония
Низшая	Триклинная
	Моноклинная
	Ромбическая
Средняя	Тетрагональная
	Тригональная
	Гексагональная
Высшая	Кубическая

Вид симметрии зависит от внутреннего строения кристаллов. Внутреннее строение определяется формой элементарной ячейки и ее параметрами. Именно с этим связано название различных сингоний, например, триклинная сингония – три угла между ребрами этой элементарной ячейки косые, «клино» по-гречески – наклонять.

### Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.
2. Рисунки, определяющие плоскости симметрии в равнобедренном треугольнике, квадрате, прямоугольнике, ромбе.
3. Описание элементов симметрии гексаэдра (куба), запись формулы симметрии.
4. Заполненная таблица 6.2.

### Контрольные вопросы

1. Что относится к элементам ограничения кристаллов?
2. Что понимается под симметрией кристаллов?
3. Что такое ось симметрии?

#### 4. Что обозначает кристаллографическая формула $L_44L_2$ ?

Таблица 6.2

Название фигуры	Элементы симметрии						
	Центр симметрии	Оси первого порядка	Оси второго порядка	Оси третьего порядка	Оси четвертого порядка	Оси шестого порядка	Плоскости симметрии

### РАБОТА № 7

#### Изучение типов изоморфных замещений

Цель работы: изучить типы изоморфных замещений.

#### Задания

1. Используя учебники и пособия, изучить типы изоморфных замещений.
2. Изучить условия, необходимые для проявления изоморфизма.
3. По заданию преподавателя, используя табл. 7.1 и 7.2. подобрать возможные замещения.
4. По заданию преподавателя, используя схемы Гинзбурга определить возможные изовалентные и гетеровалентные замещения.
5. Ответить на контрольные вопросы.
6. Составить отчет.

## Общие положения

*Изоморфизм* – способность элементов (атомов, ионов) замещать друг друга в кристаллических решетках, не нарушая их строения.

Как известно, сплавы металлов представляют собой кристаллические структуры переменного состава, в которых атомы одного элемента располагаются в промежутках кристаллической решетки другого (твердые растворы второго рода). В отличие от твердых растворов второго рода в твердых растворах первого рода атомы (ионы) одного кристаллического вещества могут замещаться атомами (ионами) другого вещества, которые располагаются в узлах кристаллической решетки. Такие растворы называются изоморфными смесями и широко распространены в природных условиях.

Необходимо отметить, что некоторые элементы не образуют своих собственных минералов: один ведущий элемент в небольшой степени изоморфно замещается другим второстепенным рассеянным элементом (в природе в рассеянном состоянии находятся рубидий, индий, кадмий, германий и др.). И чтобы их извлечь, важно знать, в какой форме они находятся.

*Условия, необходимые для проявления изоморфизма:*

- замещаться могут ионы одного знака, т. е. катион на катион, анион на анион;
- замещаться могут только атомы или ионы близкого размера, т. е. разница величины ионных радиусов иона замещаемого и замещающего не должна превышать, по В. М. Гольдшмидту, при совершенном изоморфизме 15 и несовершенном 25 %. Если же величина более 40 %, изоморфизм невозможен.

При совершенном изоморфизме один ион может в любых количествах замещаться другим ионом (например, ион  $\text{Fe}^{2+}$  на  $\text{Mg}^{2+}$ ), при несовершенном изоморфизме такое замещение возможно только в строго ограниченных пределах (например, замещение  $\text{Ca}^{2+}$  на  $\text{Mg}^{2+}$ ).

Разница величины ионных радиусов иона определяется следующим образом:

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} 100,$$

где  $R_1$  – меньший ионный радиус,  $R_2$  – наибольший ионный радиус;

- замещаться могут только ионы, близкие по степени поляризации, т. е. по степени ионно-ковалентной связи;
- замещаться могут только элементы, имеющие одинаковое координационное число в данной кристаллической структуре;
- изоморфные замещения должны происходить таким образом, чтобы не нарушался электростатический баланс кристаллической решетки;
- изоморфные замещения протекают в сторону приращения энергии решетки, т. е. количества энергии, которое выделяется при соединении катионов и анионов, находящихся в изолированном состоянии, в твердую кристаллическую решетку.

