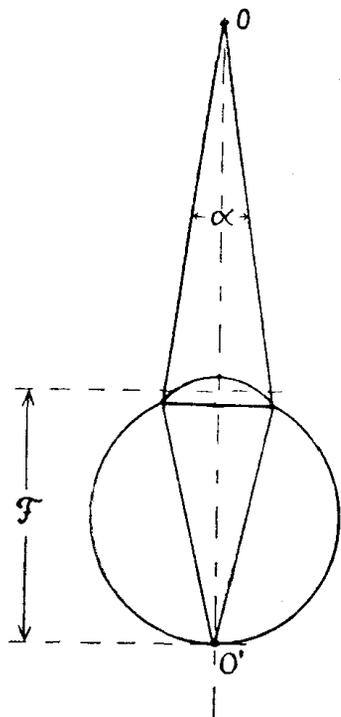
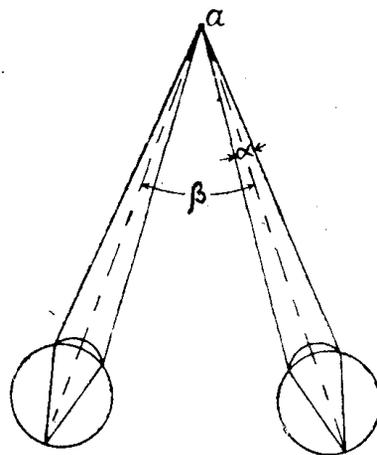


Если точка рассматриваемого глазом объекта расположена недалеко от него (фиг. 1), пучок лучей света, падающий на хрусталик, воспринимается глазом не как параллельный, а как расходящийся, в виде конуса с вершиной в точке O . Угол расхождения лучей от точки O , обозначенный буквой α , называется углом аккомодации. Автоматическим действием ресничной мышцы хрусталик аккомодирует, т. е. приобретает такую выпуклость, при которой пучок лучей собирается в фокусе O' на поверхности ретины. Человек ощущает степень усилий ресничной мышцы, необходимых для аккомодации хрусталика, и на основании этого судит об удаленности наблюдаемого предмета. Однако это возможно лишь в том

случае, если рассматриваемый предмет находится не далее пяти метров. Для суждения о расстояниях, простирающихся до более удаленных предметов, необходимо учитывать взаимодействие обоих глаз, которое характеризуется углом конвергенции. На фиг. 2 этот угол обозначен буквой β .



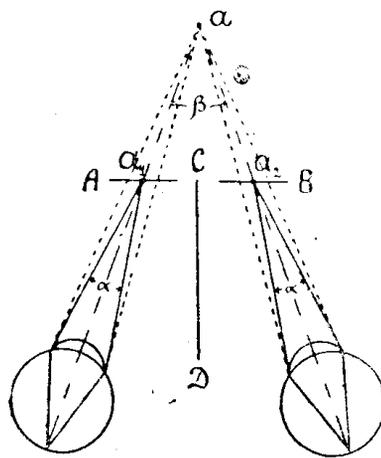
Фиг. 1. Ход лучей при рассматривании одним глазом.



Фиг. 2. Ход лучей при рассматривании двумя глазами.

В практической деятельности вершина угла аккомодации α и вершина угла конвергенции β всегда оказываются в одной и той же точке, которую глаза в данный момент рассматривают. Однако аккомодацию и конвергенцию можно искусственно разорвать и после некоторой тренировки можно научиться пользоваться ими раздельно. Как это достигается, показано на фиг. 3.

На листке бумаги наклеим две фотографии, снятые с позиций правого и левого глаза. Пусть a_1 и a_2 две точки, соответствующие одной точке сфотографированного объекта. Если между глазами поставить непрозрачную перегородку CD , то каждый глаз будет видеть только одно из двух изображений (расстояние до пары фотографий лучше взять 30—40 см). Вначале эти изображения будут восприниматься как раздельные, но через



Фиг. 3. Совмещение стереопары способом параллельных осей

две-три минуты, а иногда и раньше они сольются в одно. Это произойдет тогда, когда глаза окажутся конвергированными на точку a , находящуюся позади пары фотографий. Некоторое время изображение будет нерезким, потому что по привычке хрусталики будут аккомодированы на эту же точку; однако очень скоро оно станет четким, ясным и несколько большим по размеру, чем действительное. Четкость изображения, полученного в результате раздельного восприятия двух изображений, свидетельствует о том, что произошел разрыв аккомодации и конвергенции. На фиг. 3 видно, что вершины конусов, характеризующих аккомодацию обоих глаз, остались в точках a_1 и a_2 , тогда как пересечение осей хрусталиков глаз происходит в точке a .

