

SHAPE MEMORY EFFECT

V. A. LIKHACHEV

It is demonstrated that the crystal structure arrangement at phase transition may be accompanied by an unusual mechanical behaviour of the crystal-line bodies, particularly by their shape recovery with variations in temperature. The nature of the recoverable unelastic strain is discussed and the striking examples of practical use of shape memory materials are presented.

Показано, что перестройка кристаллической структуры при фазовом превращении может сопровождаться необычным механическим поведением кристаллических объектов, в частности восстановлением формы тела при изменении температуры. Анализируется физическая природа обратимой неупругой деформации, рассказывается об удивительных возможностях практического использования материалов с памятью формы.

© Лихачев В.А., 1997

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ

В. А. ЛИХАЧЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет

Пластичность металлов известна на протяжении тысячелетий. В подавляющем большинстве случаев она осуществляется сдвигом, когда одна часть кристалла проскальзывает по отношению к другой по соприкасающимся атомным плоскостям кристаллической решетки. Известно также, что при таком скольжении вектор сдвига оказывается обязательно кратным межатомному расстоянию в направлении сдвига. Ввиду сказанного взаимное расположение атомов в любом месте кристалла до и после сдвига оказывается одинаковым. Это означает, что сдвиг не порождает стимулов для восстановления приобретенной кристаллом деформации, то есть пластическая деформация должна быть необратимой.

Схематически процесс пластической деформации иллюстрируется на рис. 1, где по одной из плоскостей скольжения AA произошел сдвиг на величину a . Он кратен межатомному расстоянию d и, конечно, может во сколько угодно раз быть больше, чем d . На рисунке видно, что сдвиги по другим плоскостям скольжения, параллельным AA , могут быть разными и происходить по плоскостям, как угодно удаленным от AA . Понятно, что после совершения подобного процесса относительное расположение атомов ближайшего окружения воспроизводится.

Для описания устройства кристаллической решетки достаточно указать расположение атомов в элементарной ячейке кристалла, которую выбирают таким образом, чтобы плотно приставленными друг к другу ячейками можно было заполнить все пространство, получив при этом картину укладки атомов в кристалле. У меди, например, элементарная ячейка представляет собой куб, в вершинах и

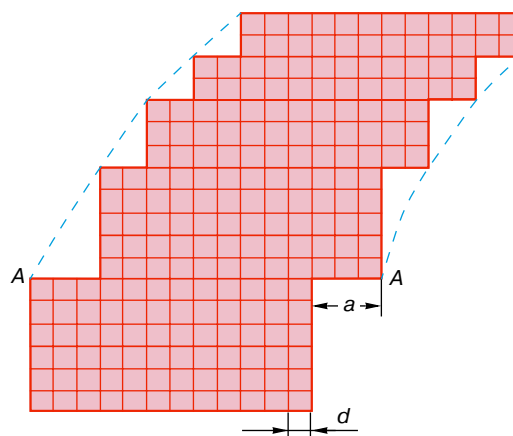


Рис. 1. Схема реализации пластического сдвига

центрах граней которого помещены атомы (гранцентрированная кубическая решетка). У вольфрама это куб с атомами в вершинах и одним атомом в центре куба (объемно-центрированная кубическая решетка). При пластическом сдвиге элементарная ячейка не искажается, смещаясь как целое, а значит, и симметрия кристалла не изменяется. Продукт сдвига становится неотличимым от исходного, и как следствие после удаления нагрузки накопленная деформация сохраняется, что демонстрируется с помощью диаграммы растяжения меди на рис. 2. Здесь на этапе нагрузки (кривая OA) возникла деформация более 40%, основная часть которой сохраняется и после удаления напряжений (отрезок OB).

