

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие разработано в соответствии с требованиями ФГОС ВО подготовки бакалавров по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника», «Технологические машины и оборудование», «Прикладная механика», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Стандартизация и метрология», «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», «Техносферная безопасность». Настоящий методический материал включает следующие разделы:

1. Основы строения и свойства материалов. Фазовые превращения.
2. Основы термической обработки и поверхностного упрочнения сплавов.
3. Конструкционные металлы и сплавы.
4. Машиностроительные стали.
5. Электротехнические материалы. Пластмассы. Резины.

Целью изучения дисциплины является подготовка бакалавров к производственно-технологической, научно-исследовательской и проектной деятельности.

Задача дисциплины – изучение строения материалов, их физико-механических свойств, термической обработки, а также знание основных марок материалов при проектировании и изготовлении деталей машин.

Учебное пособие предназначено для закрепления теоретических знаний дисциплины, подготовки к межсессионной и итоговой формам контроля компетенций, интернет-экзамену, дистанционного обучения студентов, а также овладения практических навыков инженерной работы, связанной с изготовлением и разработкой машин.

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедением называют прикладную науку о связи состава и строения материалов с их свойствами. Решение важнейших технических проблем, связанных с экономией материалов, уменьшением массы машин и приборов, повышением точности и надежности и работоспособности механизмов и приборов во многом зависит от развития материаловедения. Непрерывный процесс создания новых материалов для современной техники обогащает науку о материалах, которая стимулирует появление новых технических идей.

Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии, однако наука о материалах в основном развивается экспериментальным путем.

Электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ и нейтронография позволяют изучать элементы кристаллической структуры, ее дефекты, закономерности превращений под воздействием внешних факторов (температура, давление и др.).

Изучение физических (плотность, электропроводность, теплопроводность, магнитная проницаемость и др.), механических (прочность, пластичность, твердость, модуль упругости и др.), технологических (жидкотекучесть, ковкость, обрабатываемость резанием и др.) и эксплуатационных (сопротивление коррозии, изнашиванию и усталости, жаропрочность, хладостойкость и др.) свойств позволяет определить области рационального использования различных материалов с учетом экономических требований.

Большой вклад в развитие науки о материалах внесли российские ученые. П. П. Аносов (1799–1851 гг.) впервые установил связь между строением стали и ее свойствами. Д. К. Чернов (1839–1921 гг.), открывший полиморфизм стали, всемирно признан основоположником научного металловедения. Большое значение в развитии методов физико-химического исследования и классификации сложных фаз в металлических сплавах имели работы Н. С. Курнакова (1860–1941 гг.) и его учеников. Разработка теории и технологии термической обработки стали связана с именами С. С. Штейнберга (1872–1940 гг.), Н. А. Минкевича (1883–1942 гг.). Исследованию механизма и кине-

тики фазовых превращений в металлических сплавах посвящены работы крупных советских ученых С. Т. Конобеевского, А. А. Байкова, Г. В. Курдюмова, В. Д. Садовского, А. А. Бочвара, С. Т. Кишкина, Н. В. Агеева и многих других.

Работы крупнейшего русского химика А. М. Бутлерова (1828–1886 гг.) по теории химического строения органических соединений создали научную основу для получения синтетических полимерных материалов. На основе работ С. В. Лебедева впервые в мире было создано промышленное производство синтетического каучука. Большое значение для развития полимерных материалов имели структурные исследования В. А. Каргина и его учеников.

Среди зарубежных ученых большой вклад в изучение железоуглеродистых сплавов внесли А. Ле-Шателье (Франция), Р. Аустен (Англия), Ф. Осмонд (Франция) и др. Важнейшие рентгеноструктурные исследования сплавов провели М. Лауэ и П. Дебай (Германия), У. Г. Брэгг и У. Л. Брэгг (Англия). Широко известны работы Э. Бейна, Р. Мейла (США) и Велера (Германия) в области теории фазовых превращений в сплавах. Над созданием полимерных материалов работали К. Циглер (Германия) и Д. Натта (Италия).

