

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Скрипко З. А.

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕМЫ
«ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ МАТЕРИАЛОВ»
В ПЕДАГОГИЧЕСКОМ ВУЗЕ**

Учебно-методическое пособие

Томск 2010

УДК 621.382.8.037. 33
ББК 74.262.23я73
С 45

Печатается по решению
Учебно-методического совета
Томского государственного
педагогического университета

С 45 Скрипко, З. А. Изучение темы «Эффект памяти формы материалов» в педагогическом вузе : учебно-методическое пособие / З. А. Скрипко ; ГОУ ВПО «Томский государственный педагогический университет». – Томск : Изд-во ТГПУ, 2010. – 40 с.

В учебно-методическом пособии излагаются вопросы, связанные с явлением, которое называют эффектом памяти материалов. Не смотря на то, что рассматриваемые вопросы относятся к области нанотехнологий, которые в настоящее время признаны приоритетными, учителя школ, а также некоторые преподаватели вузов исключают вопросы, связанные с памятью формы материалов из своей программы. Это связано с отсутствием методических разработок, касающихся данных вопросов, относительной трудностью рассматриваемого материала. В данном пособии излагаются вопросы, связанные с эффектом памяти формы материалов в определенной методической схеме, которая позволяет понять суть явления. Вопросы о типах и видах деформации твердых тел включены в программу курса общей физики вузов, а также рассматриваются в курсе физики средней школы для классов физико-математического профиля. Учебно-методическое пособие предназначено для студентов физико-математического факультета и других факультетов естественнонаучного направления, для учителей физики средней школы.

ББК 74.262.23 я 73

Рецензент:

профессор кафедры общей физики ТГПУ, *В. М. Зеличенко*.

© Скрипко З. А., 2010
© Томский государственный
педагогический университет, 2010

Содержание

1. Предисловие. Эффект памяти формы.	4
2. Строение твердого тела	6
2.1. Аморфное и кристаллическое состояния твердого тела	6
2.2. Дефекты в кристаллах.	10
3. Упругие и пластические деформации	15
3.1. Упругие деформации	15
3.2. Пластические деформации.	17
4. Упругость, пластичность и эффект памяти формы	18
4.1. Неупругие деформации.	18
4.2. Двойникование.	24
5. Мартенситные превращения	25
5.1. Мартенситные переходы в сплавах	25
5.2. Термоупругие мартенситные превращения	32
6. Применение материалов с эффектом памяти формы	33
7. Заключение.	38
8. Литература	39

1. ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффект памяти формы

Вопросы о типах и видах деформации твердых тел включены в программу курса общей физики вузов, а также рассматриваются в курсе физики средней школы для классов физико-математического профиля.

Однако учителя школ, а также некоторые преподаватели вузов исключают вопросы, связанные с памятью формы из своей программы. Это связано с отсутствием методических разработок, касающихся данных вопросов, относительной трудностью рассматриваемого материала. Но учащимся необходимы знания о наиболее передовых и перспективных технологиях. Кроме того, рассматриваемые вопросы относятся к области нанотехнологий, которые в настоящее время признаны приоритетными. В данном пособии излагаются вопросы, связанные с эффектом памяти формы материалов.

Из металла и сплава можно изготовить изделия различной формы путем горячей обработки – штамповкой, ковкой, волочением и т.п. Для каждого сплава существует некоторая критическая температура, ниже которой материал легко деформируется. Но если деформированное изделие нагреть, оно самостоятельно восстанавливает исходную форму.

Эффект памяти формы – явление возврата к первоначальной форме при нагреве после пластической деформации. Это явление наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации в строго определенном для каждого сплава интервале температур.

Кроме того, после соответствующей обработки сплавы с памятью способны самопроизвольно принимать одну форму при охлаж-

дени и другую при нагреве. Это свойство называется **обратимым эффектом памяти формы**. В определенном интервале температур сплавы с памятью проявляют резиноподобные свойства – **эффект сверхупругости и сверхпластичности**. Сплавы с подобными свойствами широко применяются в технике, науке, медицине.

Эффект памяти формы и сверхэластичности был открыт в 1932 году шведским физиком Арни Оландером (Arne Olander) на примере сплава золота с кадмием. В 50-е годы XX столетия появились первые работы, в которых были представлены исследования эффектов памяти формы и сверхэластичности в сплавах на основе меди и благородных металлов. Однако интерес к этим работам был ограничен весьма узким кругом специалистов-исследователей. Для широкого круга они оставались неизвестными, что было обусловлено дороговизной исследовавшихся материалов и сложностью технологии их выплавки.

В 1949 году Российские ученые Г. В. Курдюмов и Л. Г. Хандрос впервые наблюдали обратимое изменение размеров кристаллов мартенсита, что сопровождалось обратимым изменением формы превращающихся областей. Через 31 год в 1980 году Госкомитет Совмина СССР по делам изобретений принял решение о регистрации этого открытия.

Подлинный «бум» вызвало обнаружение эффекта памяти формы в сплавах никеля и титана эквиатомного состава (TiNi), который позже стали называть никелид титана. Эффект памяти формы металлов связан с особыми видами деформации – мартенситными превращениями. Об этом будет рассказано в данном пособии.

Кроме сплавов на основе Ni-Ti, мартенситные превращения существуют, например, в таких системах, как Pt-Ti, Pt-Ga, Pt-Al.

В зависимости от температуры мартенситного превращения и механических свойств, сплавы, обладающие памятью формы имеют широкий диапазон применения.

2. СТРОЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

2.1. Аморфное и кристаллическое состояния твердого тела

Твердые тела могут существовать в двух различных состояниях, отличающихся своим внутренним строением, что определяет различие их свойств. Это – аморфное и кристаллическое состояния. В последнее время особое значение приобрели, так называемые жидкие кристаллы. Их рационально рассматривать как особую разновидность твердых тел.

В аморфных телах атомы (или ионы) расположены без определенного порядка, поэтому физические свойства такого твердого тела не зависят от направления. Аморфное состояние неустойчиво, по прошествии некоторого времени аморфное вещество может переходить в кристаллическое. Однако для этого, порой, необходимо значительное время.

Наиболее известный пример аморфного состояния – стекло (аморфный сплав силикатов). Аморфными являются канифоль, сахарный леденец, многие смолы и т.д.

Кристаллические тела характеризуются тем, что частицы, составляющие кристаллы, расположены друг относительно друга в некотором определенном порядке. Если частицы, из которых состоят кристаллы – ионы, то кристаллы называются ионными (например, хлористый натрий). Существуют кристаллы, состоящие из незаряженных частиц – атомов или молекул (например, кристаллы алмаза состоят из атомов углерода, кристаллы нафта-

лина – из больших молекулярных групп). Совокупность узлов соответствующих средним положениям частиц, составляющих кристалл, называют **пространственной решеткой**.

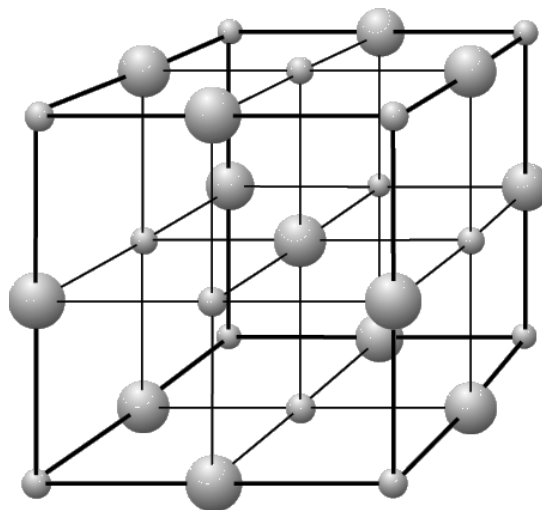


Рис. 1. Расположение узлов в пространственной кристаллической решетке хлористого натрия

Характерной особенностью кристалла, как уже указывалось, является геометрически правильное расположение составляющих его частиц (атомов, молекул, ионов). Кристалл, следовательно, имеет прерывную периодическую структуру. С геометрической точки зрения такое периодически повторяющееся расположение частиц можно осуществить с помощью операции параллельного перемещения, которое называется *трансляцией*.

Расположение атомов (ионов) в кристаллической решетке определяет свойства кристаллов. Причиной перехода атомов к упорядоченному расположению при образовании твердого тела являются силы взаимодействия между ними. В нормальных условиях конфигурация атомов в кристалле и расстояния между ними должны быть такими, чтобы силы притяжения и отталкивания были равны. В таком положении потенциальная энергия атома меньше, чем в любом другом положении.

Одним из следствий упорядоченного расположения атомов является неодинаковость свойств кристалла в различных направлениях – анизотропия.

В кристаллах атомы, или другие частицы, образующие кристаллы (ионы, молекулы), располагаются, как уже отмечалось, в правильном порядке. Одним из важных следствий такого порядка в расположении атомов является неодинаковость свойств кристалла в различных направлениях, которую называют **анизотропией**. При правильном расположении атомов они вдоль различных направлений неизбежно размещаются с различной плотностью. Это видно на рисунке 2, на котором изображена схема расположения атомов в кристалле. Нужно представить себе, что таким же образом атомы расположены и вне плоскости чертежа, образуя пространственную решетку, в узлах которой находятся атомы. Если провести через узлы решетки плоскости в разных направлениях (на нашем рисунке прямые линии), то видно, что густота расположения атомов в этих плоскостях различна.

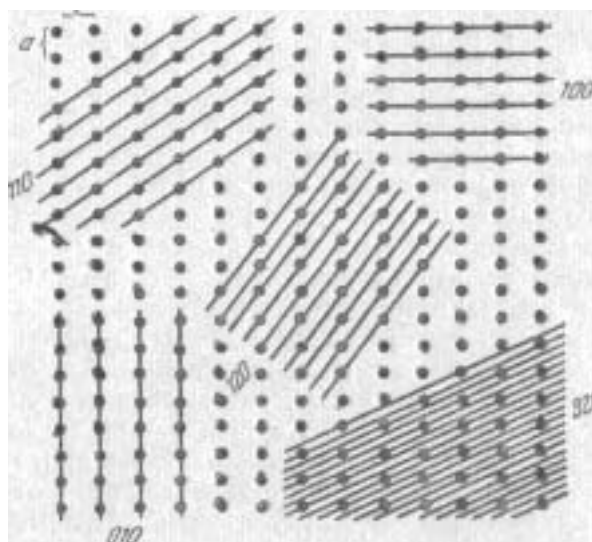


Рис. 2. Схема расположения атомов в кристалле

В кристалле, следовательно, существуют плоскости, различным образом «населенные» атомами. Этим, главным образом,

и объясняется анизотропия кристаллов – наиболее характерное их свойство. Анизотропия проявляется, например, в том, что когда кристалл образуется в таких условиях когда, никакие внешние воздействия не влияют на его рост, он принимает определенную форму с характерным для данного кристалла ограничением. Кристалл оказывается ограниченным плоскими гранями, образующими между собой углы, тоже свойственные только данному виду кристаллов. Грани эти и представляют собой те плоскости, в которых частицы размещены с наибольшей плотностью, так как при росте кристалла именно к этим плоскостям, а не к другим преимущественно присоединяются новые атомы. Разумеется, в наиболее плотно заполненных атомами плоскостях атомы сильнее связаны друг с другом, так как здесь взаимные расстояния между ними относительно меньше. С другой стороны, из рисунка 2 видно, что плотно заполненные плоскости отстоят друг от друга относительно дальше, чем менее густо «заселенные» плоскости. Значит, атомы в плотно заполненных плоскостях прочно связаны друг с другом, но сила взаимодействия между такими плоскостями невелика, и они сравнительно легко отделяются одна от другой. Из-за этого при механическом разрушении кристалла можно наблюдать, что он раскалывается по некоторым определенным плоскостям, так называемым плоскостям *спайности*. Кристалл каменной соли, например, раскалывается на куски, имеющие форму прямоугольных параллелепипедов. Осколки кристалла исландского шпата имеют форму параллелепипедов, но не прямоугольных, слюда и графит расщепляются на тонкие пластинки и т. д. Можно думать, что плоскости излома кристаллов (плоскости спайности) – это как раз те плоскости, которые содержат наибольшее число атомов. Существование плоскостей спайности – одна из характерных

особенностей кристаллов. В тех случаях, когда по условиям роста кристалла на нем не могут образоваться правильные грани и поэтому форма его произвольна, в нем сохраняются все другие особенности кристалла и, в частности, спайность.

2.2. Дефекты в кристаллах

В реальных кристаллах не наблюдается безупречного порядка и строгой периодичности в расположении атомов. Прежде всего, необходимо отметить, что хотя атомы в кристаллической решетке располагаются в таких местах, которые соответствуют их равновесию, это не значит, что они находятся в покое. Атомы в твердом теле так же, как в жидкости и газе, совершают непрерывные тепловые движения, энергия которых определяет температуру тела. Движения эти имеют характер малых колебаний около положения равновесия, которое является узлом решетки. Даже если бы кристалл имел идеально правильное строение, тепловые движения атомов сами по себе нарушали бы строгую периодичность решетки. Ведь в каждый данный момент, некоторая часть атомов находится в положении крайнего отклонения от положения равновесия, другая – в положении, близком к среднему, третья – в каком-то промежуточном положении, и т. д. А так как размах колебаний атомов даже при умеренных температурах может достигать нескольких процентов от межатомного расстояния, то это приводит к заметному нарушению периодичности решетки. С изменением температуры изменяется и степень нарушения периодичности решетки. Такие тепловые нарушения правильности строения решетки существуют всегда, и они являются как бы фоном, на котором разыгрываются все явления в кристаллах. Этим и объясняется то, что практически все свойства кристаллов, так

или иначе, зависят от температуры. Только при абсолютном нуле кристалл был бы свободен от таких нарушений периодичности и был бы вполне упорядочен. Только при абсолютном нуле возможно вполне равновесное состояние, но только в том случае, если в нем нет каких-либо других нарушений структуры или, как принято говорить, **дефектов**.

Дефекты, которые не сводятся к тепловым движениям, хотя обычно именно из-за них и появляются, тоже практически всегда существуют, и мы здесь перечислим некоторые наиболее важные виды дефектов. Все они оказывают весьма существенное влияние на свойства кристаллов.

Первый вид дефектов, называемый дефектами типа Шоттки, заключается в том, что какие-либо узлы решетки, в которых должны находиться атомы, оказываются незанятыми. Естественно, что такие «вакансии» – отсутствие атома в узле решетки, вызывают смещение соседних атомов относительно их нормального положения, и это приводит к значительному нарушению правильности строения решетки в районе вакансии.

Другой тип дефектов, их называют дефектами по Френкелю, возникает в том случае, когда какая-нибудь частица покидает свое место в узле решетки и помещается где-нибудь между узлами (в «междоузлии») в окружении атомов, занимающих свои «законные» места в решетке. В этом случае образуются, следовательно, сразу два дефекта, так как пустой узел и атом в междоузлии в равной мере нарушают правильность решетки. На рис. 3 показана схема обоих только что описанных видов дефектов.

Третий вид дефектов в кристалле заключается в том, что некоторые места в решетке заняты посторонними атомами, образующими небольшую примесь к основному веществу.

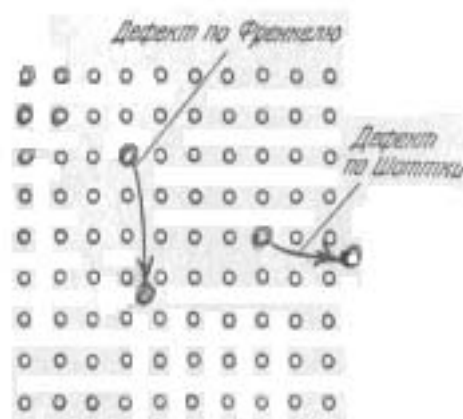


Рис. 3. Дефекты по Шоттки и дефекты по Френкелю

Дефекты этого вида в некоторых случаях оказывают сильнейшее влияние на свойства кристалла. Это особенно относится к полупроводникам, свойства которых в значительной степени определяются именно такими примесными дефектами.

Если кристалл образован веществом, представляющим собой химическое соединение, соответствующее определенной химической формуле, то могут возникнуть дефекты, связанные с тем, что имеется некоторый избыток или недостаток одной из компонент. В этом случае дефекты могут иметь различный характер: избыточные атомы могут, например, разместиться в междоузлиях; они могут вести себя подобно примесным атомам и т. д.

Весьма важным видом дефектов в кристалле являются, так называемые, **дислокации**. Характер этого вида дефектов виден из рис. 4. Дефект заключается в том, что в одной части кристалла (над горизонтальной пунктирной линией на рис. 4.) появляется одной атомной плоскостью больше, чем в другой. «Лишняя» атомная плоскость является, конечно, искажением решетки, причем, как видно из рис. 4. больше всего искажена та часть кристалла, которая непосредственно прилегает к краю дополнительной плоскости. По мере удаления от этого места искажения постепенно сгла-

живаются, так что область сильного нарушения правильности кристалла обычно не превышает нескольких межатомных расстояний. Существует и другой вид, называемый винтовой дислокацией, который мы здесь описывать не будем. Дислокации играют важную роль в кристаллах, особенно в явлениях, связанных с деформацией кристаллов, так как присутствие дислокации приводит к уменьшению их прочности. Образование дислокаций сильно влияет также на процесс роста кристаллов, вообще говоря, облегчает этот рост. Число дислокаций в кристаллах довольно велико, достигает даже в хороших естественных кристаллах значения 10^8 на 1 см^3 .

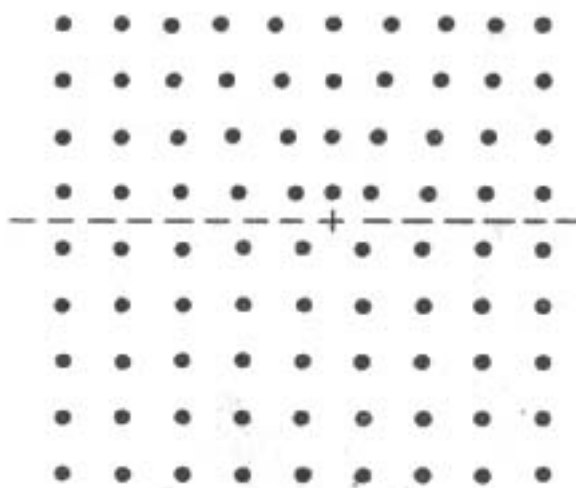


Рис. 4. Дислокации в кристалле

Познакомимся более подробно с дислокациями и их свойствами [5, 6].

Представим кристалл, у которого вдоль некоторой плоскости сделан «надрез» на половину глубины кристалла (рис. 5 и рис. 6.). Пусть теперь часть кристалла, расположенная над надрезом, сжата в направлении, указанном стрелкой, так что крайняя левая атомная плоскость сдвигается на расстояние, равное постоянной

решетки, а нижняя часть (под надрезом) не испытывает сдвига. Линия AD внутри кристалла является краем той части кристалла, которая испытала сдвиг. Область кристалла вдоль этой линии и называется **краевой дислокацией**.

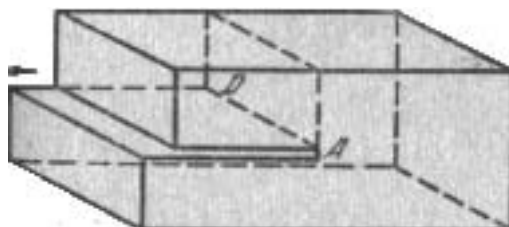


Рис. 5. Краевая дислокация

На рис. 6 представлено расположение атомов в плоскости, перпендикулярной линии AD . Из рисунка видно, что дефект – краевая дислокация заключается в том, что атом C , расположенный непосредственно на линии дислокации, лишен нормального для атомов кристалла окружения соседних атомов.

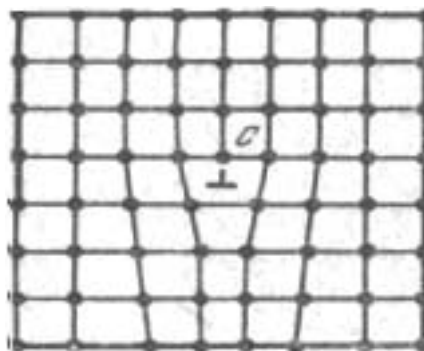


Рис. 6. Дислокация в кристалле

Здесь дислокация изображена как результат мысленных операций «надреза» и сжатия. На самом деле дислокации описанного вида могут появиться в кристалле и сами по себе, как следствие неравномерного движения атомов при скольжении, подобно тому, как неодинаковое движение отдельных частей ковра приводит к образованию на нем складок [5]. Дислокации могут образоваться

и в процессе роста кристалла из расплава. Т.о. можно считать, что дислокации существуют во всяком кристалле, так же как в нем существуют и другие дефекты.

3. УПРУГИЕ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ

Деформация – это способность твердых тел изменять свою форму под действием внешних механических сил. Деформация твердого тела является результатом изменения взаимного расположения частиц, из которых тело состоит под действием внешней силы.

Деформации разделяются на упругие и пластичные.

Деформация твердого тела является результатом изменения под действием внешней силы взаимного расположения частиц, из которых тело состоит, и расстояний между ними.

Деформация называется *упругой*, если она исчезает после прекращения действия вызвавшей ее силы, и *пластической*, если она сохраняется и после прекращения нагрузки. Все твердые тела могут быть деформированы и упруго и пластически, в зависимости от величины приложенных сил. При достаточно малых силах твердые тела деформируются упруго. Очевидно, что в деталях различного рода технических сооружений, машин и т. д., предназначенных для длительной работы, допускаются только упругие деформации.

3.1. Упругие деформации

Изменение взаимного расположения частиц и расстояний между ними вызывает, появление внутренних сил, нарушающих

равновесие, существовавшее до наложения деформирующей силы. Так как при упругой деформации после прекращения действия внешней силы тело восстанавливает свою форму, то внутренние силы, следовательно, направлены против внешней силы и уравновешивают ее. Значит, возникновение деформации не приводит к нарушению равновесия между отдельными частями тела, к появлению ускорений. Такие деформации называются статическими.

Возникновение внутренних сил, восстанавливающих форму тела после снятия нагрузки, и является причиной, так называемых упругих сил, всегда действующих между соприкасающимися и деформирующими друг друга телами.

Соотношение между силами, вызывающими упругую деформацию, и величиной деформации определяется *законом Гука*, который кратко может быть выражен так: деформация пропорциональна деформирующей силе. Для того чтобы этот закон мог быть выражен в количественной форме, необходимо условиться о том, какими величинами характеризуются деформации и вызывающие их силы.

Опыт показывает, что деформация определяется не силой, приложенной к телу, а отношением этой силы к площади поперечного сечения поверхности, к которой эта сила приложена. Эта величина p , равная F/S , где F – сила и S – площадь поверхности, называется *напряжением*. Измеряется она в таких же единицах, как давление. Под словами «деформирующая сила», фигурирующими в законе Гука, понимается напряжение.

Что касается деформации, то она может иметь различный характер в зависимости от того, как приложены силы к телу. Поэтому и описывается она в разных случаях различными величинами. Здесь ограничимся рассмотрением только изотропных тел.

Если обозначить величину, характеризующую деформацию буквой ε (для различных видов деформаций это будут различные величины), то закон Гука может быть записан в виде:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} = const.$$

Константа, равная отношению напряжения к величине деформации, называется *модулем* соответствующего вида упругой деформации (термин этот был введен Юнгом, придавшим закону Гука математическую форму).

Деформации, которые может испытывать твердое тело под действием приложенных напряжений, сводятся к двум основным видам, соответственно тому, что всякая сила, приложенная к поверхности тела, может быть разложена на две составляющие: одну перпендикулярную поверхности и другую – параллельную ей. Первая из них вызывает деформацию, называемую *растяжением* или *сжатием*. Этот вид деформации характеризуется тем, что изменяется объем, но не изменяется форма тела.

Вторая составляющая, параллельная поверхности, создает деформацию *сдвига*. При деформации сдвига изменяется форма тела, но не изменяется его объем.

Если составляющая напряжения, параллельная поверхности, равна нулю, то будет происходить деформация чистого растяжения, или сжатия. Если равна нулю нормальная составляющая напряжения, то деформация будет чистым сдвигом.

3.2. Пластические деформации

Упругая деформация характеризуется своей обратимостью – деформация исчезает вместе с исчезновением деформирующего напряжения. Именно для этой деформации справедлив закон Гука. Если после полного снятия напряжения тело не восстанавливает

первоначальную форму (существует статочная деформация), то такая деформация называется **пластической**.

Максимальное напряжение при котором деформация еще остается упругой, называется *пределом упругости*.

У многих твердых тел при напряжениях, немного больших предела упругости, деформация растет при постоянном значении напряжения – принято говорить, что материал «течет». Это значение напряжения называется *пределом текучести*.

В отличие от упругой деформации, при которой атомы лишь немного смещаются из их положения равновесия, при пластической деформации происходит скольжение одних слоев кристалла относительно других.

4. УПРУГОСТЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ И ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ

4.1. Неупругие деформации

Эффект памяти формы не относится конкретно ни к упругости, ни к пластичности, но одновременно обладает признаками и того, и другого. Сохранение остаточной деформации после действия нагрузки – признак пластичности, а ее полный возврат – признак упругости. Такая деформация называется неупругой. Неупругость материалов (неидеальная упругость) была известна и до эффекта памяти формы. Однако раньше на нее не обращали особого внимания и являлась, скорее, вредным явлением в металлах и сплавах. Незначительная по величине, она сопровождала упругую деформацию и тем самым ухудшала рабочие характеристики упругих элементов различных приборов и устройств.

Поэтому неупругость изучали, прежде всего, с целью ее подавления.

До недавнего времени неупругую деформацию рассматривали как пластическую и считали ее необратимой. Пластическая деформация кристаллов происходит за счет движения дефектов кристаллической решетки – элементарных носителей деформации, в качестве которых выступают точечные дефекты и (или) дислокации. Важно подчеркнуть, что в общем случае расположение дислокаций и (или) точечных дефектов в новые последеформационные позиции после снятия нагрузки могут оказаться стабильными, т. е. не предпочтительнее исходных. Следствием этого является практически полная необратимость неупругой деформации. Наблюдающееся на практике механическое последствие, связанное с некоторым обратным перемещением дефектов после разгрузки, не превышает 10^{-4} – 10^{-3} относительной деформации и им можно пренебречь.

Количественное соотношение **пластической, упругой и неупругой** деформаций зависит от многих параметров сплава, но, прежде всего, от его состава. По способности сплавов к каждому виду деформации можно провести их классификацию. Сплавы пружинного класса характеризуются большой упругой деформацией, хотя даже в лучших из них она не превышает 1%. Существуют пластичные и сверхпластичные сплавы, способные необратимо деформироваться на десятки и сотни процентов. В сплавах этих двух классов неупругая деформация ничтожна и составляет десятые доли процента. Материалы с памятью и некоторые другие способны к неупругой деформации в 10–20% [1].

Практическое значение упругих и пластических свойств очевидно. Упругость позволяет использовать металлы и сплавы как

конструкционные материалы, а запас пластичности обеспечивает возможность изготовления из них различных изделий. Разная способность сплавов к упругой, пластической и неупругой деформациям определяется разной реакцией их кристаллической решетки и дефектов ее строения на изменение внешних и внутренних условий, прежде всего механического напряжения σ и температуры T .

Как отмечалось выше, наиболее характерной особенностью любого кристаллического материала является строгая пространственная периодичность расположения его атомов. Структура кристаллической решетки строго задана для каждого сплава. Механические, электрические, магнитные, оптические и тепловые свойства материала зависят от типа кристаллической решетки: ее формы, размеров, взаимного расположения атомов каждого сорта, составляющих данный сплав. Определенную роль, иногда очень существенную, в обеспечении указанных свойств играют дефекты кристаллического строения – примесные атомы, вакансии, дислокации, а также наличие других фаз. Объектом нашего рассмотрения являются механические свойства, которые в основном связаны с поведением кристаллической решетки при изменении механического напряжения σ и температуры T .

Кристаллическая решетка – достаточно эластичная конфигурация атомов. Первая ее реакция на воздействие внешней нагрузки – выход атомов из равновесных положений. При исчезновении нагрузки атомы возвращаются в исходные положения. Этот процесс полностью обратим и отвечает за упругую деформацию материала. Схематически он представлен на рис. 7а. Величина упругой деформации (ϵ) пропорциональна напряжению (σ) и подчиняется закону Гука:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E},$$

где E – модуль упругости, характеризующий жесткость решетки.

Однако смещения атомов из равновесных положений не беспредельны. В обычных сплавах они не превышают 0,01 (1%) межатомного расстояния. Отсюда и предел упругой деформации в них составляет 1%. Исключение составляют специально выращенные бездефектные материалы. В реальных сплавах даже этот предел, как правило, не достигается. Очень быстро начинается второй процесс. В сплаве появляются и начинают движение структурные дефекты, прежде всего дислокации. Материал начинает «течь» – пластически деформироваться.