Расстояние между точками a_1 и a_2 называется базисом стереопары. Совершенно очевидно, что описанный эффект может иметь место лишь в том случае, если этот базис будет не больше, чем расстояние между оптическими центрами хрусталиков. Описанный прием совмещения стереопар носит название «параллельных осей», потому что при максимальном базисе, т. е. равном расстоянию между центрами хрусталиков, оптические оси расположены параллельно.

Достижение описанного эффекта для близоруких облегчается рассмотрением без очков, а для лиц с нормальным зрением—употреблением очков с оптической силой от $+1$ до $+5$ диоптрий.

Следует заметить, что за рубежом уже существуют книги, снабженные такими иллюстрациями, которые надо рассматривать описанным способом. Как пример приведем двухтомник Морзе и Фешбаха «Методы теоретической физики» [4].

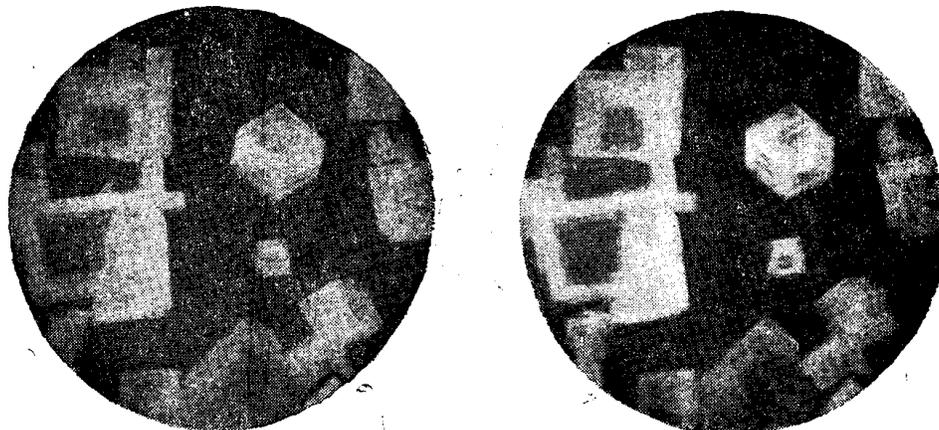
Скелетные кристаллы

В литературе по кристаллографии, минералогии и металлосведению постоянно встречаются два термина, применяющиеся разными авторами к одним и тем же кристаллам. Речь идет о скелетных и дендритных кристаллах. Кристаллографы часто называют скелетными те кристаллы, которые металловеды причисляют к дендритным. Наоборот, металловеды называют дендритами те кристаллы, которые в минералогии относят к скелетным.

Такую путаницу в терминологии можно объяснить двумя обстоятельствами. Во-первых, причина образования скелетных и дендритных форм одна и та же. Эти формы получаются при быстром росте кристалла, когда в пространстве, окружающем кристалл, имеются посторонние частицы (молекулы, атомы, ионы), не удаляемые конвекцией или диффузией. Во-вторых, даже введя самое строгое различие между этими двумя формами, мы будем встречать такие кристаллы, которые трудно отнести к той или иной форме. Они будут переходными от одной формы к другой.

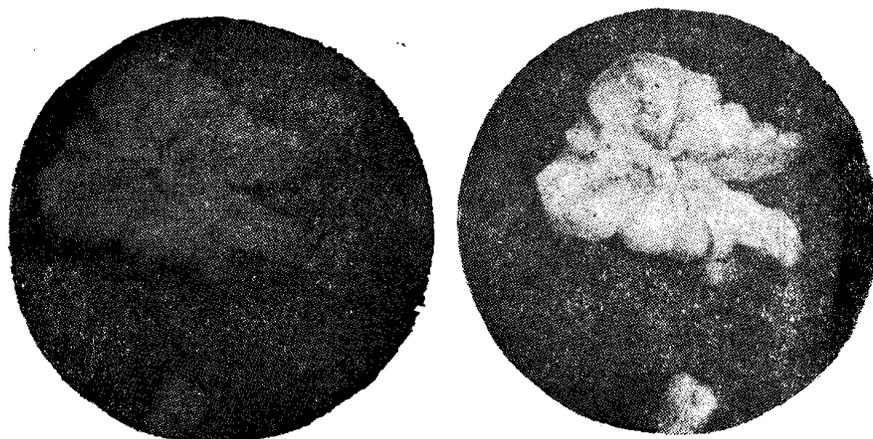
Для дендритных форм кристаллов является характерным наличие ветвей, прикрепленных друг к другу. Металловеды обычно называют их осями различных порядков ([5], стр. 335). Однако уже такие соли галогенов, как хлористый натрий, бромистый калий, иодистый калий и т. п., во многих случаях дают хорошо выраженные кубы, с полным набором углов и ребер, но зато вместо граней у них—глубоко идущие, ступенчатые впадины. Со стороны, особенно при наблюдении одним глазом в микроскоп, такие кристаллы походят на секториальные. Однако «пирамиды роста» у них оказываются не заполненными веществом кристалла, а пустыми. Здесь есть и углы, и ребра, но граней нет. На стереомикрофотографии (фиг. 4) хорошо виден такой кристалл, окруженный другими, более причудливой формы, но тоже пустыми внутри и без каких-либо ветвей.