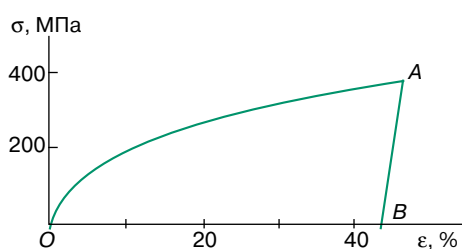


Рис. 2. Диаграмма растяжения меди: σ – напряжение, ϵ – относительная деформация

Кроме пластического деформирования может реализовываться упругое, отличающееся способностью возвращать деформацию при удалении вызвавших ее усилий. Природа упругости хорошо известна: под нагрузкой атомы испытывают некоторые взаимные смещения (например, удаляются друг от друга при растяжении), обычно в пределах не более 0,1% расстояния между ними. В результате при удалении внешней силы позиции атомов становятся неэквивалентны исходным, и деформация непременно восстанавливается по мере разгрузки кристалла.

Представления об упругости и пластичности настолько укоренились в сознании людей, что еще в середине нашего столетия любая идея о возможности существования каких-либо качественно иных масштабных деформационных проявлений даже не обсуждалась. Исключением служил лишь единственный из известных фактов – механическое двойникование, то есть переориентация кристалла. Механическое двойникование как механизм неупругой деформации в принципе родственно скольжению, хотя и с некоторыми ограничениями.

На рис. 3 показано, как можно представить процесс механического двойникования. В исходной решетке, имеющей характерное расстояние между соседними атомами d , по плоскости скольжения aa (ее называют плоскостью двойникования) осуществляется сдвиг вправо на вектор s в каждом слое кристалла, так что в n -м слое сдвиг равен ns . Это приводит к зеркальному отображению верхней части кристалла относительно нижней, а в макроскопическом отношении – к изменению формы кри-

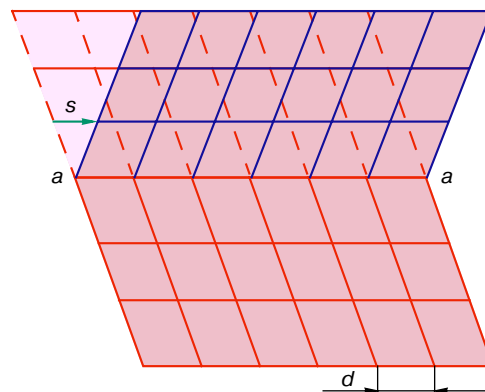


Рис. 3. Схема реализации механического двойникования

сталла. Следует подчеркнуть, что величина сдвига в случае двойникования строго фиксирована (она равна ns), а возникшая конфигурация атомов тождественна исходной, но повернута в пространстве. Здесь опять не видно причин для самопроизвольного восстановления деформации при удалении силы, вызвавшей сдвиг, но такая причина может возникнуть, если двойникование происходит внутри среды: в ней из-за стесненности деформации будут генерироваться напряжения, стремящиеся вернуть кристаллу исходную форму. И действительно, обнаруживается, что иногда образовавшиеся двойники самопроизвольно исчезают посредством раздвойникования, то есть сдвигами в обратном направлении. Раздвойникование сопровождается, конечно, и восстановлением приобретенной деформации, притом уже на этапе разгрузки. Поскольку деформации, обусловленные двойникованием, нередко достигают гигантских значений – в рекордных случаях около 30%, – то двойникоующиеся кристаллы способны демонстрировать упругость, почти подобную упругости резины. Ее часто называют двойниковой сверхупругостью или двойниковой псевдоупругостью. Двойникованием, например, может деформироваться кальцит.