В материаловедении широко используется понятие структуры, которое подразумевает под собой форму, размеры и характер расположения соответствующих фаз в металлах и сплавах. Структурными составляющими сплава называют обособленные части, имеющие одинаковое строение с характерными особенностями. Различают макро- (строение металла или сплава, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении) и микроструктуру (строение металла или сплава, наблюдаемое с помощью микроскопа при больших увеличениях). Кроме того, существует атомно-кристаллическая структура металлов и сплавов как взаимное расположение атомов, существующее в реальном кристалле.

Глава 1

ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

1.1. Структура кристаллических материалов

Все металлы и металлические сплавы имеют кристаллическое строение, атомы расположены закономерно в отличие от аморфных тел, где атомы расположены хаотично.

Металлы представляют собой поликристаллические тела, состоящие из большого числа мелких различно ориентированных по отношению друг к другу кристаллов.

Закономерное расположение атомов в кристалле описывается кристаллической решеткой, т. е. трехмерным, периодически повторяющимся расположением атомов во всем объеме кристалла. Элементарный, т. е. наименьший объем, который характеризует особенности строения кристалла данного металла, называется элементарной ячейкой.

Ячейки или кристаллические решетки характеризуются симметрией, периодами решетки, координационными числами, базисами и коэффициентами компактности решетки.

Существует 7 видов симметрии (триклинная, моноклинная, ромбическая, ромбоэдрическая, гексагональная, тетрагональная, кубическая) и 14 видов элементарных ячеек.

подавляющее число технически важных металлов образуют одну из следующих кристаллических решеток:

- объемно-центрированную кубическую (ОЦК);
- гранецентрированную кубическую (ГЦК);
- гексагональной, которая может быть плотноупакованной (ГПУ) и не плотноупакованной.

Элементарные ячейки этих трех типов решеток показаны на рис. 1.1.

Периодом кристаллической решетки называется расстояние между центрами двух соседних атомов, расположенных вдоль осей элементарной ячейки. У большинства металлов периоды решеток находятся в пределах от $2,5 \cdot 10^{-10}$ до $5,5 \cdot 10^{-10}$ м (от $2,5 \text{ \AA}$ до $5,5 \text{ \AA}$).

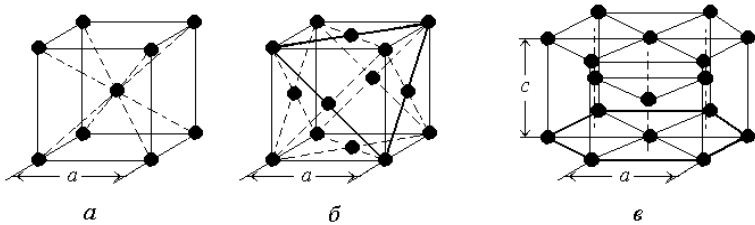


Рис. 1.1. Элементарные ячейки кристаллических решеток металлов:
 a – ОЦК; b – ГЦК; c – ГПУ.

Координационным числом (K) называется количество атомов, находящихся на наиболее близком и одинаковом расстоянии от любого произвольно выбранного атома кристаллической решетки.

Для ОЦК решетки $K = 8$, для ГЦК и ГПУ решетки $K = 12$. Таким образом, ГЦК и ГПУ кристаллические решетки являются плотноупакованными и их можно представить в виде последовательного чередования плотноупакованных плоскостей. При последовательности плотноупакованных плоскостей $ABAB\dots$ (рис. 1.2, a) образуется ГПУ решетка, а при последовательности $ABCABC\dots$ (рис. 1.2, b) – ГЦК.

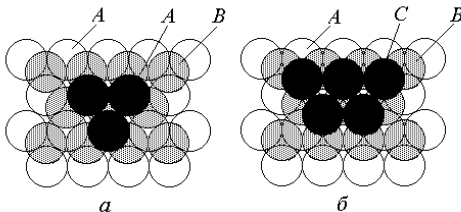


Рис. 1.2. Последовательности чередования плотноупакованных плоскостей:
 a – для ГПУ решетки; b – для ГЦК.