В. А. Мокиевский и С. Н. Семенюк [6], касаясь этого же вопроса, описали подобные формы кристаллов квасцов и привели рисунок скелетных кристаллов куприта и золота, где также имеются углы и ребра октаэдра, но нет граней, на месте которых находятся ямки, идущие чуть не до центра кристалла. Конечно, такие кристаллы нельзя называть дендритными, поскольку никаких ветвей они не имеют.



Фиг. 4. Скелетные кристаллы иодистого калия, образовавшиеся из раствора в воде; $\times 14$.

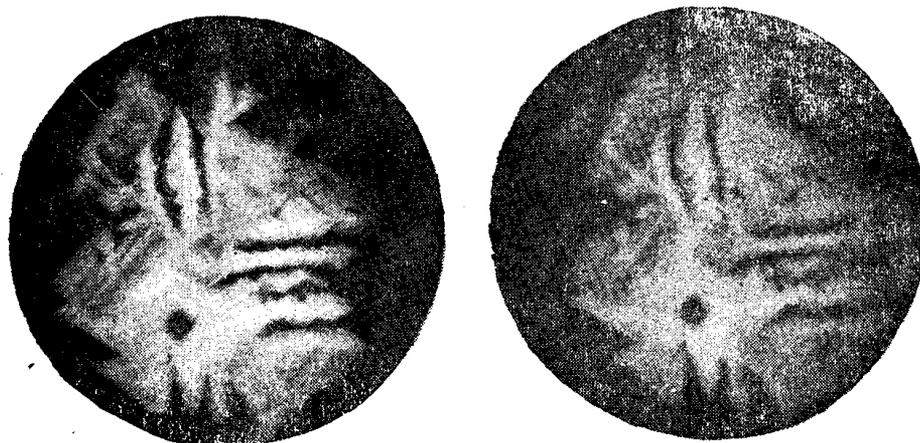
Дальнейшее развитие подобных кристаллов дает очень разнообразные формы, которые все же следует считать скелетными, поскольку и здесь нет никаких ветвей. В качестве примера приведем фиг. 5. Но здесь при тех же условиях кристаллизации, при дальнейшем росте кристаллы начинают явно ветвиться, и их уже можно причислять к дендритным, хотя и слабо напоминающим обычные дендриты (фиг. 6).



Фиг. 5. Скелетные кристаллы иодистого калия. Вид по направлению [111]; $\times 14$.

Таким образом, между скелетными и дендритными формами кристаллов имеется следующее различие: для скелетных форм характерным является притормаживание роста граней, но в то же время имеется возможность образования более или менее развитых ребер, типичных для кристаллов данного вещества. Это ведет к тому, что никаких ветвей, как правило, не образуется. Дендритные же формы характеризуются притормаживанием не только граней, но и ребер, что ведет к образованию на углах кристаллов ветвей или «осей» дендритов.

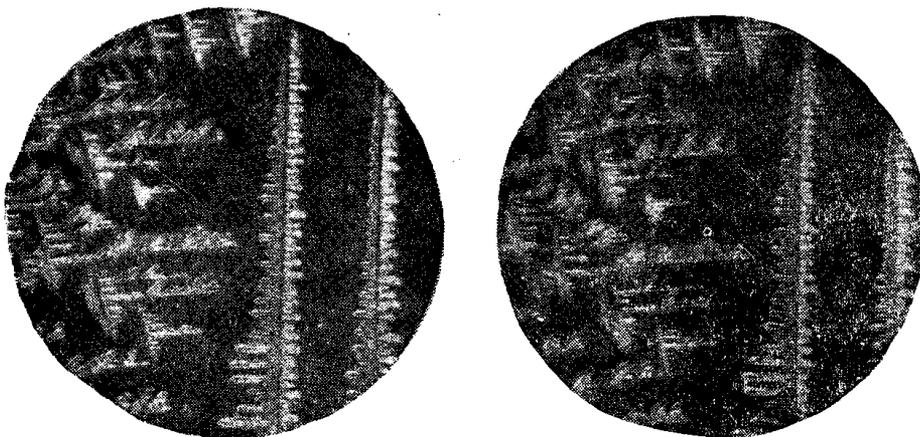
Очевидно, в некоторый момент будет очень трудно решить, к какой форме следует отнести тот или иной кристалл. Однако это не должно вызывать никаких недоумений. Некоторые формы кристаллов всегда будут промежуточными, как бы тщательно мы ни разделяли скелетные кристаллы от дендритных.