Следует обратить внимание на то, что изоморфизм зависит и от структуры кристаллической решетки, так как каждый ион в кристаллической решетке имеет свою изоморфность.

Для того чтобы показать, что несколько ионов изоморфно замещают друг друга, их ставят в круглые скобки, разделяя запятыми, при этом на первом месте ставят основной ион, а далее располагают ионы в последовательности уменьшения их содержания.

*Типы изоморфизма:*

- изовалентный;
- гетеровалентный;
- изоструктурный;
- изоморфизм особого рода.

*Изовалентный изоморфизм* характеризуется тем, что в этом случае происходит замещение ионов одинаковой валентности (разница в размерах ионных радиусов не должна быть более 15 %).

В табл. 7.1 и 7.2 приведены размеры ионных радиусов.

Таблица 7.1.

Размеры ионных радиусов для одновалентных ионов

Размеры ионных радиусов, Å								
Li <sup>1+</sup>	Cu <sup>1+</sup>	Na <sup>1+</sup>	Ag <sup>1+</sup>	K <sup>1+</sup>	Au <sup>1+</sup>	Tl <sup>1+</sup>	Rb <sup>1+</sup>	Cs <sup>1+</sup>
0,78	0,96	0,98	1,33	1,33	1,37	1,49	1,49	1,65

Таблица 7.2

## Размеры ионных радиусов для двухвалентных ионов

Размеры ионных радиусов, Å									
Be <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Ba <sup>2+</sup>
0,34	0,78	0,83	0,83	0,78	0,82	0,91	1,05	1,27	1,43

*Пример:* Определить возможность изоморфизма для ионов Fe<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>. При возможности изоморфизма определить его тип.

Для определения возможности изоморфизма необходимо определить разницу величины ионных радиусов ионов Fe<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>:

$$\frac{0,83 - 0,78}{0,78} 100 = 6,4 \%$$

Так как разница величины ионных радиусов иона Fe<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> менее 15 %, то изоморфизм возможен, и он является совершенным.

*Гетеровалентный изоморфизм* – происходит замещение ионов различной валентности. В этом случае один ион не может замещаться другим без того, чтобы не нарушился электростатический баланс кристаллической решетки. Поэтому происходит замещение не иона на ион, как при изовалентном изоморфизме, а наблюдается замещение группы ионов определенной валентности на другую группу ионов при сохранении той же суммарной валентности (табл. 7.3).

Таблица 7.3

## Гетеровалентные замещения минералов

Замещаемая группа	Замещающая группа	Примеры минералов
Ca <sup>2+</sup> Al <sup>3+</sup>	Na <sup>1+</sup> Si <sup>4+</sup>	Плагиоклазы, скаполиты
Ca <sup>2+</sup> Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>1+</sup> TR <sup>3+</sup>	Апатит, перовскит
Ca <sup>2+</sup> Ti <sup>4+</sup>	Na <sup>1+</sup> Nb <sup>5+</sup>	Перовскит, лопарит, сфен
Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>1+</sup> Al <sup>3+</sup>	Актинолит
Mg <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	Li <sup>1+</sup> Al <sup>3+</sup>	Биотит, лепидолит, роговая обманка
Mg <sup>2+</sup> Si <sup>4+</sup>	Al <sup>3+</sup> Al <sup>3+</sup>	Авгит, роговая обманка

При этом типе изоморфизма следует иметь в виду, что замещение иона одной валентности на один другой всегда связано с компенсацией валентности, которая может происходить как в катионной, так и анионной части соединения.

Поэтому необходимо соблюдать следующие условия:

а) сумма валентности замещаемых ионов должна быть равна сумме валентностей замещающих ионов;

б) сумма ионных радиусов замещаемых ионов должна быть близка к сумме ионных радиусов и может отличаться от нее не более чем на 15 % (для совершенного изоморфизма).

*Изоструктурный изоморфизм* характеризуется тем, что при этом виде изоморфизма происходит замещение не одного или группы ионов на другой ион или на другую группу, а замещение целого «блока» одной кристаллической решетки на другой такой же «блок». Необходимым условием является однотипность структуры минерала или близкие размеры элементарных частиц. Например, в кристаллической решетке виллемита может происходить замещение  $Zn_2[SiO_4]$  на  $Be_2[SiO_4]$ .