Какие же еще существуют способы массопереноса, вызывающие деформацию кристаллов? Их довольно много. Так, в ферромагнетиках (например, в железе, никеле и кобальте) и антиферромагнетиках (например, в сплавах марганец–медь) обратимые деформации решетки легко инициировать, упорядочивая спины электронов. При параллельном расположении спинов, как в ферромагнетиках, получается сильное общее намагничивание, а при антипараллельном – пространственное упорядочение с возникновением антиферромагнетизма. В обоих случаях ориентационное упорядочение–разупорядочение спинов электронов, как правило, сопровождается деформациями кристалла. Такие деформации инициируются тремя факторами: температурным, магнитным и механическим. Известно, что нагрев ферромагнетика выше некоторой температуры,

называемой температурой Кюри, ликвидирует ферромагнитное состояние, а охлаждение вновь восстанавливает его. Точно так же антиферромагнетизм существует только ниже соответствующей температуры (температуры Нееля), а выше ее антиферромагнетизма нет. Переход от низкой к высокой температуре и наоборот кроме деформации теплового расширения или сжатия вблизи температур Кюри или Нееля вызывает дополнительные деформации. Если ферромагнетик или антиферромагнетик имеет доменное строение, когда внутри некоторой области (домена) кристалла все спины электронов располагаются параллельно, но ориентация спинов в разных доменах неодинакова, магнитное поле или механические напряжения индуцируют поворот спинов электронов у всех или части доменов в некотором преимущественном направлении. Это неизбежно вызывает макроскопическое деформирование. Подобный эффект у ферромагнетиков легче инициировать, помещая их во внешнее магнитное поле, а у антиферромагнетиков — нагружая их механическими напряжениями.

Другой известный пример деформирования кристаллической решетки через возбуждение электронно-атомной подсистемы относится к сегнетоэлектрикам и антисегнетоэлектрикам. В таких веществах имеет место спонтанная поляризация доменов с одинаковой ориентацией электрических моментов (как в сегнетоэлектриках) или образованием одинаковых полярных подъячеек с антипараллельной ориентацией электрических моментов (как в антисегнетоэлектриках). Существование подобных состояний только ниже определенной температуры, также называемой температурой Кюри, и возможность воздействия на них электрическим и механическим полями делает подобные кристаллы похожими по механическому (деформационному) поведению на магнетики.

Ограничиваясь приведенными примерами, подчеркнем, что магнитные и электрические переходы можно рассматривать как структурные фазовые превращения. Так, в случае антиферромагнетизма медно-марганцевых сплавов выше температуры Нееля кристаллическая решетка является кубической гранцентрированной, в то время как ниже этой температуры — тетрагональной гранцентрированной (хотя точного совпадения температур Нееля и решеточной трансформации нет). У дигидрофосфата калия высокотемпературная модификация имеет решетку тетрагональную, а ниже точки Кюри, когда возникает сегнетоэлектрическая фаза, — ромбическую.

Таким образом, кроме пластической деформации и механического двойникования имеются другие варианты реализации деформаций неупругого характера, связанные прежде всего с изменением кристаллической структуры твердого тела при фазовом превращении. Характерной особенностью такой деформации обычно оказывается ее полная обратимость, то есть деформация возникает при

прямо и исчезает при обратном фазовом переходе, подобно тепловому расширению—сжатию. Причем неупругая деформация, обусловленная фазовыми переходами, свойственна не только магнетикам и сегнетоэлектрикам. Сейчас известны сотни веществ, изменяющих свою кристаллическую структуру при так называемых обратимых мартенситных превращениях (по имени немецкого металловеда А. Мартенса). В процессе мартенситных превращений атомы не мигрируют далеко по кристаллу, а перемещаются на расстояния, не превышающие межатомные. При этом смещения атомов в новые позиции происходят скоординированно в большом ансамбле частиц и сопровождаются деформационными явлениями.

Простейшим примером служит превращение в церии, когда одна из его модификаций с кубической симметрией при изменении температуры переходит в аналогичную, но с другим параметром элементарной ячейки. Подобное фазовое превращение, происходящее без диффузионного перемещения атомов и не вызывающее изменения кристаллической симметрии, называется изоморфным. Оно сопровождается лишь заметным скачком плотности. Изменение температуры в обратную сторону инициирует обратное превращение.