Базисом решетки называют количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку. При этом надо иметь в виду, что атомы в

углах ячеек принадлежат одновременно 8 ячейкам, атомы, расположенные в центрах граней, – двум ячейкам. Тогда базис ОЦК решеток равен 2, базис ГЦК составляет 4, базис ГПУ равен 6.

Коэффициент компактности решетки (η) определяется отношением объема, занимаемого атомами с условно сферической формой, ко всему объему ячейки. Для ОЦК решеток коэффициент компактности равен 0,68, для ГЦК и ГПУ составляет 0,74.

1.1.1. Полиморфизм

Для одной и той же подгруппы периодической системы элементов металлы кристаллизуются, как правило, с образованием элементарной ячейки одинакового типа. Например, большинство щелочных металлов имеют ОЦК решетку, щелочноземельных – ГПУ решетку.

Однако для некоторых металлов характерно существование двух и даже трех типов кристаллических решеток при различных температурах или давлениях. Это явление называется полиморфизмом, а кристаллические структуры – аллотропическими формами, или модификациями.

Низкотемпературную модификацию называют α , высокотемпературные – β , γ , δ и т. д.

Температурным полиморфизмом обладают около 30 металлов. Например, железо до 911°C и выше 1392°C имеет ОЦК структуру, а от 911°C до 1392°C – ГЦК структуру. Титан до 882°C имеет ГПУ структуру, а выше – ОЦК структуру. Кобальт при 477°C претерпевает полиморфное превращение из ГПУ структуры в ГЦК структуру.

Быстрое охлаждение может сохранить высокотемпературную модификацию в течение длительного времени при температурах 20...25°C, так как низкая диффузионная подвижность атомов при таких температурах не способна вызвать перестройку решетки.

Кроме того, известен полиморфизм под влиянием температуры и давления. При нагреве до температуры 2000°C и давлении $\sim 10^{10}$ Па углерод в форме графита перекристаллизуется в алмаз. При очень больших давлениях в железе обнаружена низкотемпературная модификация с гексагональной решеткой ГПУ.

Полиморфные превращения в чистых металлах происходят при постоянной температуре и сопровождаются тепловым эффектом – выделением теплоты, если превращение идет при охлаждении, и поглощением теплоты при нагреве. Полиморфные превращения происходят не только в чистых металлах, но и в сплавах и сопровождаются скачкообразным изменением свойств: удельного объема, теплоемкости, теплопроводности, электропроводности, магнитных, механических и химических свойств.

В результате полиморфного превращения образуются новые кристаллические зерна, имеющие другой размер и форму.

Поэтому такое превращение также называют перекристаллизацией. Если нагрев металла проведен до температуры, немного превышающей температуру полиморфного превращения (критической точки), получается очень мелкое зерно. Это используется для измельчения крупного зерна, полученного при кристаллизации из жидкого состояния или предварительном нагреве до высоких температур.

1.1.2. Строение реальных кристаллов. Точечные дефекты

Строение реальных кристаллов отличается от идеальных наличием в них дефектов, нарушающих правильное расположение атомов во всем объеме кристалла. Дефекты в кристаллах обычно характеризуют размерностью. По этому признаку дефекты делят на четыре группы: точечные, линейные, поверхностные и объемные.

Точечные дефекты. Точечные дефекты малы во всех трех измерениях, и размеры их не превышают нескольких атомных диаметров.

К самым простым точечным дефектам относятся вакансии, межузельные атомы основного вещества, чужеродные атомы внедрения (рис. 1.3).

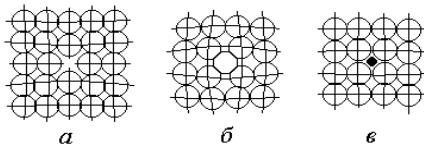


Рис. 1.3. Точечные дефекты в кристаллической решетке: *a* – вакансия; *б* – межузельный атом; *в* – примесный атом внедрения.

Вакансией (дефектом Шоттки) называется пустой узел кристаллической решетки.

Межузельным атомом (дефектом Френкеля) называется атом, перемещенный из узла в позицию между узлами.

Примесный атом внедрения возникает в процессе кристаллизации или диффузии примеси с поверхности и представляет собой сумму двух дефектов: вакансии и атома примеси. Такой дефект может образовываться при захвате примеси в процессе кристаллизации или при совместной диффузии вакансии и атома примеси.