*Изоморфизм особого рода* характерен для минералов, в которых компенсация валентностей происходит за счет высвобождения из кристаллической решетки отдельных ионов и образования в узлах её вакантных мест – дефектов. Так, например, при замещении в пирохлоре  $Ca_2Nb_2O_7$   $Ca^{2+}$  на  $Ce^{3+}$  и  $U^{4+}$  компенсация валентностей может осуществляться за счет уменьшения числа катионов кальция с образованием в структуре минерала вакантных положений, не заполненных катионами. При этом формула пирохлора будет иметь вид –  $(Ca, Ce)_{2-x}Nb_2O_7$ . Подобные замещения, приводящие к возникновению анионных и катионных вакансий в кристаллических решетках, называются «изоморфизмом с вычитанием». В редких случаях возможна компенсация валентностей за счет появления дополнительных анионов, располагающихся в междоузлиях решетки.

На рис. 7.1 представлены схемы, составленные А. И. Гинзбургом.

## Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.
2. Описание условий, необходимых для проявления изоморфизма.
3. Заполненная таблица 7.4.

Таблица 7.4.

Наименование замещаемого элемента	Наименование замещающего элемента	Разница величины ионных радиусов, %	Возможность изоморфизма

## 4. Заполненная таблица 7.5.

Таблица 7.5.

Наименование замещаемого элемента	Наименование замещающего элемента	
	изовалентные замещения	гетеровалентные замещения