У кобальта обратимая фазовая реакция сводится к преобразованию гранцентрированной кубической решетки (устойчивой при высоких температурах) в гексагональную плотноупакованную (устойчивую при низких температурах), элементарная ячейка которой представляет собой шестигранную призму. Это мартенситное превращение полностью обратимо, а его механизм заключается в том, что происходит сдвиг на постоянный вектор в каждой второй плоскости (рис. 4), вследствие чего суммарная величина сдвига оказывается равной $ns/2$, а не ns , как на рис. 3. Кроме того, что чрезвычайно важно, продукт сдвига имеет совершенно иное кристаллическое строение, нежели кристалл, из которого он возник (выше плоскости aa вещество устроено не так, как ниже этой плоскости!). Следовательно, образовавшаяся новая фаза, вообще говоря, должна иметь и иную энергию. Если начальная энергия меньше, то возникает и стимул для возврата в исходное состояние.

Легко видеть, что механизм мартенситного превращения почти тождествен механическому двойникованию и отличается только тем, что двойникование сводилось к сдвигам в каждой соседней плоскости, а мартенситный переход — с чередованием через одну. У кобальта параметры решеток таковы, что плотность до и после реакции практически одинакова, так что фазовое превращение в кобальте можно рассматривать как способ деформирования кристалла чистым сдвигом (в отличие от церия, где при превращении изменяется удельный объем, а сдвиговая деформация отсутствует).

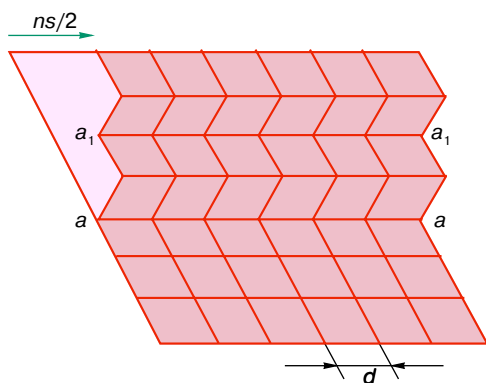


Рис. 4. Схема перестройки кристаллической решетки при мартенситном превращении

Многочисленные примеры убеждают, что мартенситные превращения, как правило, сопровождаются и сдвигами, и изменениями объема. Они чаще всего реализуются по гораздо более сложным схемам, нежели только что рассмотренные. Так, у сплава титан–никель с равным числом тех и других атомов элементарная ячейка высокотемпературной модификации представляет собой куб, в вершинах которого расположены атомы титана, а в центре — никеля. В процессе охлаждения кубическая решетка преобразуется (в зависимости от конкретных условий) либо в ромбоэдрическую, либо в орторомбическую, то есть в решетку, элементарная ячейка которой представляет деформированный куб с равными ребрами, но всеми углами, отличными от прямого, либо прямоугольный параллелепипед с тремя неравными ребрами. При этом меняются параметры элементарной ячейки, углы между кристаллографическими направлениями и плотность. У титана имеет место превращение объемно-центрированной кубической решетки в гексагональную, а у сплавов медь–алюминий–никель наблюдают либо близкий по структуре переход, либо превращение гранецентрированной кубической решетки в различные многослойные длиннопериодные структуры. Отметим еще, что мартенситные превращения часто сопровождаются и перетасовочными смещениями атомов, когда одни из них сдвигаются в каком-то направлении, а соседние — в ином, например противоположном.

Таким образом, традиционные взгляды на пластичность как на сдвиговые перестроения ансамблей атомов совершенно недостаточны; мы видим, что в равной мере есть и другие возможности. Особо подчеркнем, что если обычная пластичность не сопровождается возникновением стимулов, способствующих возврату сообщенной кристаллу деформации, то в остальных рассмотренных случаях этот стимул присутствует. При двойниковании он вызывается механическими причинами, а именно стремлением кристалла уменьшить упругую энергию, возникшую в силу стесненности образования двойника.

При фазовых превращениях энергия образующихся фаз всегда зависит от температуры, механических напряжений, электрических и магнитных полей и т.д. Отсюда видно, что у механизмов неупругости, альтернативных обычной пластичности, появляется новое качество — стремление при определенных обстоятельствах вернуть приобретенную кристаллом деформацию за счет обратного фазового перехода или раздвойникования.

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. Температуры мартенситных превращений сильно зависят от химического состава сплавов, их термической и механической обработки. Так, в случае разноатомного никелида титана характеристические температуры лежат в пределах 30–80°C, редко выходя за этот интервал. Однако добавка всего лишь 3% железа снижает их примерно на 150–200°C, то есть до –170 ... –70°C. В то же время легирование золотом, палладием или платиной значительно повышает температуры превращений — в последнем случае до 800°C и более. Механическое напряжение около 500 МПа повышает температуру превращений в сплавах титан–никель и медь–алюминий–никель примерно на 100°C, но у сплавов медь–марганец это увеличение не превышает нескольких градусов. Сказанное означает, что условия превращения могут быть изменены в необходимых пределах за счет вариации термомеханических или химических факторов.

Какова же реальная кинетика мартенситных превращений? Рассмотрим в этой связи зависимость относительного количества мартенсита Φ от температуры T на рис. 5. Видно, что если металл охлаждать из аустенитного состояния, то вначале каких-либо фазовых преобразований не происходит. Однако, начиная с некоторой характеристической температуры, которую принято обозначать M_H , появляются первые кристаллы мартенсита. По мере дальнейшего охлаждения их размеры и количество увеличиваются, пока кристаллы не заполнят при температуре M_K весь объем. Последующий нагрев вызывает, начиная с температуры A_H , зарождение и рост кристаллов аустенита, которые заполняют весь объем при температуре выше A_K . Обычно $M_H - M_K \approx A_K - A_H$, и эти разности близки к 10–60°C. Ширина гистерезиса $A_H - M_K \approx A_K - M_H$ колеблется в

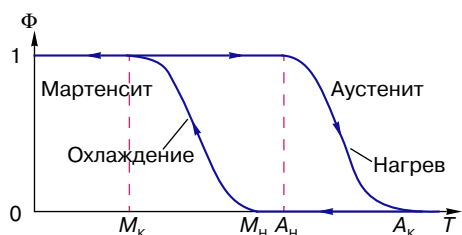


Рис. 5. Зависимость относительного количества мартенсита от температуры

значительных пределах — от нескольких градусов до десятков, а иногда и до сотни градусов.

Как уже было сказано, возникновение каждого кристаллика новой фазы сопровождается сдвиговой деформацией превращенной микрообласти. В то же время микродеформации в разных кристаллах различны в смысле ориентации направления сдвига и плоскости сдвига. Поясним это на примере упомянувшегося превращения в кобальте. В гранцентрированной кубической решетке существуют четыре непараллельные друг другу плоскости плотнейшей упаковки атомов, различающиеся только ориентацией в пространстве, но неотличимые по расположению атомов. В каждой из этих плоскостей имеются три направления сдвига, переводящие кубическую гранцентрированную решетку в гексагональную. Таким образом, при превращении в кобальте может реализоваться 12 вариантов сдвиговой деформации, которая приводит к появлению кристаллографически совершенно идентичных кристаллов новой фазы. Вполне естественно, что в силу статистического характера зарождения и роста кристаллов мартенсита и аустенита вероятность реализации разных вариантов сдвига одинакова.

В результате микродеформации решетки взаимно компенсируются, так что макроскопической деформации не наблюдается (за исключением объемного эффекта превращения). Однако если охлаждение производят под нагрузкой (напряжением), то имеет место избирательное зарождение кристаллов мартенсита, когда преимущество получают те из них, которые способствуют деформированию в направлении приложенного усилия. При этом тело приобретает макроскопическую деформацию, связанную с мартенситной неупругостью. Ее накопление (рис. 6) начинается при температуре, близкой к M_H , а заканчивается при температуре, приближающейся к M_K . Максимальная зафиксированная в опыте величина этой деформации составляет ~30% удлинения (у монокристаллов сплава цинк–медь), хотя она может быть и незначительной (около 2% у сплавов медь–марганец или железо–марганец). Такой эффект принято называть эффектом пластичности превращения. Он наблюдается у огромного числа сплавов.

Важно отметить, что деформацию, равную описанной выше, можно сообщить сплаву, прикладывая к мартенситу механическое напряжение. Деформа-

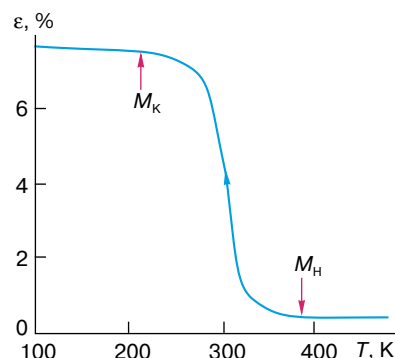


Рис. 6. Кривая накопления деформации ϵ при охлаждении никелида титана при постоянном растягивающем напряжении 100 МПа

ция тогда осуществляется за счет пространственной переориентации уже образовавшегося мартенсита и нередко дополнительно посредством его механического двойникования, а иногда и по более сложному механизму. Конечное состояние кристалла оказывается при этом почти эквивалентным достигнутому вследствие пластичности прямого превращения. Пример накопления такой деформации для никелида титана показан на рис. 7.

Интересно, что как реализация эффекта пластичности превращения, так и деформирование мартенсита не требуют значительных усилий. Напряжения, вызывающие мартенситную неупругость, могут быть во много раз ниже обычного предела текучести. В сплавах же на основе меди нормальное пластическое течение, как правило, не имеет места вплоть до напряжений, близких к пределу прочности, в то время как мартенситная неупругость реализуется легко.

Как уже отмечалось, нагрев приводит к обратному превращению мартенсит \rightarrow аустенит, при котором восстанавливаются кристаллические структуры и соответствующие микродеформации. Восстановление их с неизбежностью приводит к полному восстановлению и макродеформаций. Воспрепятствовать возврату не удастся даже приложением нагрузок обратного знака, близких к разрушающим (ими можно лишь инициировать обычную пластическую

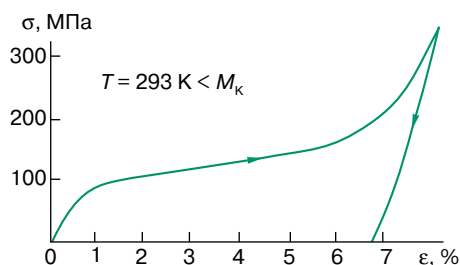


Рис. 7. Кривая растяжения никелида титана при температуре, где устойчиво мартенситное состояние

деформацию). Явление возврата неупругих деформаций называют теперь эффектом памяти формы.

Если металл приобретает неупругую деформацию за счет изотермического нагружения мартенсита или пластичности превращения, то он возвращает ее при нагреве в интервале температур от A_H до A_K . Что же будет, если нагруженный материал циклически нагревают и охлаждают от M_K до A_K ? Совершенно ясно, что он станет неограниченное число раз накапливать деформацию в такте охлаждения и возвращать ее в такте нагрева, пока не разрушится. Это явление называют эффектом многократно обратной (двусторонней) памяти формы (рис. 8). Опыт показывает, что данное явление имеет место не только при наличии нагрузки, но и без нее.