Вакансии и межузельные атомы появляются в кристаллах при любой температуре выше абсолютного нуля из-за тепловых колебаний атомов. Каждой температуре соответствует равновесная концентрация вакансий, а также межузельных атомов. В плотноупакованных решетках, характерных для большинства металлов, энергия образования межузельных атомов в несколько раз больше энергии образования тепловых вакансий. Поэтому в металлах очень трудно возникают межузельные атомы и основным точечным дефектом являются тепловые вакансии. Например, в меди при температуре 20...25°C содержится 10^{-13} ат.% вакансий, а вблизи точки плавления – уже 0,01 ат.%.

Пресыщение точечными дефектами достигается при резком охлаждении после высокотемпературного нагрева, при пластическом деформировании и при облучении нейтронами.

В последнем случае концентрация вакансий и межузельных атомов одинакова: выбитые из узлов решетки атомы становятся межузельными атомами, а освободившиеся узлы становятся вакансиями. С течением времени избыток вакансий сверх равновесной концентрации уничтожается на свободных поверхностях кристалла, порах, границах зерен и других дефектах решетки. Вакансии являются подвижными дефектами кристаллической решетки и ускоряют все процессы, связанные с перемещением атомов: диффузию, спекание порошков и т. д.

Все виды точечных дефектов искажают кристаллическую решетку и, в определенной мере, влияют на физические свойства. В технически чистых металлах точечные дефекты повышают электрическое сопротивление, а на механические свойства практически не влияют. Лишь при больших концентрациях дефектов в облученных металлах понижается пластичность, и заметно изменяются другие свойства.

1.1.3. Линейные дефекты

Важнейшими видами линейных дефектов кристаллической решетки являются краевые и винтовые дислокации (рис. 1.4), движение которых определяет пластическое деформирование кристаллических материалов.

Краевая дислокация представляет собой локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней «лишней» атомной полуплоскости или экстраплоскости (рис. 1.4, *a*).

Линия дислокации соответствует краю экстраплоскости.

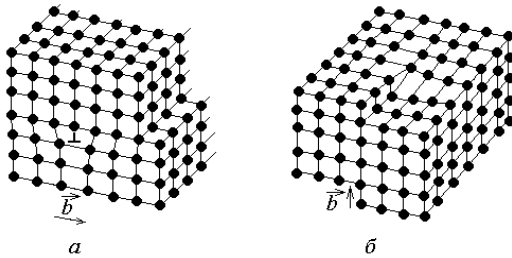


Рис. 1.4. Схемы дислокаций:
a – краевая; *б* – винтовая.

Вокруг дислокации кристаллическая решетка упруго искажена. Мерой искажения служит так называемый вектор Бюргерса \vec{b} . Он получается, если обойти замкнутый контур в идеальном кристалле, переходя от узла к узлу, а затем этот же путь повторить в реальном кристалле, заключив дислокацию внутрь контура. В реальном кристалле контур окажется незамкнутым. Вектор, который нужен для замыкания контура, называется вектором Бюргерса. У краевой дислокации вектор Бюргерса равен межатомному расстоянию и перпендикулярен дислокационной линии, у винтовой дислокации – параллелен ей.

Плотность дислокаций – суммарная длина всех линий дислокаций в единице объема. В монокристаллах она равна $10^4 \dots 10^5 \text{ см}^{-2}$, у отожженных поликристаллических металлов – $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$. При холодном пластическом деформировании плотность дислокаций возрастает до $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Попытка увеличить плотность свыше 10^{12} см⁻² быстро приводит к появлению трещин и разрушению металла.

Дислокации кроме пластической деформации участвуют в фазовых превращениях, рекристаллизации, служат готовыми центрами для образования второй фазы из твердого раствора.

Вдоль дислокаций скорость диффузии на несколько порядков выше, чем через кристаллическую решетку без дефектов. Дислокации служат местом концентрации примесных атомов, в особенности примесей внедрения, так как это уменьшает искажения решетки. Примесные атомы образуют вокруг дислокации зону повышенной концентрации – так называемую атмосферу Коттрелла, которая мешает движению дислокаций и упрочняет металл.