## 5. Список использованной литературы.

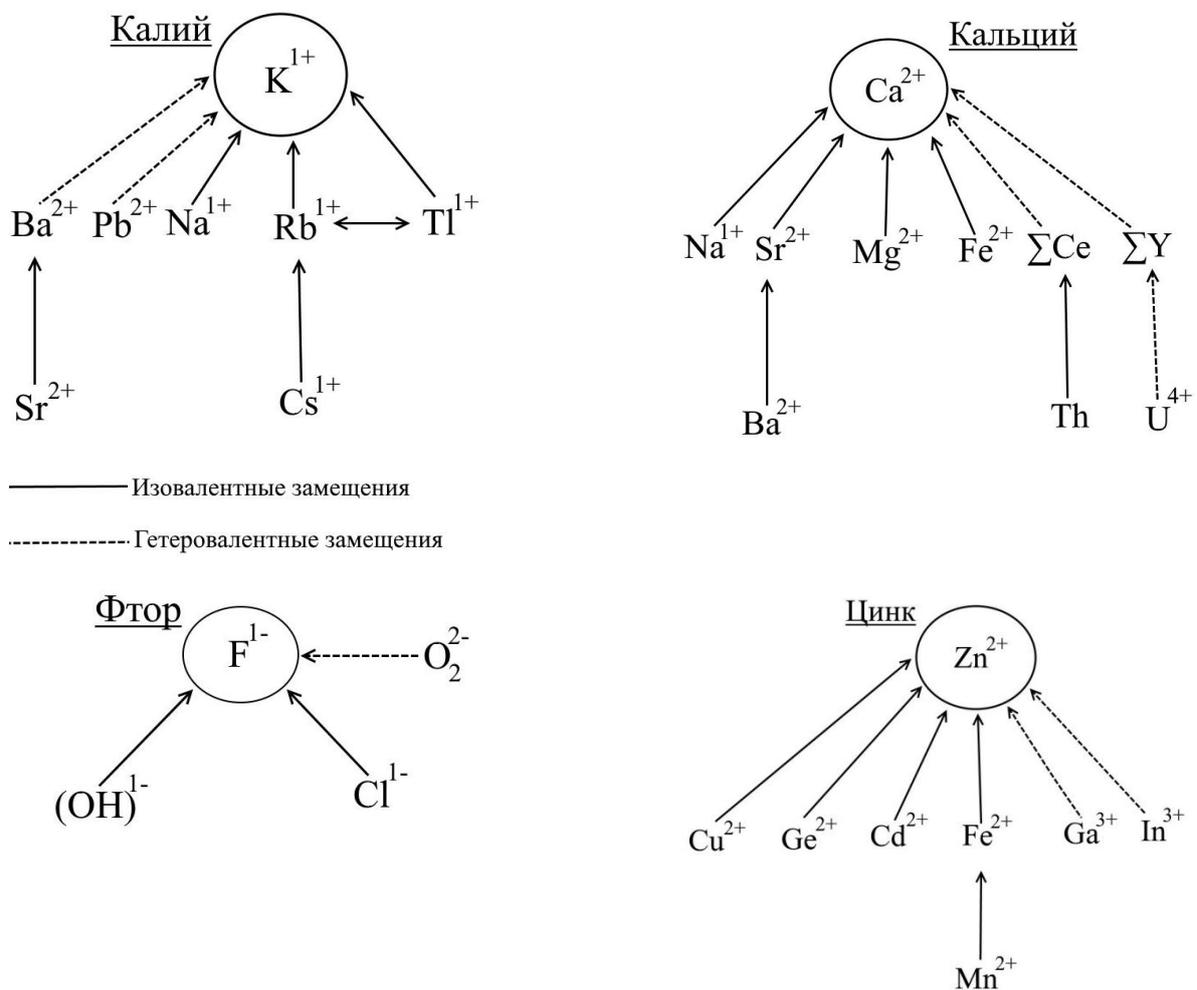


Рис. 7.1. Схемы А. И. Гинзбурга

## **Контрольные вопросы**

1. Назовите типы изоморфных замещений?
2. Чем характеризуется ковалентный изоморфизм?
3. Являются ли натрий и медь изоморфными веществами?
4. Какие условия необходимы для гетеровалентного изоморфизма?
5. Опишите изоморфизм особого рода.

## **РАБОТА № 8**

### **Изучение строения и свойств минералов**

Цель работы: изучить строение и основные свойства минералов.

### **Задания**

1. Используя учебники и пособия, изучить строение и основные свойства минералов.
2. По заданию преподавателя описать строение и основные свойства минералов, выданных преподавателем.
3. Ответить на контрольные вопросы.
4. Составить отчет.

### **Общие положения**

Для любого минерала характерна его физическая и химическая гомогенность (однородность), т.е. равенство физических и химических свойств во всех или параллельных направлениях.

Химический состав минералов в общем укладывается в химическую формулу, но, в зависимости от присутствующих в них примесей, может несколько изменяться.

К основным *физическим свойствам* минералов относятся такие, как цвет, побежалость, цвет черты, блеск, степень прозрачности, твердость, спайность, отдельность, излом, удельный вес, магнитность, хрупкость, ковкость, гибкость, упругость.

Цвет (окраска) минералов зависит от химического состава, структуры и примесей. Например, кварц может иметь белую, серую, дымчатую, розовую, буроватую, почти черную окраску.

По окраске минералов принято судить об условиях их образования и принадлежности к определенному месторождению.

Побежалость – это явление, когда минерал помимо основной окраски в тонком поверхностном слое имеет дополнительную окраску. Эта окраска возникает в результате интерференции света в тонких пленках вследствие различных реакций. Цвета побежалости можно сравнить с радужными пленками на поверхности воды, загрязненной нефтяными продуктами.

Цвет черты – это цвет тонкого порошка минерала, образующийся при трении образца о шероховатую поверхность неглазурованной фарфоровой пластинки. Очень часто он не совпадает с внешним цветом минерала. Особенно характерным цвет черты является для мало-прозрачных и непрозрачных минералов.

Цвет черты минералов – более постоянный признак в сравнении с окраской.

Блеск является следствием отражения световых лучей от поверхности минерала. Блеск зависит прежде всего от типа связи кристаллической решетки.

По характеру блеска минералы делят:

- *на минералы с металлическим блеском*, напоминающим блеск отполированной поверхности металла,
- *минералы с неметаллическим блеском* (алмазным, стеклянным, перламутровым, шелковым, жирным, смолистым, восковым и матовым).