Фиг. 6. Иодистый калий. Переходная форма от скелетного кристалла к дендритному; $\times 14$

Октаэдрическая и кубическая формы дендритной кристаллизации

Чистый хлористый аммоний, начиная кристаллизоваться в виде микроскопических октаэдрических кристаллов, дает дендриты с ветвями, образующимися на углах октаэдра. Вполне понятно, что эти ветви оказываются перпендикулярными друг другу, поскольку они должны расти в направлениях, параллельных ребрам куба. Условимся называть такую форму дендритной кристаллизации *октаэдрической*. На фиг. 7 приведена стереомикрофотография типичных дендритов октаэдрической формы.



Фиг. 7. Октаэдрические дендриты хлористого аммония; $\times 14$

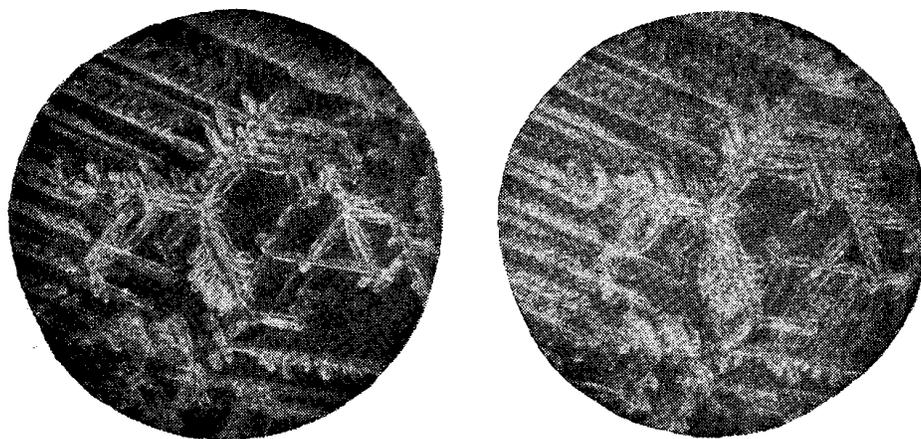
Здесь хорошо видно, что разница между дендритами заключается лишь в ориентации их относительно плоскости препарата и зависит от того, мешают или нет ветвям расти предметное и покровное стекло. Справа мы видим два дендрита, расположенные одной из ветвей параллельно плоскости предметного стекла. Такой ветви ничто не мешает расти пря-

мо, и она становится очень длинной. В ином положении оказываются ветви дендрита, расположенного в левой части. Все они растут под углом к стеклам и не имеют возможности расти беспредельно. Не трудно понять, что уменьшение расстояния между стеклами должно вести к укорачиванию таких ветвей. Рассмотрение подобного препарата в микроскоп одним глазом приводит к ошибочному выводу, что имеются дендриты двух принципиально разных типов.

Итак, хлористый аммоний, свободный от достаточного количества примесей, вступающих с ним в химическое взаимодействие, кристаллизуется из раствора в воде в октаэдрической форме.

Иначе обстоит дело при наличии в растворе примеси, могущей дать комплексное соединение с хлористым аммонием. В качестве такой примеси нами бралась мочевины. В качестве такой примеси нами бралась мочевины.

Грани куба на октаэдрическом кристалле отсутствуют, потому что они растут быстрее граней октаэдра. Если молекула примеси, появившейся в небольшом количестве в пространстве, окружающем кристалл, дает комплексное соединение с кристаллизующимся веществом, то вокруг кристалла появляются, кроме молекул примеси, молекулы этого соединения. Когда молекулы примеси избирательно прилипают к граням октаэдра и совсем не прилипают к граням куба, тогда грани октаэдра захватывают их и тормозятся только молекулами комплексного соединения, не считая молекул растворителя; грани же куба тормозятся как молекулами этого соединения, так и молекулами примеси. Это ведет к тому, что скорость роста граней куба значительно уменьшается и они появляются на кристалле; грани октаэдра вытесняются ими, кристалл принимает огранку куба. В случае дендритной кристаллизации иглы или ветви дендритов теперь должны появляться на углах куба, а значит расти параллельно направлениям диагоналей куба. Угол между диагоналями куба равен $70^{\circ} 24'$, поэтому и появляются дендриты с углами между ветвями приблизительно 70° и дополняющим этот угол до 180° , т. е. 110° . Эту форму дендритной кристаллизации мы и будем называть кубической. На фиг. 8 приведена стереомикрофотография типичных дендритов кубической формы.