Особенно велико влияние дислокаций на прочность кристаллов. Благодаря подвижным дислокациям экспериментально определенный предел текучести металлов в 1000 раз меньше теоретического значения. При значительном увеличении плотности дислокаций и уменьшении их подвижности прочность увеличивается в несколько раз по сравнению с отожженным состоянием.

Прочность бездефектных участков (в том числе длинных и тонких нитевидных кристаллов, полученных кристаллизацией из газовой фазы) приближается к теоретической (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Зависимость предела текучести от плотности дислокаций:

- 1 – идеальный кристалл без дефектов; 2 – бездефектные нитевидные кристаллы; 3 – отожженные металлы; 4 – металлы с увеличенной плотностью дислокаций после обработки.

1.1.4. Поверхностные дефекты

Наиболее важными поверхностными дефектами являются большеугловые и малоугловые границы, дефекты упаковки, границы двойников.

В промышленности применяют как поликристаллические, так и монокристаллические материалы. Поликристаллический сплав содержит огромное число мелких зерен. В соседних зернах решетки ориентированы различно (рис. 1.6), и граница между зернами представляет собой переходный слой шириной 1...5 нм. В нем нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, повышена концентрация примесей.

Границы между зернами называются большеугловыми, так как соответственные кристаллографические направления в соседних зернах образуют углы в десятки градусов (рис. 1.6, *a*). Каждое зерно, в свою очередь, состоит из субзерен или блоков. Субзерно представляет собой часть кристалла относительно правильного строения.

Границы субзерен представляют собой стенки дислокаций (рис. 1.6, *б*). Угол взаимной разориентации субзерен не превышает 5° , поэтому такие границы называются малоугловыми. На малоугловых границах также скапливаются примеси.

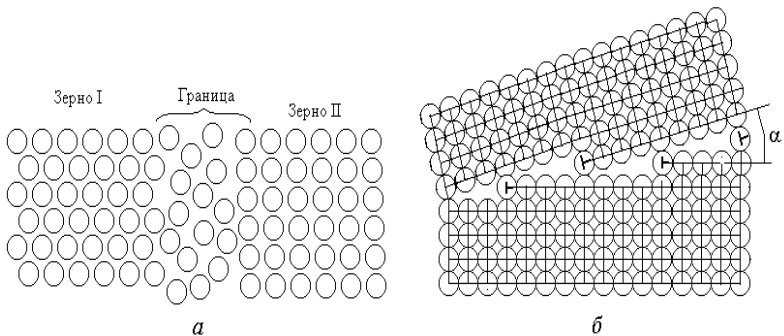


Рис. 1.6. Схемы строения границ:
a – большеугловые; *б* – малоугловые.

Дефект упаковки представляет собой часть атомной плоскости, ограниченную дислокациями, в пределах которой нарушен нормальный порядок чередования атомных слоев. Например, в сплавах с ГЦК решеткой чередуются плотноупакованные слои $ABC AB\dots$, а при наличии дефекта упаковки слои чередуются в последовательности $ABC BC ABC\dots$. Чередование слоев $BC\dots$ типично для кристаллов с ГПУ решеткой, и, таким образом, дефект упаковки представляет собой как бы тонкую пластинку с ГПУ решеткой в ГЦК решетке.

Двойником называется часть кристалла, в которой кристаллическое строение является зеркальным отражением остальной части кристалла. Граница двойника разделяет такие части кристалла. Двойники могут появляться при деформации, кристаллизации, отжиге деформированных кристаллов и других процессах. При двойниковании сдвиг соседних атомных плоскостей происходит на расстояние меньше межатомного, в отличие от деформации движением дислокаций.

Поверхностные дефекты влияют на механические и физические свойства материалов. Особенно большое значение имеют границы зерен. Предел текучести σ_T связан с размером зерен d зависимостью

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2},$$

где σ_0 и k – постоянные для данного материала; d – размер зерна.

Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Аналогично, но более слабо влияет на механические свойства размер субзерен.