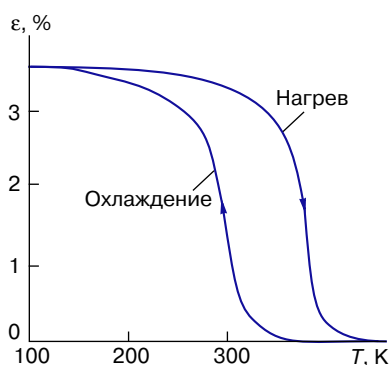


Рис. 8. Диаграмма, иллюстрирующая эффект двусторонней памяти формы в никелиде титана

Сказанным специфические свойства мартенситной неупругости не исчерпываются. Было отмечено, что механические напряжения инициируют перестройку кристаллической решетки, то есть действуют аналогично температурному фактору. Допустим, что к кристаллу, который находится в аустенитном состоянии при температуре деформирования T_d , начали прикладывать внешнее напряжение. Тогда температура M_H (в соответствии с известным термодинамическим уравнением Клаузиуса–Клапейрона) будет повышаться подобно тому, как растет температура кипения воды под давлением. При каком-то значении напряжения она достигнет значения T_d или превзойдет данный уровень. Это будет означать, что начнется реакция аустенит \rightarrow мартенсит, которая приведет к образованию мартенсита, введенного механическими напряжениями. Иными словами, кристалл испытает деформацию по каналу мартенситной неупругости. Если теперь удалить нагрузку, то характеристические температуры (M_H , M_K , A_H , A_K) вернутся к первоначальному значению. И тут возможны следующие нетривиальные последствия: когда $T_d > A_K$, возникший мартенсит станет термодинамически абсолютно неустойчивым. Значит, он с неизбежностью превратится во время снятия нагрузки в аустенит, а приобретенная деформация полностью вернется (рис. 9).

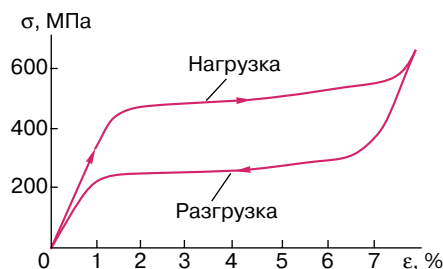


Рис. 9. Диаграмма, иллюстрирующая эффект сверхупругости в никелиде титана при его деформации в состоянии устойчивого аустенита

Если $A_H < T_d < A_K$, то сверхупругий возврат деформации будет неполным, а завершится он при последующем нагреве в интервале от T_d до A_K , то есть материал продемонстрирует частично эффект сверхупругости, а частично эффект памяти формы. Естественно, что физика этих процессов полностью эквивалентна и эффект памяти формы выступает как нереализованная (заторможенная) сверхупругость. Наконец, когда $T_d < A_H$, введенный мартенсит является стабильным и разгрузка не сопровождается сверхупругостью. Вернуть деформацию тогда можно будет двумя путями: нагревом металла, когда возврат обусловлен реализацией эффекта памяти формы, или нагружением в противоположную сторону. Поскольку процесс знакопеременного нагружения можно повторять многократно и поскольку, как показывает опыт, получающиеся здесь семейства кривых напряжение–деформация напоминают петли магнитного гистерезиса, это механическое проявление мартенситной неупругости нередко называют ферроупругостью (рис. 10).

Рассмотрим еще одно характерное явление. Пусть объект, деформированный через канал мартенситной неупругости, зафиксирован в жестком устройстве, а затем подвергнут нагреву выше температуры A_K . В интервале температур $A_H - A_K$ он мог бы восстановить приобретенную деформацию, но из-за стесненности со стороны устройства такая деформация должна перейти либо в упругую, либо в упругопластическую. Следовательно, она вызовет появление в теле механических напряжений. Их принято называть реактивными, поскольку они связаны с реакцией устройства (рис. 11). Реактивные напряжения в сплавах на основе меди достигают 500–600 МПа, а в сложных композициях на основе никелида титана – 1300 МПа.