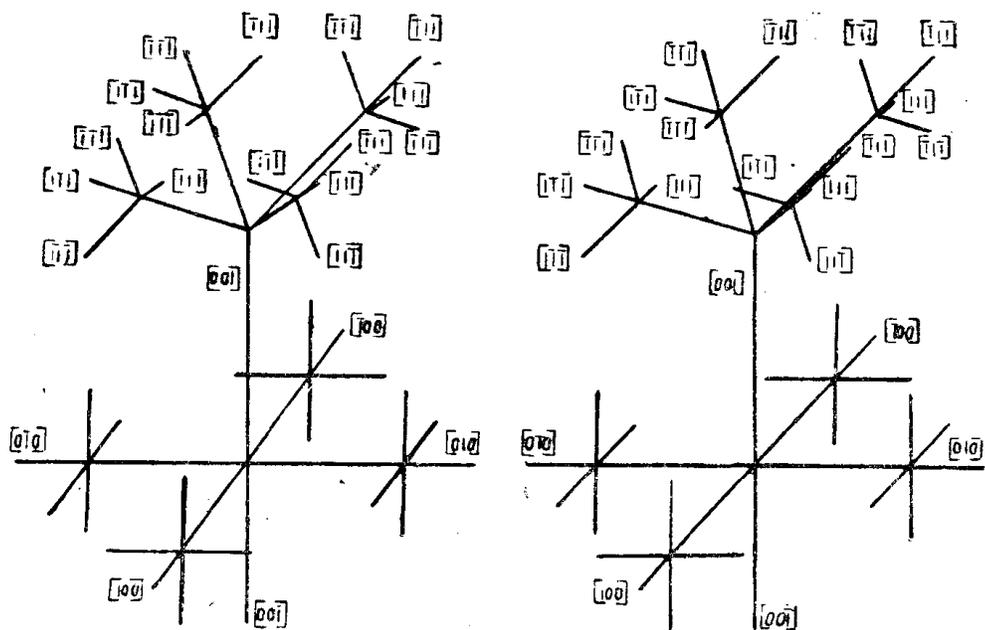


Фиг. 8. Кубические дендриты хлористого аммония с примесью мочевины 8%; $\times 14$.

Нами экспериментально установлено, что при небольших пересыщениях раствора кристаллизация протекает в октаэдрической форме даже при наличии 6 молекул мочевины на 100 молекул хлористого аммония. Увеличение же пересыщения ведет к кубической форме дендритной кристаллизации уже при 2-х молекулах на 100 и меньше. Объяснение

этому, по-видимому, должно быть такое: при небольшом пересыщении кристаллы растут медленно. Любые примеси, мешающие росту их граней, успевают в более или менее достаточной степени удаляться от этих граней путем диффузии. В результате кристаллы могут принимать обычную для них форму. Для хлористого аммония это будут октаэдрические дендриты. При повышении пересыщения скорость роста кристаллов должна возрастать, помехи со стороны примесей должны увеличиваться, появляется та форма, которая должна быть при наличии этих примесей.

Стереомикроскопические наблюдения кристаллизации с 6 молекулами мочевины на 100 молекул хлористого аммония при переменной скорости охлаждения, влекущей за собою изменение пересыщения, дают возможность фиксировать переход от октаэдрической формы к кубиче-



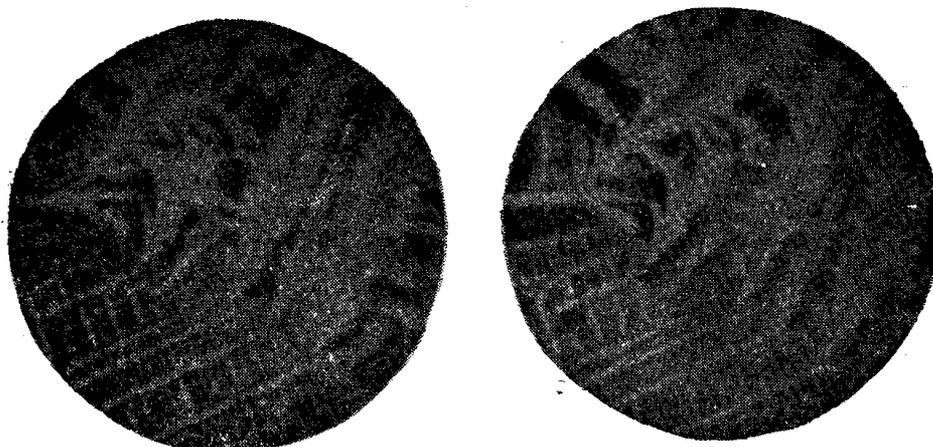
Фиг. 9. Схема перехода от октаэдрической формы дендрита к кубической.