Вдоль границ зерен и субзерен быстрее протекает диффузия, особенно при нагреве.

1.1.5. Объемные дефекты

К объемным дефектам относятся поры, трещины, усадочные раковины и т. п. Они имеют значительную по сравнению с атомами протяженность во всех трех направлениях кристалла. Трехмерные дефекты образуются как в процессе кристаллизации, так и при фазовых превращениях, деформации и других процессах (рис. 1.7).

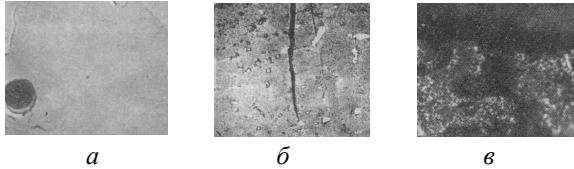


Рис. 1.7. Объемные дефекты:
а – пора; *б* – трещина; *в* – усадочная раковина.

1.1.6. Кристаллизация металла и строение слитка

Кристаллизацией называется переход веществ из жидкого состояния в кристаллическое.

Она обусловлена стремлением веществ иметь более устойчивое состояние, характеризуемое уменьшением термодинамического потенциала.

Температура, при которой термодинамические потенциалы вещества в твердом и кристаллическом состояниях равны, называется равновесной температурой $T_{пл}$.

Кристаллизация происходит в том случае, если термодинамический потенциал вещества в кристаллическом состоянии будет меньше термодинамического потенциала вещества в жидком состоянии, т. е. при переохлаждении жидкого металла до температур ниже равновесной $T_{пл}$.

Разность между температурами $T_{пл}$ и T_k , при которых может протекать процесс кристаллизации, называется степенью переохлаждения:

$$\Delta T = T_{пл} - T_k.$$

Поскольку жидкий металл с присущим ему ближним порядком в расположении атомов обладает большей внутренней энергией, чем твердый со структурой дальнего порядка, при кристаллизации выделяется теплота.

При очень медленном охлаждении степень переохлаждения невелика и процесс кристаллизации протекает при температуре, близкой к равновесной (рис. 1.8, кривая v_1).

На кривой охлаждения при температуре кристаллизации отмечается горизонтальная площадка (остановка при падении температуры),

образование которой объясняется выделением скрытой теплоты кристаллизации, несмотря на отвод теплоты при охлаждении.

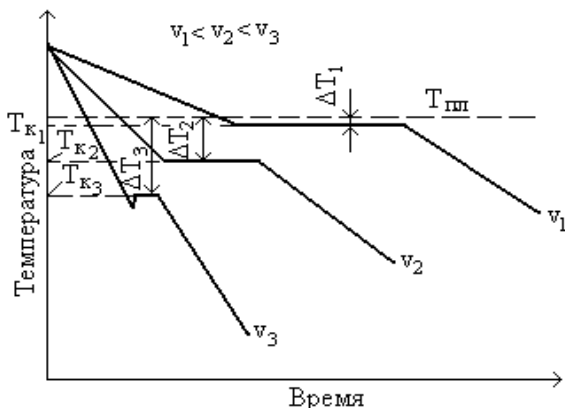


Рис. 1.8. Термические кривые охлаждения при кристаллизации чистых металлов с разной скоростью ($v_1 - v_3$)

С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает (рис. 1.8, кривые v_2, v_3) и процесс кристаллизации протекает при температурах, лежащих ниже равновесной температуры.

Степень переохлаждения зависит от природы и чистоты металла. Чем чище жидкий металл, тем более он склонен к переохлаждению.

При затвердевании очень жидких металлов степень переохлаждения ΔT может быть очень велика. Так, при затвердевании олова была достигнута величина $\Delta T = 118^\circ\text{C}$.

Однако чаще степень переохлаждения не превышает $10...30^\circ\text{C}$.

В жидком состоянии атомы вещества вследствие теплового движения перемещаются беспорядочно. В то же время в жидкости имеются группировки атомов небольшого размера, в пределах которых расположение атомов вещества во многом аналогично их расположению в решетке кристалла.

Эти группировки неустойчивы, они рассасываются и вновь появляются в жидкости.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru