

Министерство образования и науки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Н.Б. Иванов

ТЕОРИЯ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Тексты лекций

Казань
Издательство КНИТУ
2013

УДК 539.37; 620.22

ББК 22.251я7

И20

Иванов Н.Б.

Теория деформируемого твердого тела: тексты лекций. Н.Б. Иванов; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. — Казань: КНИТУ, 2013. — 124 с.

ISBN 978-5-7882-1515-0

В основу учебного пособия положен курс лекций, читаемый автором по учебной дисциплине «Теория деформируемого твердого тела», для студентов по направлению подготовки 240300 «Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий». В пособии рассматриваются физические основы пластичности и прочности, а также разрушения кристаллических материалов при их нагружении. Для оценки деформационного поведения кристаллических материалов привлекаются современные представления об их атомно-молекулярном строении, а также положения теории дислокаций. Изложены принципиальные отличия двух подходов для описания пластической деформации и разрушения: механики сплошной среды и кинетической природы прочности твердых тел.

Кратко изложены сведения об особенностях дефектной структуры и деформационного поведения кристаллов энергонасыщенных материалов (ЭНМ).

Предназначено для студентов, магистров и аспирантов, обучающихся по направлению 150100 «Материаловедение и технология материалов».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. каф. ИИУС КГЭУ

А.Р. Мухутдинов

канд. техн. наук, нач. отдела ФГУП «Гос НИИХП»

Н.Б. Камардин

ISBN 978-5-7882-1515-0

© Иванов Н.Б., 2013

© Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2013

Введение

Вопросы физики пластичности, прочности и разрушения являются базовыми разделами физического материаловедения и физики твердого тела. Знание основ закономерностей поведения твердого тела при деформировании дает возможность будущим специалистам, технологам и конструкторам осознанно подходить к вопросам выбора материалов, методам повышения их прочности, увеличения сроков их эксплуатации. Эти успехи можно отнести к сформировавшейся к 30-40 годам 20 века теории дислокаций. Следует отметить, что теория дислокаций одна из немногих, которая подтверждена экспериментальными результатами на большом количестве различных по природе материалов. Теория дислокаций помогла ученым и специалистам в области материаловедения объяснить резкое отличие теоретически и экспериментально определяемых величин прочности, выявить механизмы пластической деформации и упрочнения материалов, вскрыть причины преждевременного их разрушения, наметить пути повышения как технической, так и конструкционной прочности твердых тел. Поэтому в учебном пособии для оценки деформационного поведения кристаллических материалов привлекаются современные представления об их атомно-молекулярном строении, а также положения теории дислокаций. Наряду с этим изложены принципиальные отличия двух подходов для описания пластической деформации и разрушения: механики сплошной среды и кинетической природы прочности твердых тел.

Рассмотрены некоторые из практических методов упрочнения материалов, основой которых является создание барьеров на пути перемещения дислокаций.

Представлен алгоритм проведения термоактивационного анализа пластической деформации кристаллических тел и установления механизма, контролирующего скорость этого процесса, с использованием результатов экспериментов при испытаниях на ползучесть и длительную прочность.

Приведены основные положения успешно развивающейся в настоящее время волновой теории прочности, разработанной Томской школой механиков под руководством академика В. Панина. Показано, что для более глубокого понимания процессов пластической деформации, упрочнения, разрушения и разработки методов повышения прочности кристаллических материалов необходимо учитывать весь

спектр нано-, микро-, мезо- и макроструктурных особенностей твердых тел.

Кратко изложены сведения об особенностях дефектной структуры и деформационного поведения кристаллов энергонасыщенных материалов.

1. АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Все вещества в природе находятся в одном из трех основных состояний: газообразном, жидком или твердом. Каждое состояние отличается от другого характером движения материальных частиц относительно друг друга.