ской. Получаются структуры, соответствующие схеме расположения ветвей дендритов, изображенной на фиг. 9. Здесь внизу изображена октаэдрическая форма расположения ветвей, в верхней же части показан переход этого дендрита в кубическую форму.

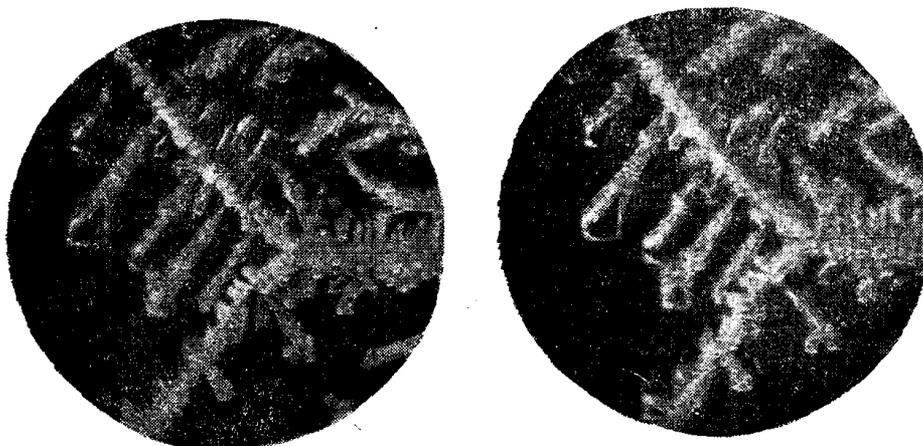
На стереомикрофотографии фиг. 10 можно видеть такой переход октаэдрической формы в кубическую.

Увеличение количества примесей в подобном случае дает замедление скорости роста дендритов и, как следствие, четкое выявление граней куба. По существу дендритная кристаллизация переходит в скелетную кристаллизацию. На фиг. 11 приведена стереомикрофотография такого же перехода от октаэдрической формы к кубической при наличии 8,4 молекулы мочевины на 100 молекул хлористого аммония. Как ветви октаэдрической формы, перпендикулярные к главному стволу, расположенному горизонтально, так и ветви кубической формы, появившиеся с места расщепления этого ствола,— все они покрыты гранями куба.

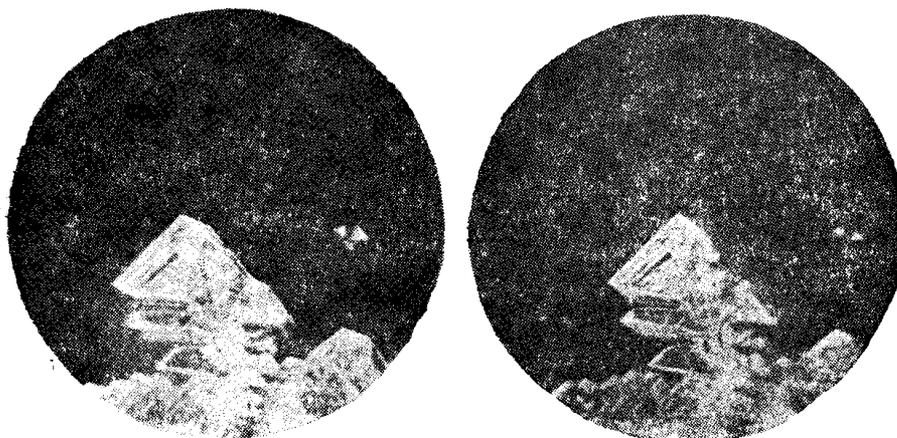
Дальнейшее повышение концентрации примеси переводит кристаллизацию из дендритной в скелетную. Получаются большие кристаллы, имеющие хорошо развитые ребра и участки граней кубов. На фиг. 12 приведена стереомикрофотография такого скелетного кристалла хлористого



Фиг. 10. Переход от октаэдрической формы дендритной кристаллизации хлористого аммония к кубической форме. Мочевины 6%; $\times 14$.



Фиг. 11. То же, что и на фиг. 10, но мочевины 8,6%; $\times 14$.



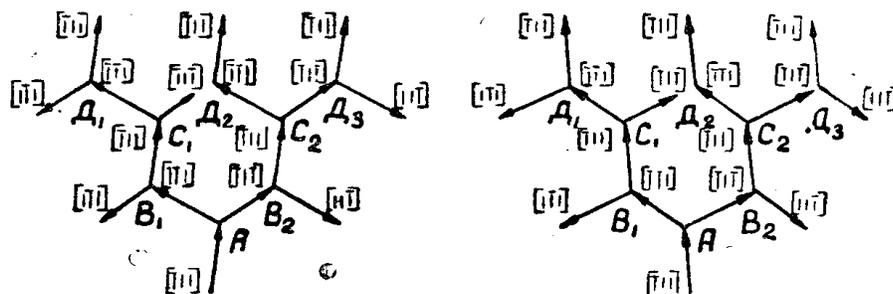
Фиг. 12. Скелетный кристалл хлористого аммония, с примесью мочевины 12,6%; $\times 14$.

аммония с примесью мочевины 12,6 молекулы на 100 молекул хлористого аммония.

В своей книге «Дендритная кристаллизация» Д. Д. Саратовкиным описаны дендриты, внешне похожие на пчелиные соты, а также рассмотрена возможная причина появления таких структур. Стереомикроскопические наблюдения за ростом подобных дендритов дают возможность обнаружить детали, совершенно не заметные при наблюдении в однотубусный микроскоп одним глазом. Причиной появления столь оригинальных структур оказывается не только примесь, вызывающая появление кубической формы дендритной кристаллизации. Существенную роль играет здесь то обстоятельство, что кубический дендрит оказывается ориентированным строго определенным образом и зажатым между двумя стеклами.

Специально поставленные опыты показали, что образуются эти структуры преимущественно при быстром охлаждении, т. е. тогда, когда пересыщение раствора больше. Центром кристаллизации является обычный октаэдрический кристаллик, лежащий гранью октаэдра на предметное стекло. Тогда направление $[III]$ оказывается перпендикулярным к обоим стеклам. Быстрая кристаллизация, с одной стороны, приводит к появлению игол кубической формы, с другой стороны, не дает кристаллу повернуться и принять иную ориентацию, поскольку иглы, растущие вверх, быстро упираются в покровное стекло.

Рассмотрим рост одной иглы, например $[III]$ (фиг. 13). Так как направление $[III]$ оказывается перпендикулярным к покровному стеклу, а угол между направлениями $[III]$ и $[III]$ $70^{\circ}24'$, игла $[III]$ подходит



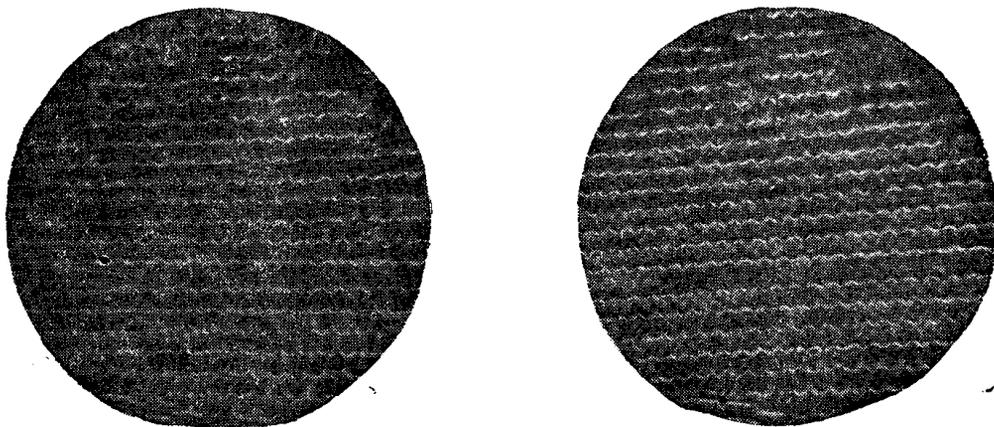
Фиг. 13. Схема образования сотообразных дендритов кубической формы.

к покровному стеклу, составляя с ним угол $19^{\circ}36'$. Если игла $[III]$ упирается в покровное стекло в точке А, то из конца ее могут расти новые иглы в направлениях $[III]$, $[III]$ и $[III]$, поскольку направления $[III]$, $[III]$ и $[III]$ требуют выхода в пространство над покровным стеклом. Из этих трех возможных направлений последние два являются наиболее благоприятными с точки зрения удаления кристалла в стороны, где имеется материал для роста. В направлении $[III]$ концентрация раствора безусловно меньше, так как это направление расположено к уже выросшей игле ближе, чем остальные. Таким образом, игла $[III]$ раздваивается в точке А, у покровного стекла. Вновь образовавшиеся иглы растут до соприкосновения с предметным стеклом в точках B_1 и B_2 . В этих точках происходит такое же раздвоение, как и в точке А. Игла $[III]$ дает иглы $[III]$ и $[III]$, а игла $[III]$ дает иглы $[III]$ и $[III]$. Таким образом, мы получаем две новые иглы $[III]$, параллельные первой. Эти две новые иглы точно таким же образом раздваиваются в точках C_1 и C_2 у покровного стекла, давая две иглы $[III]$ и две иглы $[III]$. Кажется бы,

что дальше процесс должен идти без каких бы то ни было изменений, давая все время удваивание числа игл [III]. Однако здесь мы встречаемся с новым обстоятельством. В точку D_2 из точек C_1 и C_2 должны прийти две иглы — [III] и [III]. Никакого столкновения игл произойти не может, так как они растут за счет имеющейся в растворе соли. Тогда в точку D_2 первой приходит одна из игл, например [III]. Вторая игла прекращает свой рост, не дойдя до точки D_2 . Теперь игла [III] не может раздвоиться. Она дает только одну иглу [III], так как направление [III] уже занято иглой [III], выросшей навстречу. Таким образом, развитие процесса кристаллизации в какую-нибудь одну сторону идет с увеличением игл [III] в порядке натурального ряда чисел.

Не трудно видеть, что проекции всех игл на любое из стекол составляют друг с другом углы по 120° . Именно поэтому при наблюдении в микроскоп одним глазом получается картина, внешне похожая на ячейки пчелиных сот.

Стереомикрофотография описанной структуры приведена на фиг. 14.



Фиг. 14. Сотообразные дендриты хлористого аммония. Мочевины 6%; $\times 24$.

Следует отметить, что соты, не осложненные появлением большого количества побочных веточек, удается получить лишь при очень малых расстояниях между стеклами, когда покровное стекло просто кладется на предметное. При больших расстояниях каждая из игл, прежде чем доходит до противоположного стекла, дает много ответвлений, конечно, параллельных основным иглам. Тогда соты оказываются как бы наполненными ветвями и ячеистость может быть не так ясно выражена.

Выводы

1. Методика стереомикроскопических исследований дает возможность обнаруживать такие подробности, которые совершенно ускользают при наблюдении в обычный микроскоп одним глазом. Стереомикрофотографирование является очень удобным способом документирования наблюдаемых процессов.

2. Для устранения путаницы в терминологии, касающейся скелетных и дендритных кристаллов, необходимо иметь в виду следующее различие между этими двумя формами: для скелетных форм характерным является притормаживание роста граней, но возможность образования более или менее развитых ребер, типичных для кристаллов данного вещества. Дендритные же формы характеризуются притормаживанием не только

граней, но и ребер, что ведет к образованию на углах кристаллов ветвей или «осей» дендритов.

3. Вещества, кристаллизующиеся в кубической системе, в случае дендритной кристаллизации при наличии примесей, вступающих с ними в химическое взаимодействие, могут давать две формы дендритов—октаэдрическую и кубическую. Дендриты октаэдрической формы имеют углы между ветвями 90° . Дендриты кубической формы имеют углы между ветвями приблизительно 70 и 110° , т. е. углы, под которыми расположены диагонали куба. Формы зависят от пересыщения раствора. Одна из них появляется при небольшом пересыщении, другая же при сильном пересыщении. Переход от одного пересыщения к другому в процессе кристаллизации сопровождается сменой форм, т. е. появлением новых углов между ветвями и новых граней на этих ветвях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саратовкин Д. Д. Дендритный рост кристаллов. М., Metallurgizdat, стр. 30, 1950.
2. Саратовкин Д. Д. Дендритная кристаллизация. М., Metallurgizdat, стр. 93, 1953.
3. Иванов С. П. О цветной стереоскопической фотографии. М., 40 стр. 1951.
4. Morse Philip M., Feshbach Herman. Методы теоретической физики. New York, Toronto, London, 1953.
5. Уманский Я. С., Фиикельштейн Б. Н., Блантер М. Е., Кишкин С. Т., Фастов Н. С., Горелик С. С. Физические основы металловедения. Metallurgizdat, 1955.
6. Мокниевский В. А., Семенюк С. Н. Скелетный рост кристаллов в вязкой среде. Записки Всесоюзного минерального об-ва, вып. 2, стр. 100—108, 1952.