Пластическая деформация происходит за счет скольжения или поворота одной части кристалла относительно другой (рис. 7 б). Этот процесс необратим. После разгрузки атомы остаются в новых положениях, а накопленная деформация сохраняется. Вернуть исходную форму образца можно, только деформируя его в противоположном направлении. Но даже тогда восстановить прежнее расположение отдельных атомов невозможно. Это происходит потому, что обратная деформация реализуется в основном не путем попятного движения прежних дислокаций, а в результате зарождения новых. Атомы при такой деформации постоянно меняют своих соседей, но сохраняют конфигурацию прежней кристаллической решетки. Таким образом, дислокационная пластическая деформация по природе своей необратима. Она может достигать десятков, а в сверхпластичном состоянии и сотни процентов. Дальше на месте дислокаций и других дефектов формируются трещины и материал разрушается.

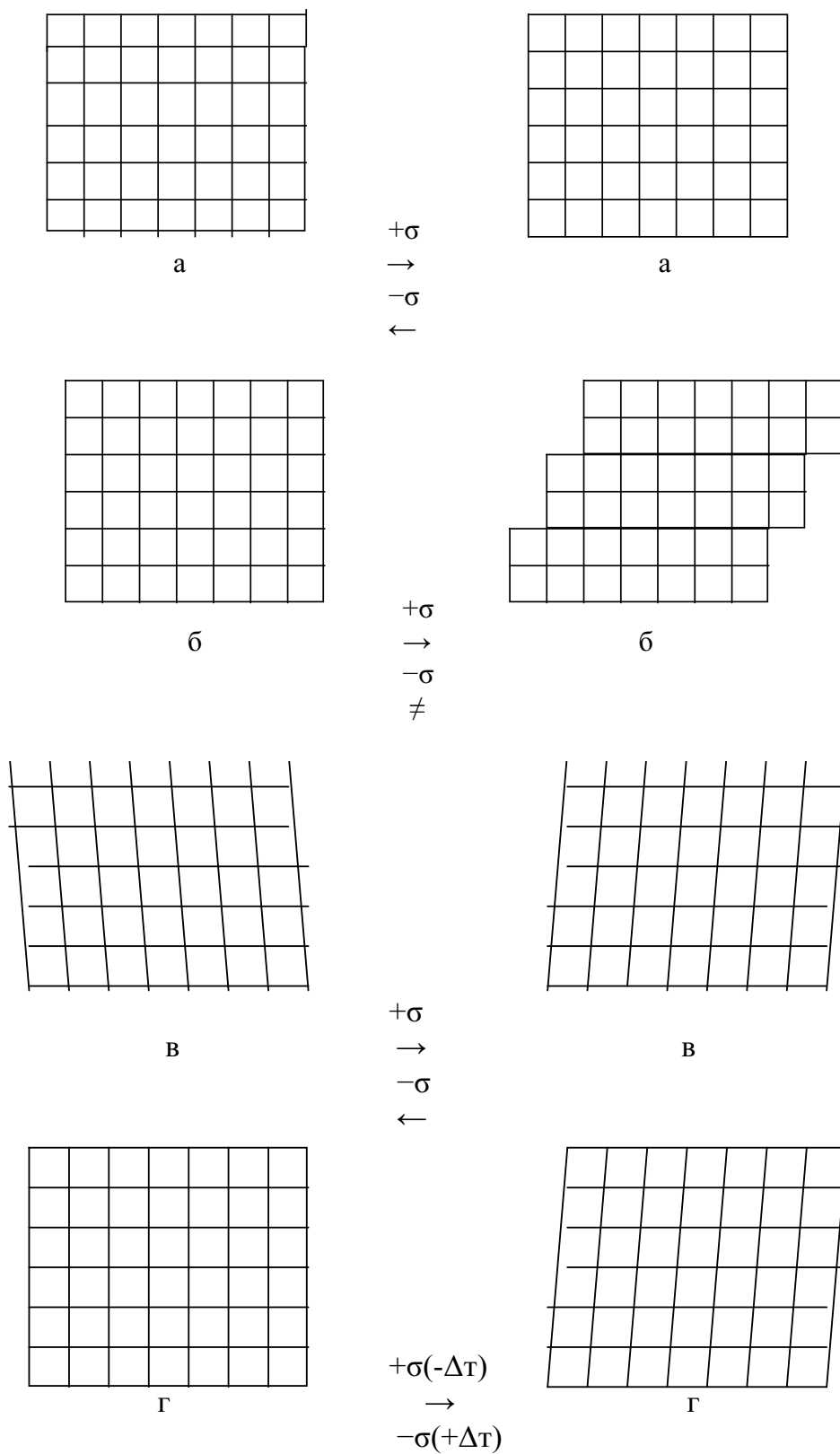


Рис. 7. Поведение кристаллической решетки при упругой (а) и пластической (б) деформациях; при двойниковании (в) и мартенситном превращении (г)

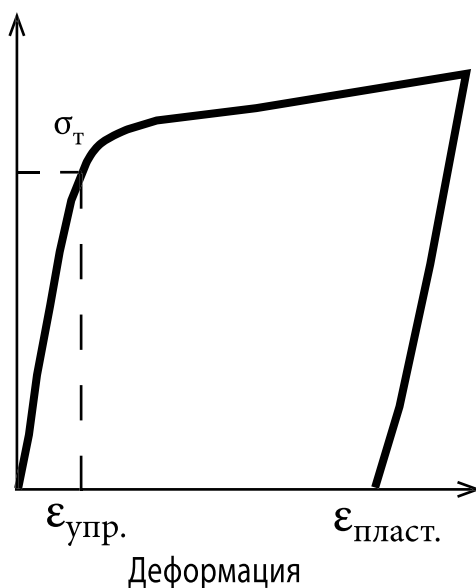


Рис.8. Типичная кривая нагружения металлов и сплавов

Строго говоря, зарождение и движение дислокаций не является полностью необратимым процессом. Под действием внутренних упругих напряжений при разгрузке, а также при последующем нагреве дислокации частично возвращаются к прежнему положению. Такое частичное попятное движение дислокаций обеспечивает небольшой возврат деформации. Правда, в ничтожно малых масштабах – до десятых долей процента.

Ситуация существенно меняется, если деформация обеспечивается движением частичных дислокаций или одиночных сверхдислокаций, которые порождают, соответственно, дефекты упаковки и антифазные границы. В этом случае свободная энергия системы дополнительно увеличивается за счет «химической» составляющей, которая и является термодинамическим стимулом к обратному процессу – возврату дислокации при разгрузке. При этом обратимая деформация может достигать нескольких процентов.

Реализации таких дислокационных реакций, создающих по существу прослойки новой фазы, способствуют структурные

состояния сплава, которые характеризуются сдвиговой неустойчивостью кристаллической решетки. Такие «возбужденные» состояния наблюдаются в твердых растворах вблизи границы растворимости одного из элементов в пересыщенных твердых растворах, в ряде интерметаллических соединений. Для этих состояний характерно также развитие деформации путем *двойникования и мартенситного превращения*. Каждый из этих процессов может обеспечить 10–20%-ную обратимую деформацию материала.

4.2. Двойникование

Двойникование представляет собой как бы промежуточный процесс между пластической деформацией за счет движения обычных (не двойникующих) дислокаций и мартенситным превращением. Однако по особенностям реакции решетки на механическое напряжение и порождаемым следствиям оно ближе к мартенситному переходу. Если пластическая дислокационная деформация происходит за счет скольжения, трансляции одних решеток относительно других, то при двойниковании характер перегруппировки атомов иной. Двойникование реализуется путем кооперативного сдвига всех атомов в определенном направлении (рис. 7 в). Как и при пластической деформации, тип решетки при двойниковании не меняется, но деформация осуществляется без разрыва межатомных связей. Эта существенная особенность двойникования, которая характерна для упругой деформации и для термоупругого мартенситного перехода. Именно благодаря этой особенности процесс двойникования может быть обратим [1].

Неупругое поведение сплавов при двойниковании проявляется в том, что наблюдается аномально большая (по сравнению

с упругой) обратимая деформация при нагружении и разгрузке. Неупругость такого рода имеет чисто механическую природу и обусловлена балансом внешних и внутренних напряжений, поэтому температура не вносит качественных изменений в этот процесс.

В этом плане мартенситные превращения, при которых деформация материала осуществляется со сменой типа кристаллической решетки, значительно разнообразнее. Поэтому остановимся на них более подробно.

5. МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

5.1. Мартенситные переходы в сплавах

Мартенсит – структура кристаллических твердых тел, возникающая в результате сдвигового бездиффузионного полиморфного превращения при охлаждении. Назван по имени немецкого металловеда Мартенса (1850–1914 гг.).

Мартенситные превращения свойственны обширному классу веществ. Для них типичны слабая зависимость температур начала и окончания превращения от скорости изменения температуры, чаще всего обратимый характер превращения, заметное несовпадение (гистерезис) температур прямой и обратной реакции, очень часто сильная зависимость температур перехода от механических напряжений и другие признаки. Высокотемпературную модификацию принято называть аустенитом, а низкотемпературную – мартенситом. Аустенит имеет обычно более высокосимметричную элементарную ячейку, нежели мартенсит, а последний еще обладает и повышенной склонностью к механическому двойникованию.

Мартенситное превращение представляет собой разновидность полиморфного фазового перехода. Мартенситное превращение – полиморфное превращение, при котором изменение взаимного расположения составляющих кристалл атомов происходит путем их упорядоченного перемещения, причем относительные смещения соседних атомов малы по сравнению с межуатомным расстоянием. Перестройка кристаллической решетки в микрочастицах обычно сводится к деформации ее ячейки, и конечная фаза мартенситного превращения – однородно деформированная исходная фаза. Величина деформации мала (~1–10%) и соответственно мал, по сравнению с энергией связи в кристалле, энергетический барьер, препятствующий однородному переходу исходной фазы в конечную. Необходимое условие мартенситного превращения, которое развивается путем образования и роста областей более стабильной фазы в метастабильную, сохранение упорядоченного контакта между фазами.

Полиморфизм – явление, обычное для многих кристаллических материалов. В целом ряде металлов и сплавов при изменении температуры или нагрузки наступает такой момент, когда меняется тип кристаллической решетки. Стимулом к такому превращению является энергетическая выгодность существования новой кристаллической структуры с меньшим значением термодинамического потенциала. Перестройка решетки может осуществляться двумя способами [1].

Первый способ очевиден. При изменении температуры или нагрузки каждый отдельный атом покидает свою позицию в исходной решетке и занимает соответствующее положение в новой. Он может переместиться на расстояния, много большие межатомных, и полностью или частично сменить своих соседей. Если тем-

пература и нагрузка изменяются в обратную сторону, то обратная перестройка произойдет так же: атом за атомом покинут свои новые места и сформируют прежнюю кристаллическую решетку. Совершенно очевидно, что при таком способе перестройки, во-первых, не происходит деформации сплава (изменения его формы), так как путь каждого атома индивидуален и не согласован с другими, во-вторых, атомы не «помнят» своих соседей. Следовательно, они не могут восстановить исходную конфигурацию конкретных атомов, когда закончится обратная перестройка решетки. Такой способ реализуется, если подвижность атомов – диффузия – достаточно высока, чтобы обеспечить отрыв атомов от соседей и перемещение их на большие расстояния. Диффузионный способ перестройки возможен, когда полиморфное превращение происходит при высокой температуре,

А как должна происходить перестройка решетки в тех случаях, когда температура полиморфного превращения низка? Энергетические соображения говорят о том, что решетка должна перестроиться, но диффузия атомов практически отсутствует, так как энергия их тепловых колебаний недостаточна для разрыва межатомных связей. Значит, нужен другой, бездиффузионный способ? Такой способ есть. Он был обнаружен при изучении одного из древнейших процессов термической обработки стали – закалки. В результате закалки при быстром охлаждении образуется фаза с новой кристаллической решеткой – **мартенсит**; соответственно способ перестройки решетки получил название мартенситного превращения. Как потом оказалось, мартенситное превращение – это вообще один из фундаментальных способов перестройки кристаллической решетки. Он характерен не только для сталей, но и для чистых металлов, цветных сплавов, полупроводников,

полимеров – для всех случаев, когда перестройка решетки вынуждена происходить в отсутствие диффузии.

Каковы же особенности перестройки решетки при таком способе превращения? Эти особенности имеют много общего с двойникованием, но «богаче» его. Двойникование обладает лишь некоторыми чертами мартенситного перехода. Это частный случай превращения без смены типа кристаллической решетки.

Поскольку диффузия отсутствует, атомы не могут индивидуально покидать свои места. А должны. Остается одна возможность: не отрываясь друг от друга (не разрушая межатомные связи), атомы перемещаются целыми кооперативами из старых положений в новые. Такое согласованное перемещение носит характер сдвига (рис. 7г). Поэтому мартенситный переход называют иногда сдвиговым. Естественно, расстояния между атомами в новой решетке меняются, но соседство, как и при двойниковании, может сохраняться. Это очень важная особенность и двойникования и мартенситного превращения, которая отличает их от пластической деформации и роднит с упругой [1].

Кооперативный согласованный сдвиг атомов неизбежно приводит к изменению геометрической формы тех областей сплава, которые испытали превращение. Экспериментально это изменение фиксируется по появлению рельефа на предварительно полированной поверхности образца. Изменение формы – это одна из главных особенностей мартенситного перехода. Благодаря ей механическое напряжение может активно влиять на мартенситное превращение. Способствуя изменению формы, нагрузка активизирует процесс превращения. Эффективность этого влияния определяется величиной работы, равной скалярному произведению действующего напряжения на деформацию при переходе.

Таким образом, мартенситное превращение представляет собой одновременно фазовый переход и деформационный процесс.

Нетрудно заметить, что сохранение соседства атомов при мартенситной деформации определяет возможность ее полной обратимости в процессе обратного мартенситного превращения, т. е. деформация формы при мартенситном переходе может быть, как и при двойниковании, полностью обратимой (неупругой). Однако в отличие от двойникования эта деформация эффективно стимулируется не только нагрузкой, но и температурой. По этой причине и неупругое поведение при мартенситных превращениях отличается большим многообразием, чем при двойниковании.

Возврат к исходной форме, т. е. память формы, наблюдается, однако, далеко не при каждом мартенситном переходе. Причин, препятствующих полной структурной обратимости мартенситного превращения, две. Первая состоит в необязательности «попятного» движения атомов при обратном переходе, которое автоматически восстанавливает их исходное расположение и первоначальную форму материала. Направлений кооперативного сдвига, приводящих мартенситную решетку к исходной, в общем случае может быть несколько. Переход кубической решетки в ромбоэдрическую можно получить деформацией куба в четырех различных направлениях, обратный переход – только в одном.

Количество вариантов перестройки зависит от симметрии решеток. Чем ниже симметрия решетки, т. е. чем она сложнее, тем меньше выбор направления ее перестройки в другую, более симметричную. Как правило, симметрия мартенситной решетки более низкая, чем исходной. Исключения составляют сплавы на основе железа, где исходная гранецентрированная кубическая (ГЦК)

и мартенситная объемно-центрированная кубическая (ОЦК) решетки относятся к одной группе симметрии – кубической. По этой причине в данных сплавах существует несколько кристаллографически эквивалентных вариантов как прямой ГЦК→ОЦК, так и обратной ОЦК→ГЦК перестройки.

Таким образом, обратный мартенситный переход идет не путём сокращения и исчезновения имеющихся доменов мартенсита, как при термоупругом превращении, а зарождением и ростом новых центров исходной фазы в объеме мартенситной. Происходит не отступление мартенситных кристаллов, а их поглощение высокотемпературной фазой. В результате первоначальная, до превращения, ориентация и форма областей исходной фазы не восстанавливаются. Очевидна структурная необратимость таких мартенситных переходов и их неспособность обеспечить сплавам память формы даже на микроструктурном уровне.

Однако чаще симметрия мартенсита низка и является подгруппой группы симметрии исходной решетки. Это характерно для мартенситных превращений в сплавах на основе цветных и благородных металлов. При таких переходах существует только один вариант перестройки мартенситной решетки в исходную – обратный прямому. Понятно, что возможность «попятного» движения атомов сохраняется всегда. Тогда первоначальная ориентация и форма всех областей исходной фазы, т. е. ее микроструктура, восстанавливаются автоматически.

Таким образом, единственность пути перестройки мартенситной решетки в исходную является первым необходимым условием полной структурной обратимости мартенситного перехода и, в частности, возврата (памяти) сплава к исходной форме. Это эквивалентно требованию, чтобы группа симметрии мартенсит-

ной решетки была подгруппой группы симметрии исходной структуры. Это первое, но не единственное условие яркого проявления эффекта памяти в сплавах.

Вторая причина, препятствующая структурной обратимости превращения, следующая. При мартенситном переходе существует серьезная аккомодационная проблема совмещения исходной и мартенситной фаз: области, деформированные при превращении, должны совмещаться без нарушения сплошности среды с недеформированной матрицей. Кроме того, на границе между фазами, как правило, не совпадают линейные параметры двух решеток. Деформация формы при мартенситном переходе достигает 10–20%, несоответствие в параметрах решеток – того же порядка. В результате, в окрестности растущего кристалла мартенсита материал сильно деформирован, и возникают большие аккомодационные напряжения. Понятно, что эти внутренние напряжения невозможно полностью удержать в пределах упругой деформации, которая в обычных сплавах не превышает 1%. Достигая критического уровня, внутренние напряжения «разряжаются» вторичной деформацией сплава. Первичной можно считать деформацию решетки при перестройке. От вида вторичной деформации прямо зависит структурная обратимость мартенситного превращения. Вторичная деформация может осуществляться пластическим течением материала. Обычно так она реализуется при мартенситных превращениях в сплавах на основе железа. Такая вторичная деформация необратима. Учитывая, что в сплавах на основе железа и первичная деформация не восстанавливается полностью, становится очевидным невозможность проявления в этих сплавах хорошей памяти формы.

Вторичная деформация не всегда осуществляется пластическим течением. При некоторых мартенситных превращениях она реализуется более «четко» и полностью обратима. Это – термоупругие мартенситные переходы. Обратимость вторичной деформации является вторым и последним необходимым условием полной структурной обратимости мартенситного превращения и, соответственно, полного проявления эффекта памяти формы. При термоупругих переходах, как правило, полностью обратима и первичная деформация, т. е. выполняются оба необходимых условия проявления памяти в сплавах. Поэтому сплавы с термоупругим мартенситным превращением можно отождествлять со сплавами с памятью формы. Учитывая исключительную важность термоупругих переходов в обеспечении сплавам памяти на форму, рассмотрим их отдельно.

5.2. Термоупругие мартенситные превращения

Внешне термоупругость отражает особенность кинетики превращения: обратимое изменение размеров мартенситных кристаллов под действием температуры и (или) нагрузки, т. е. обратимую подвижность границ раздела исходной и мартенситной фаз. Фактически термоупругость означает сохранение когерентности на межфазных границах, ибо только в этом случае они сохраняют высокую подвижность. Межфазная когерентность исключает возникновение необратимых дефектов типа дислокаций при мартенситном переходе. Следовательно, внутренние аккомодационные напряжения не должны превышать предела текучести и, соответственно, вторичная деформация должна быть обратимой: упругой или неупругой, но не пластической. Именно это и происходит при термоупругом мартенситном превращении.

Обратимость вторичной деформации обеспечивается специфическим механизмом ее осуществления. Как и первичная, она реализуется кооперативным сдвигом атомов, но в противоположном направлении. Направления мартенситных сдвигов как бы чередуются с прямого на обратное. В результате такого «само-согласованного» развития термоупругий мартенсит внутренне сдвойникован или содержит периодически расположенные прослойки другой мартенситной фазы.

В реальных условиях проявления эффекта памяти наблюдается не всегда. Сплавы обладают памятью уже при наличии обратимости только первичной или вторичной деформаций. Однако в первом случае память будет неполной, а во втором – материал не будет способен преодолевать большое сопротивление при восстановлении формы, т.е. совершать значительную работу. Память формы окажется «неполноценной», но для практики этого часто бывает достаточно.

6. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Металл, обладающий способностью к возврату деформаций, можно запрограммировать на довольно сложные движения и тем самым на совершение исполнительных функций почти неограниченной степени сложности. Теперь даже появился термин «само-сооружающиеся (трансформируемые) конструкции». Известными примерами служат самораскрывающиеся космические антенны, самовыдвигающиеся телескопические устройства, трансформируемые стержневые несущие конструкции (фермы) и т.п.

Если использовать способность металла к проявлению многократно обратимой памяти формы, то легко сделать трансформируемые конструкции, которые будут совершать саморазвертывание и самосборку, а отдельные исполнительные элементы, например пружины, будут многократно повторять движения самых разнообразных траекторий. Такие элементы аппаратуры применяют, в частности, в системах регулирования температуры, расхода теплоносителя, в устройствах автоматического пожаротушения и т.д. Совмещение блока, содержащего металл со свойствами памяти формы с кинематическими механизмами делает перспективным создание принципиально новой аппаратуры.

Особый интерес связывают со способностью металлов рассматриваемого класса создавать значительные реактивные усилия. Стержень из никелида титана, легированного цирконием, при диаметре 100 мм развивает усилие до тысячи тонн! Такое свойство служит основой при проектировании мощных малогабаритных прессов. Их легко включить в естественный технологический процесс, когда кинетика изменения реактивных усилий синхронизирована с другими операциями. Так, вулканизация резины требует и нагрева, и давления на сырую массу. Не составляет труда создать устройство, которое будет автоматически обеспечивать необходимое давление на стадии нагревания и устранять его на этапе остывания резинотехнического изделия. Другой пример касается проблемы компенсации технологической усадки элементов аппаратуры или изделий в процессе их термической обработки: подобную усадку можно компенсировать за счет восстановления деформаций элементов конструкций, изготовленных из материала с эффектом памяти формы.

Важно подчеркнуть, что для приведения в действие устройств, изготовленных из материалов с эффектом памяти формы, вовсе не требуется значительных разогревов. Чаще всего цель достигается при воздействии горячей воды, солнечной радиации, климатических или суточных перепадов температур, тепла живого организма, действия хладагентов и т.д. Металл способен реагировать даже на разницу температур поверхностных и придонных масс речной воды в средней полосе России. В районах с суровым климатом источниками тепла и холода могут служить перепады температур наружного воздуха и воды. Более того, сейчас стало ясно, что все эффекты мартенситной неупругости могут быть стимулированы и при постоянной температуре за счет изменения всестороннего давления.

Совмещая силовые и деформационные свойства элементов из металла с эффектом памяти формы, удастся проектировать исключительно простые и эффективные исполнительные устройства роботов, разнообразные приводы в конвейерных производствах, усилители перемещений и т.д. Еще одна область применения касается создания плотных и неразъемных соединений: можно скреплять трубы и стержни надетыми на них муфтами из сплавов с памятью формы; производить опрессовку деталей, используя память формы как свойство инструмента; собирать узлы, не поддающиеся этой операции с помощью традиционной технологии. Например, трубы диаметром 20 мм легко скрепляются наружной (стягивающей) или внутренней (распорной) муфтой из никелида титана при ее толщине около 2 мм. Трубы при этом выдерживают внутреннее давление 200 атм и более. Подобным способом удастся скреплять металл с резиной, пластмассой или керамикой.

Разработаны специальные устройства для закрепления разъемов, гнезда для присоединения микросхем без использования процесса пайки. Используют металлы с памятью формы в практике контроля готовой продукции. Одно из необычных устройств может быть связано с реализацией эффекта псевдоупругости. Действительно, изменяя температуру, легко существенно повлиять на характеристики псевдоупругости. Задавая нужную температуру, можно легко изменять эффективную упругость металла и тем самым решать две технически важные задачи: создавать пружинные элементы с регулируемой жесткостью и создавать аккумуляторы упругой энергии с регулируемым удельным запасом. Если принять, что масса среднего свинцового аккумулятора 20 кг, а емкость его 50 ампер-часов, то он будет иметь удельный запас электроэнергии около 0,1 МДж, в то время как сверхупругая пружина того же веса из никелида титана – около 0,02 МДж, то есть всего лишь в пять раз меньше! Учитывая исключительную надежность упругих аккумуляторов энергии, легко себе представить открывающиеся технические горизонты. Экологически чистый автомобиль с двигателем из сплавов с памятью формы уже не следует воспринимать как плод больного воображения. Эта последняя реплика касается и всей проблемы материалов со свойствами памяти формы. Мы здесь имеем прекрасную иллюстрацию того, как новые физические принципы позволяют по-новому решать многие материаловедческие и инженерные задачи.

В медицине эффект памяти формы используется все шире и разнообразнее. Вот некоторые примеры использования данного эффекта.

Медицинское применение

В медицине используется новый класс композиционных материалов «биокерамика–никелид титана». В таких композитах одна составляющая (никелид титана) обладает сверхэластичностью и памятью формы, а другая – сохраняет свойства биокерамики.

В качестве керамической составляющей может выступать фарфор, который широко используется в ортопедической стоматологии и является хрупким материалом. Высокая хрупкость фарфора обусловлена тем, что на границах различных фаз и зерен возникают контактные напряжения, значительно превосходящие уровень средних приложенных напряжений. Релаксация контактных напряжений в керамическом материале возможна, если в зоне этих напряжений происходит диссипация энергии за счет фазового превращения в никелиде титана. Изменение температуры или приложение нагрузки вызывает в никелиде титана мартенситное превращение, что приводит к эффективной релаксации напряжений в матрице при нагружении композиционного материала, позволяя твердой составляющей нести приложенную нагрузку. Известно, что упругое восстановление объема пористых прессовок из порошка сверхупругого никелида титана связано с разрывом межчастичных контактов и определяется прочностью брикета, которая зависит от пористости и величины сил контактного сцепления. Ослабление этих сил путем добавления к порошку никелида титана других компонентов, например мелкодисперсных вольфрама или карбида кремния, значительно повышает упругий эффект, так как прочные одноименные контакты титан–никель заменяются разноименными. Поскольку величина упругого эффекта снижается при уменьшении содержания никелида титана в прессовке, концентрационная зависимость упругого восстановления объема обычно является экстремальной. В композиционном материале «фарфор–никелид титана» компоненты слабо взаимодействуют и после спекания контакты между керамической и металлической составляющей ослаблены.

При нагружении они разрываются в первую очередь и упругое восстановление объема растет. В результате деформация является обратимой и композит проявляет свойства, подобные сверхэластичности. Биосовместимость композиционного материала «стоматологический фарфор–никелид титана» изучалась гистологическим методом, оценивая реакцию тканей у крыс на имплантацию под кожу передней брюшной стенки образцов из композиционного материала и из фарфора. Характер тканевых реакций, их распространенность и особенности клеточных изменений в обоих случаях оказались однозначными. Таким образом, композиционные материалы «биокерамика–никелид титана» являются биосовместимыми.

7. Заключение

Удивительный материал с памятью формы постепенно занимает все большее место в нашей жизни. Уже достаточно трудно представить современную стоматологию без композитных материалов на основе NiTi (те же скобы, которые вставляют детям для выпрямления зубов). Доставленные на орбиту в «свернутом» виде солнечные батареи разворачиваются сами на несколько десятков квадратных метров и т.д. и т.д. Диапазон применения этих материалов увеличивается день ото дня и сулит еще много интересного. Можно с уверенностью сказать, что это материал будущего.

Сибирский Физико-технический институт при Томском государственном университете является одним из мировых лидеров в области физики металлов с памятью формы. Одними из основных направлений работ сибирских физиков стали прикладные разработки материалов и сплавов в интересах медицины. В результате были созданы НИИ медицинских материалов и имплантатов с памятью формы, а также Международная Академия материалов и имплантатов с памятью формы.

8. Литература

1. Хачин, В. Н. Память формы / В. Н. Хачин. – М. : Знание. – 1984. – 63 с.
2. Лихачев, В. А. Эффект памяти формы / В. А. Лихачев, С. Л. Кузьмин, З. П. Каменцева. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1987. – 218 с.
3. Гюнтер, Э. В. Эффекты памяти формы и их применение в медицине / Э. В. Гюнтер. – Новосибирск : Наука, 1992. – 741 с.
4. Ооцука, К. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцуока, К. Симидзу, Ю. Судзуки ; пер. с яп. – М. : Metallurgia, 1990. – 224 с.
5. Кикоин, И. К. Молекулярная физика / И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. – М. : Наука, 1983. – 498 с.
6. Киттель, Ч. Элементарная физика твердого тела / Ч. Киттель. – М. : Наука, 1985. – 366 с.

Учебное издание

Зоя Алексеевна Скрипко

**Изучение темы «Эффект памяти формы материалов»
в педагогическом вузе**

*Технический редактор: Г. В. Белозёрова
Ответственный за выпуск: Л. В. Домбраускайте*

Печать: трафаретная
Бумага: офсетная
Усл. печ. л.: 2.32
Уч. изд. л.: 1.36

Сдано в печать: 30.09.2010
Формат: 60×84/16
Заказ: 925/у
Тираж: 100 экз.

Издательство Томского государственного педагогического университета
634061, г. Томск, ул. Киевская, 60
Отпечатано в типографии Издательства ТГПУ,
г. Томск, ул. Герцена, 49. Тел. (3822) 52-12-93
e-mail: tipograf@tspu.edu.ru