По степени прозрачности минералы делятся:

- *на прозрачные минералы*, сквозь которые ясно видно изображение, горный хрусталь;

- *полупрозрачные минералы*, сквозь которые предметы видно с трудом, гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ );

- *просвечивающиеся минералы* – минералы прозрачные в тонких слоях, опал ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ );

- *непрозрачные минералы*, не пропускающие свет даже в тонких обломках, пирит ( $\text{FeS}_2$ ).

Спайность, как уже отмечалось ранее, – это способность минералов раскалываться по определенным плоскостям с образованием параллельных плоскостей.

По степени совершенства минералов различают следующие виды:

- *весьма совершенная спайность*, характеризующаяся очень легким расщеплением кристалла (пальцами);

- *совершенная спайность* – при слабом ударе образуются обломки кристалла с ровными плоскостями спайности;

- *средняя спайность* – при ударе наблюдается образование обломков не только по плоскостям спайности, но и образование неровных поверхностей излома по случайным направлениям;

- *несовершенная спайность* обнаруживается с трудом и проявляется только на небольших участках;

- *весьма несовершенная спайность* – отсутствие спайности.

Отдельность, по Н. В. Белову, – отделение по плоскостям мельчайших включений других минералов, расположенных вдоль плоскостей с плотнейшей упаковкой в структуре другого минерала в виде тонких прокладок.

Излом – это поверхность раскола минералов при разламывании минералов не по плоскости спайности и отдельности.

Различают следующие виды изломов:

- *ровный излом*, типичный для материалов с повышенной спайностью – халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ );

- *неровный излом*, характеризующийся неровной поверхностью раскола, – апатит [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ , F, OH];

- *ступенчатый излом*, типичный для минералов со спайностью в нескольких направлениях, – полевой шпат;
- *занозистый излом*, характерный для минералов цепочной структуры и волокнистого сложения. Напоминает поверхность неоструганных досок – асбест, селенит ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ );
- *раковинный излом*, характерный для минералов, у которых отсутствует спайность. Напоминает внутреннюю поверхность раковины – кварц ( $\text{SiO}_2$ );
- *землистый излом*, поверхность которого шероховатая, матовая, как бы покрыта пылью, – калионит ( $\text{Al}_4(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ );
- *крючковатый излом*, характерный для ковких минералов (Cu, Ag, Au). Поверхность раскола, как бы покрыта острыми крючочками;
- *зернистый излом*, на поверхности которого отчетливо видны отдельные зерна, слагающие агрегат, – хромит ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ).

Удельный вес зависит от химического состава минерала, плотности упаковки и мотива структуры. Большим удельным весом обладают минералы, имеющие в своем составе элементы с большим порядковым номером.

По удельному весу минералы делят на три группы:

- *легкие минералы*, имеющие удельный вес до 2,5, – сера, гипс;
- *средние минералы*, удельный вес которых от 2,5 до 4,0, – силикаты, кварц;
- *тяжелые минералы* с удельным весом более 4,0 – гематит, самородные металлы (Cu, Au, Pt).

Магнитность минералов определяется с помощью магнита или способностью минерала отклонять магнитную стрелку на компасе.

Магнитностью обладает сравнительно небольшое количество минералов, в состав которых входят железо, кобальт, никель, марганец. Магнитные свойства хорошо выражены у магнетита ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ).

Хрупкость, вязкость, ковкость. Хрупкость – это свойство минерала легко распадаться при ударе на мелкие обломки. Вязкие минералы раскалываются с трудом. Ковкие минералы сплющиваются при ударе и закругляются по краям.

Гибкость, упругость. Минерал считается гибким, если его тонкие пластинки и волокна могут изгибаться, не ломаясь. Упругим является минерал, у которого после изгибания пластинки или волокна выпрямляются сами собой.

### Содержание отчета

1. Название, цель работы, задание.
2. Заполненная таблица 8.1.

Таблица 8.1.

Минерал	Цвет минерала	Наличие побежалости	Наличие блеска	Степень прозрачности

3. Индивидуальное задание.
4. Список использованной литературы.

### Контрольные вопросы

1. Какие свойства относятся к физическим свойствам?
2. Что такое побежалость?
3. Что понимают под цветом черты?
4. Как подразделяются минералы по характеру блеска?
5. Как подразделяются минералы по степени совершенства?
6. Что понимают под отдельностью?
7. Как классифицируют изломы минералов?
8. Какие группы минералов различают по удельному весу?
9. Что понимают под магнитностью минерала?
10. Какие минералы принято считать упругими?

## Приложение

Таблица 1

### Поправка $\Delta$ на поглощение в образце радиусом $\rho$

$\Theta$	$\rho$									
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
10	0,29	0,39	0,49	0,58	0,68	0,78	0,87	0,97	1,07	1,16
12	0,29	0,38	0,48	0,57	0,67	0,76	0,86	0,96	1,05	1,14
14	0,28	0,38	0,47	0,56	0,66	0,75	0,85	0,94	1,03	1,13
16	0,28	0,38	0,46	0,55	0,65	0,74	0,83	0,92	1,02	1,11
18	0,27	0,37	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,90	1,00	1,09
20	0,27	0,35	0,44	0,53	0,62	0,71	0,80	0,89	0,97	1,06
22	0,26	0,34	0,43	0,52	0,60	0,69	0,77	0,86	0,95	1,03
24	0,25	0,33	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,84	0,92	1,00
26	0,24	0,32	0,41	0,49	0,57	0,65	0,73	0,81	0,88	0,97
28	0,23	0,31	0,39	0,47	0,55	0,62	0,70	0,78	0,86	0,96
30	0,23	0,30	0,38	0,45	0,52	0,60	0,68	0,75	0,83	0,90
32	0,22	0,29	0,36	0,43	0,50	0,58	0,65	0,72	0,79	0,86
34	0,21	0,28	0,35	0,41	0,48	0,55	0,62	0,69	0,76	0,82
36	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59	0,66	0,72	0,78
38	0,19	0,25	0,31	0,37	0,43	0,50	0,56	0,62	0,68	0,74
40	0,18	0,23	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,64	0,70
42	0,17	0,22	0,27	0,33	0,39	0,44	0,49	0,55	0,61	0,66
44	0,16	0,21	0,26	0,31	0,36	0,42	0,47	0,52	0,57	0,62
46	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34	0,38	0,43	0,48	0,53	0,58
48	0,14	0,18	0,22	0,27	0,32	0,36	0,40	0,45	0,49	0,54
50	0,12	0,17	0,21	0,25	0,29	0,33	0,37	0,41	0,46	0,50
52	0,11	0,15	0,19	0,23	0,27	0,30	0,34	0,38	0,42	0,46
54	0,10	0,14	0,17	0,21	0,24	0,28	0,31	0,34	0,38	0,41
56	0,09	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,32	0,35	0,38
58	0,08	0,11	0,14	0,17	0,20	0,22	0,25	0,28	0,32	0,34
60	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
65	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
70	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,14
75	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08
80	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04

Таблица 2

## Межплоскостные расстояния

HKL	d/n	J	HKL	d/n	J	HKL	d/n	J
<b>Al</b>			<b>Cu</b>			<b>Pb</b>		
111	2,330	1,00	111	2,080	1,00	111	2,850	1,00
200	2,020	0,40	200	1,798	0,86	200	2,470	0,50
220	1,430	0,30	220	1,271	0,71	220	1,740	0,50
311	1,219	0,30	311	1,083	0,86	311	1,490	0,50
222	1,168	0,07	222	1,038	0,56	222	1,428	0,17
400	1,011	0,02	400	0,900	0,29	331	1,134	0,17
331	0,928	0,04	331	0,826	0,56	420	1,050	0,17
420	0,826	0,01	420	0,806	0,42	<b><math>\alpha</math> - Fe</b>		
422	0,905	0,04	422	0,735	0,42	110	2,010	1,00
<b>Ag</b>			<b>W</b>			200	1,428	0,15
111	2,360	1,00	110	2,230	1,00	211	1,166	0,38
200	2,040	0,53	200	1,580	0,29	220	1,010	0,10
220	1,445	0,27	211	1,290	0,71	310	0,904	0,08
311	1,232	0,53	220	1,117	0,17	222	0,825	0,03
222	1,179	0,05	310	1,000	0,29	321	0,764	0,10
400	1,022	0,01	222	0,913	0,06	330	0,673	0,03
311	0,938	0,08	321	0,846	0,34	420	0,638	0,09
420	0,915	0,05	330	0,745	0,11	<b>Zn</b>		
422	0,834	0,03	420	0,707	0,06	002	2,460	0,25
511	0,786	0,04	332	0,674	0,06	100	2,300	0,20
440	0,691	0,04	510	0,622	0,06	101	2,080	1,00
<b>Cr</b>			<b>Ni</b>			102	1,680	0,14
110	2,052	1,00	111	2,038	1,00	110	1,330	0,18
200	1,436	0,40	200	1,766	0,50	112	1,169	0,12
211	1,172	0,60	220	1,250	0,40	201	1,120	0,08
220	1,014	0,50	311	1,067	0,60	202	1,040	0,02
310	0,909	0,60	222	1,022	0,10	203	0,941	0,02
222	0,829	0,20	400	0,884	0,02	105,114	0,904	0,02
321	0,768	0,70	331	0,812	0,20	<b>Pt</b>		
400	0,718	0,10	420	0,791	0,16	111	2,250	1,00
330	0,6775	0,40	422	0,723	0,10	200	1,950	0,30
420	0,642	0,30	511	0,681	0,10	220	1,385	0,16
332	0,612	0,30	410	0,625	0,02	311	1,178	0,16
422	0,5865	0,30	531	0,598	0,08	222	1,128	0,03
			422	0,590	0,07	400	0,978	0,01
						331	0,897	0,03

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### *Основная литература:*

1. Картонова Л. В. Основы кристаллографии : учеб. пособие / Л. В. Картонова; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2016. – 84 с. Издание на др. носителе: Основы кристаллографии [Электронный ресурс], ISBN 978-5-9984-0672-0. <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/5108/1/01545.pdf>
2. Кристаллография и минералогия. Основные понятия/ Бойко С.В. - Красноярск.: СФУ, 2015. - 212 с.: ISBN 978-5-7638-3223-5 <http://znanium.com/bookread2.php?book=550292>

### *Дополнительная литература:*

1. Аникина В. И. Основы кристаллографии и дефекты кристаллического строения [Электронный ресурс]: Практикум / В. И. Аникина, А. С. Сапарова. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 148 с. – ISBN 978-5-7638-2195-6. <http://znanium.com/bookread2.php?book=441367>
2. Брагина В. И. Кристаллография, минералогия и обогащение полезных ископаемых [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. И. Брагина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 152 с. – ISBN 978-5-7638-2647-0. <http://znanium.com/bookread2.php?book=492236>

### *Периодические издания:*

Журналы «Вопросы материаловедения», «Материаловедение»

*Электронные версии* пособий и методических разработок и указаний:

1. Картонова Л. В. Основы материаловедения металлических и неметаллических веществ/ Л. В. Картонова, В. А. Кечин. – Владимир: Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (ВлГУ), 2014. – 176 с. Издание на др. носителе: Основы материаловедения металлических и неметаллических веществ [Электронный ресурс], ISBN 978-5-9984-0503-7. <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4028/1/01404.pdf>

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
<b>РАБОТА № 1.</b>	
Изучение процесса роста кристаллов.	
Кристаллизация азотнокислого свинца .....	5
<b>РАБОТА № 2.</b>	
Изучение простых форм кристаллических многогранников .....	9
<b>РАБОТА № 3.</b>	
Анализ пространственных решеток.	
Определение кристаллографических индексов плоскостей .....	19
<b>РАБОТА № 4.</b>	
Изучение методов рентгеноструктурного анализа (Расчет межплоскостных расстояний и рентгеновской плотности вещества) .....	25
<b>РАБОТА № 5.</b>	
Изучение методов рентгенофазового анализа .....	33
<b>РАБОТА № 6.</b>	
Изучение симметрии кристаллических многогранников (симметрии континуума) .....	38
<b>РАБОТА № 7.</b>	
Изучение типов изоморфных замещений .....	43
<b>РАБОТА № 8.</b>	
Изучение строения и свойств минералов .....	49
Приложение .....	54
Учебно-методическое обеспечение дисциплины .....	56