В газах наблюдается беспорядочное движение атомов, молекул, ионов, притяжением которых можно пренебречь, и считать, что при столкновении такие частицы отталкиваются по закону упругих шаров. Вещества находятся в газообразном состоянии тогда, когда энергия теплового движения частиц превышает энергию их взаимодействия. Такими частицами в газах являются молекулы: достаточно редко одноатомные (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn), чаще двух- и трёх- и многоатомные (N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 , H_2O , CH_4 , C_2H_6 и т.п.).

В жидкости движение частиц значительно замедленное, а энергия теплового движения частиц, образующих вещество, сравнима с энергией их взаимодействия. Этими частицами могут быть молекулы, которые образуют неустойчивые комплексы, непрерывно распадающиеся и вновь образующиеся. Если молекулы полярные, то часть их будет распадаться (диссоциировать) на положительные и отрицательные ионы. В жидкостях в отличие от газов имеет место ближний порядок, т.е. некоторая закономерность в расположении частиц, находящихся в непосредственной близости друг от друга.

В твердом состоянии тела могут находиться либо в кристаллическом, либо в аморфном виде. В кристаллах строящие единицы (атомы, ионы, молекулы) определенным образом ориентированы относительно друг друга, а энергия взаимодействия частиц, образующих вещество, значительно превышает энергию их теплового движения. В результате этого кристалл принимает вполне определенную форму в виде какого-либо многогранника. Причем материальные частицы в кристалле совершают тепловые колебания около положений равновесия. Если температура кристалла далека от температуры его плавления, то частицы в нем никогда не движутся поступательно. В этом заключается резкое отличие кристалла от жидкости.

Чтобы из беспорядочного (жидкого) состояния вещество перешло в упорядоченное (кристаллическое), необходимо некоторое время. Оно носит название времени кристаллизации. Если охлаждение или застывание происходит быстрее, чем время, необходимое для кри-

сталлизации, то образуется аморфное, или стеклообразное тело, в котором частицы остаются неупорядоченными, как в жидкости. Таким образом, несмотря на то, что аморфные тела могут находиться в твердом состоянии, они рассматриваются как очень вязкие жидкости. Поэтому аморфные тела, в отличие от кристаллических, обладают лишь ближним порядком в расположении материальных частиц в пространстве. Таким образом, в кристаллическом теле наблюдается как ближний, так и дальний порядок расположения частиц. Частицы размещаются в пространстве на определенном расстоянии друг от друга в геометрически правильном порядке, образуя кристалл. В кристалле сформирована пространственная кристаллическая решётка. Многократно повторяющимся элементом решётки является элементарная (кристаллографическая) ячейка, вершины которой называют узлами, а расстояние между двумя соседними узлами – периодом или постоянной решётки (рис 1.1). Каждое кристаллическое вещество имеет кристаллы определённой формы, которая отражает их внутреннее строение. Форма кристаллов определяется величиной периодов - a , b , c и осевых углов - α , β , γ . Наиболее часто встречающиеся на практике металлические вещества имеют кубические кристаллические решетки:

- объёмноцентрированную (ОЦК) – калий, натрий, литий, рубидий, цезий и устойчивые при комнатной температуре фазы железа, хрома, молибдена, ванадия и др. Подобную структуру образуют некоторые химические (CH_2O , Pb_2O , Ag_2O , Ag_2S) и интерметаллические (CH_3Al , FeAl) соединения;

- гранецентрированную (ГЦК), для которых периоды $a = b = c$; а углы $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. В такой форме кристаллизуются подавляющее большинство металлов: медь, алюминий, свинец, золото, серебро, платина, высокотемпературные фазы железа, никеля, кобальта.

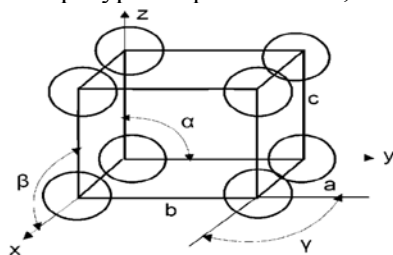
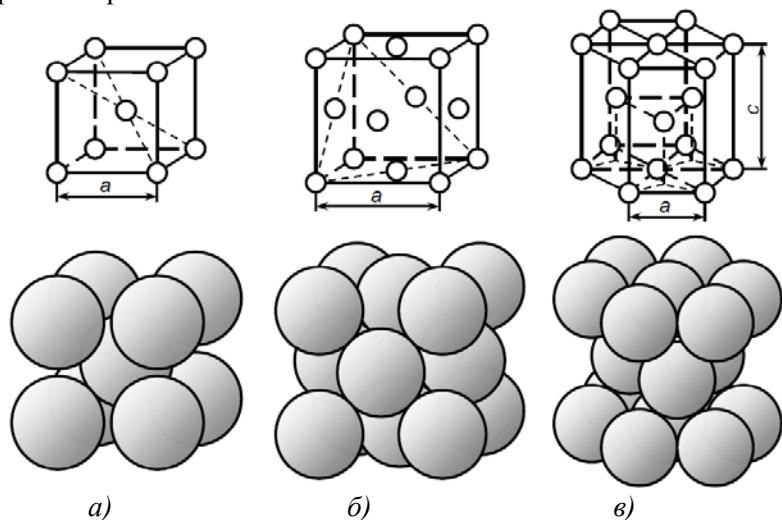


Рисунок 1.1 – Элементарная ячейка кристалла

— гексагонально плотноупакованную (ГПУ) решетку имеют металлы: кадмий, цинк, магний, титан, бериллий и др. В отличие от кубических, имеющих от 4 до 6 наиболее плотноупакованных плоскостей, ГПУ решетки имеют одну базисную плоскость в виде шестигранника рис.1.2



a, c – параметры решетки

Рис 1.2 – Элементарные ячейки решеток ОЦК (а), ГЦК (б) и ГПУ (в)

Твердые тела могут быть в виде монокристаллов и поликристаллов.

Монокристалл – это большой одиночный кристалл, представляющий собой совокупность большого количества одинаково ориентированных элементарных ячеек. Монокристаллы встречаются в природе в виде минералов, а могут быть искусственно выращены в лабораторных условиях из растворов или расплавов.

Однако большинство кристаллических веществ, с которыми имеют дело на практике, являются поликристаллическими. Они состоят из множества мелких кристаллов, не имеющих одинаковой ориентации и правильной геометрической формы. Такие мелкие кристаллы называют кристаллическими зёрнами или кристаллитами. Они малы по своим размерам и в металлах или сплавах их можно увидеть только в микроскоп.

Текстурирование – это некоторая создаваемая искусственно упорядоченность в ориентации кристаллических зёрен, достигаемая

специальной обработкой (например, прокаткой, протяжкой и другими видами механической обработки) поликристаллических материалов (рис. 1.3).

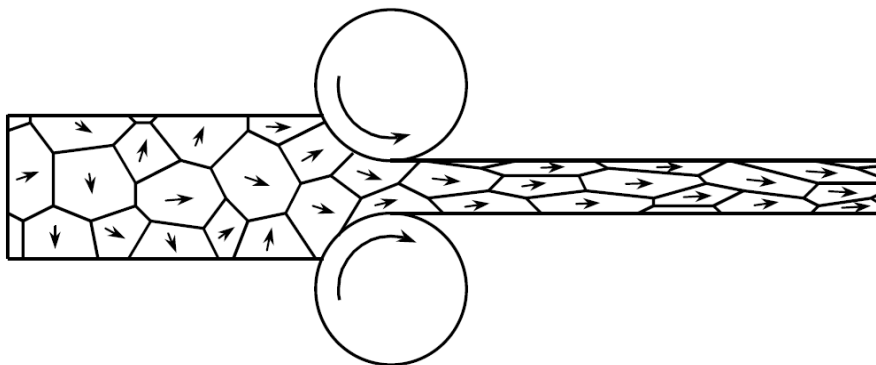


Рис. 1.3– Схема влияния деформации прокаткой на структуру поликристаллического металла: зерна вытягиваются вдоль направления прокатки и возникает текстура.

В зависимости от условий кристаллизации, некоторые вещества могут находиться и в кристаллическом, и в аморфном состоянии. Например, диоксид кремния SiO_2 , монокристаллы которого представляют собой кварц – природный минерал, который имеет правильную кристаллическую структуру, в отличие от аморфного кварцевого стекла, которое состоит из тех же элементов, но соединенных между собой таким образом, что дальний порядок в расположении строящих единиц отсутствует.

Особенно сильно отличаются кристаллические и аморфные тела по своим тепловым свойствам. Кристаллические тела имеют вполне определенную температуру плавления и их диаграммы плавкости имеют горизонтальный участок. Аморфные тела не имеют определенной температуры плавления: при нагревании они постепенно размягчаются, вязкость их уменьшается, и при достаточно высокой температуре они могут вести себя как маловязкие жидкости. Аморфные тела полностью изотропны, то есть свойства аморфных тел (механические, тепловые, электрические и др.) во всех направлениях одинаковы. Кристаллические тела всегда анизотропны, т.е. их свойства в разных направлениях неодинаковы.

1.1 Основные свойства кристаллов

1.1.1 Минимальная внутренняя энергия

При переходе тела из любого состояния (газообразного, жидкого или аморфного) в кристаллическое оно теряет некоторое количество энергии. Теоретические расчеты показывают, что образование кристаллических решеток должно сопровождаться выделением энергии. Отсюда следует, что кристаллам присуща минимальная внутренняя энергия по сравнению с внутренней энергией тех же веществ в других агрегатных состояниях при одинаковых термодинамических условиях.

1.1.2 Статичность кристаллов

В кристаллической решетке частицы связаны друг с другом силами электростатического взаимодействия. Это препятствует самопроизвольному перемещению частиц относительно друг друга, особенно перемещению в массовом порядке, что имеет место в газах и жидкостях. В кристаллических решетках имеет место лишь колебательное движение частиц (их вибрации) вблизи узлов кристаллической решетки, в которых находятся материальные частицы. Существенным отличием кристаллов от жидкостей является то, что в присутствии незанятых частицами узлов пространственной решетки и при наличии перескоков частиц сами узлы сохраняют свое положение, и решетка в целом остается неизменной, что позволяет говорить о статичности кристаллической решетки. Без статичности кристаллы не могли бы обладать формой многогранников и присущими им геометрическими свойствами.

У твердых аморфных тел лишь кажущаяся статичность. Частицы в них непрерывно перемещаются, что приводит к остаточным деформациям даже под действием незначительной внешней нагрузки. Поэтому аморфные тела иногда называют жидкостями с большим внутренним трением.

1.1.3 Однородность и анизотропность кристаллов

Кристаллы являются телами однородными. Однородность кристаллических веществ состоит в том, что два его участка одинаковой

формы и ориентировки одинаковы по своим свойствам. Под анизотропией понимается неодинаковость свойств в зависимости от кристаллографического направления в кристалле. Все без исключения кристаллы анизотропны в отношении скорости роста (способности самоограничаться), а также сил сцепления между строящимися частицами, что особенно наглядно проявляется в способности кристаллов раскалываться по определенным плоскостям, называемых плоскостями спайности.

1.1.4 Способность самоограничаться и регенирироваться

Способность кристаллов самоограничаться, то есть покрываться при свободном росте плоскими гранями и прямыми ребрами является следствием нескольких факторов: закона плоскогранности и различной скорости нарастания граней.

Регенерация кристаллов выражается в их способности восстанавливать в условиях роста форму многогранника любого бесформенного (обточенного, обломанного или частично растворенного) куска кристалла.

1.1.5 Симметрия кристаллов и их внутреннее строение

Симметрия кристаллов есть не что иное, как симметрия их строения. Поскольку строение кристалла выражается пространственной решеткой, а последняя всегда симметрична, то и все кристаллы являются симметричными телами. У многих кристаллов одни и те же грани повторяются, что указывает на то, что у них должны быть одинаковые элементы огранки. Эта повторяемость углов, граней и ребер также обусловлена симметрией основных элементов симметрии: плоскостей, осей и центра симметрии.

Условно кристалл можно представить в виде пространственной решетки, состоящей из бесконечной системы узлов, либо как бесконечную систему параллелепипедов, целиком заполняющих пространство. Решетку кристалла следует также воспринимать как математическую абстракцию, поскольку при помощи такого понятия удобно математически описывать периодичность кристаллической структуры. Из этого следует, что понятие «решетки кристалла» недопустимо путать с понятием «структуры кристалла».

Под структурой понимается конкретное расположение материальных частиц в кристалле, число различных структурных типов бес-

конечно велико. Число же различных типов решеток ограничено и равно 14.

Основное свойство решетки – периодичность - проявляется в том, что любые её два узла можно совместить друг с другом при помощи переноса в каком - либо направлении. Этот перенос называется трансляцией. При таком совмещении все другие узлы решетки совместятся друг с другом, то есть с другими узлами той же решетки и в результате невозможно отличить начальное положение решетки от ее конечного положения.

1.2 Силы связи и основные типы структур кристаллов

1.2.1 Понятие об ионных и атомных радиусах

При изучении структуры кристаллов одной из важнейших характеристик является расстояние между ближайшими строящими частицами кристаллической решетки (атомами или ионами разных знаков).

В связи с этим каждому атому или иону будет соответствовать некоторая сфера действия определенного радиуса, которая называется атомным или ионным радиусом. Последние представляют собой минимальные расстояния, на которые центры сфер одних атомов или ионов приближаются к поверхностям сфер других атомов и ионов.

Для разных химических веществ атомные и ионные радиусы различны. Радиус действия иона отличен от радиуса действия атома у одного и того же элемента. Катион имеет меньший радиус действия, чем действие нейтрального атома. Анион имеет больший радиус действия, чем у нейтрального атома.

В зависимости от радиуса сферы действия, атом может быть окружен различным числом атомов других элементов. Максимальное число атомов, которое может окружать данный атом, называется координационным числом.

Могут быть случаи, когда один атом окружен двумя (CO_2), тремя (NH_3), четырьмя, шестью, восемью и двенадцатью атомами. Чем больше координационное число, тем больше атомный радиус сферы действия данного атома. В кристаллических структурах существует такое координационное число, которое соответствует устойчивому состоянию кристаллической решетки и которому соответствует минимум энергии.

Устойчивость кристаллических структур определяется минимумом их потенциальной энергии, а фактором, понижающим потенциальную энергию, является максимальное сближение строящих единиц с образованием плотнейшей упаковки. Тенденция к плотным упаковкам присуща всем четырем типам структур: металлическим, ионным, атомным, молекулярным, Особенно это характерно металлическим и ионным структурам. так как формы их материальных частиц приближаются к шарам. Исследованиями, проведенными А.А. Китайгородским [1], на органических молекулах, которые относятся к молекулярным кристаллам, показано, что и для них также присущ принцип плотнейшей упаковки, хотя их молекулы далеки от шарообразной формы.

1.2.2 Типы химической связи

Различают четыре типа химических связей:

1. Межмолекулярная или остаточная связь (характерна для благородных газов в твердом состоянии и большинства органических соединений);
2. Ионная связь (характерна для кристаллов солей);
3. Атомная связь или ковалентная (кристаллы алмаза, кремния и других твердых веществ);
4. Металлическая связь (характерна для кристаллов металлов).

Кристаллические структуры, в которых имеется только один тип связи, называются гомодесмическими. Если в одной и той же структуре сочетаются различные типы связи, то такие структуры называются гетеродесмическими.

В зависимости от характера химической связи между строящими единицами в кристаллической решетке различают следующие структуры: молекулярные, ионные, атомные, металлические. Наиболее распространенными в неорганических соединениях являются ионные структуры, в органических – молекулярные.

1.2.3 Молекулярные структуры

В молекулярных кристаллах можно выделить два типа сил: внутримолекулярные силы и силы взаимодействия между молекулами. Силы, возникающие между молекулами, называются остаточными связями или силами Ван-дер-Ваальса. Как правило, эти силы намного