Таким образом, материалы с эффектом памяти формы демонстрируют довольно широкий спектр свойств. Для физики прочности и пластичности второй половины XX столетия эти факты необычного механического поведения обсуждаемого класса веществ предстали как совершенно неожиданные. Пока еще нет масштабного инженерного отклика на данные свойства материалов, которые позволили бы избавиться от многих устаревших стереотипов

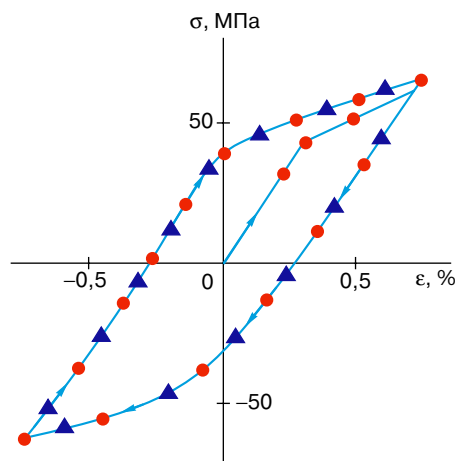


Рис. 10. Кривая деформирования никелида титана в первом (●) и последующем (▲) циклах нагрева

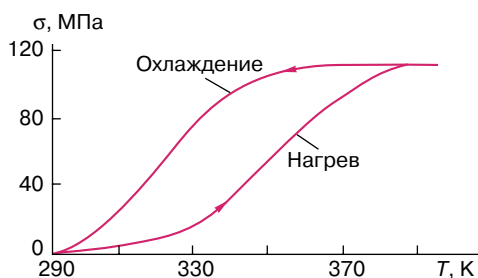


Рис. 11. Кривая изменения реактивных напряжений при нагреве и охлаждении никелида титана

на методы инженерного проектирования, технологии, принципы создания различных устройств, аппаратов и т.д. Тем не менее рассмотрим некоторые характерные примеры использования материалов со свойствами памяти формы в инженерном деле.

Однократно реализуемый эффект памяти формы может быть положен в основу проектирования разнообразных устройств перемещения. Приняв для восстанавливаемой деформации значение от 5 до 10% и $A_H - A_K \approx 30^\circ\text{C}$, получим, что изменение температуры всего лишь на 1°C способно вызвать относительную деформацию около $2 \cdot 10^{-3}$, что эквивалентно тепловому расширению при нагреве примерно на 100°C . Это позволяет создавать термочувствительные элементы особо высокой точности. Однако надо иметь в виду, что тепловое расширение осуществляется только в виде удлинений и сокращений размеров тела, в то время как в случае эффекта памяти формы восстанавливаются деформации кручения, изгибные и любые другие.

Пусть, например, спиральная пружина содержит N витков диаметром D и изготовлена из проволоки диаметром d с шагом витка h . Она имеет длину $L = Nh$, которая при нагреве изменится за счет теплового расширения на величину $\Delta L_\alpha = \alpha Nh \Delta T$, где

α – коэффициент теплового расширения металла, из которого навита пружина, ΔT – интервал изменения температуры. В то же время если проволока, из которой навита пружина, предварительно закручена в мартенситном состоянии до сдвиговой деформации ϵ , то при нагреве в интервале температур $\Delta T = A_K - A_H$ пружина способна удлиниться за счет восстановления ϵ на величину $\Delta L \approx \pi d^{-1} D^2 N \epsilon$. Отсюда для отношения ΔL к ΔL_α получаем значение, равное $\Delta L / \Delta L_\alpha = \pi d^{-1} \alpha^{-1} h^{-1} D^2 \epsilon (A_K - A_H)^{-1}$. Приняв $d = 1$ мм, $D = 10$ мм, $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$, $h = 10$ мм, $A_K - A_H = 30^\circ\text{C}$, $\epsilon = 5\%$, имеем $\Delta L / \Delta L_\alpha = 1700$. Иными словами, термочувствительность пружины из материала со свойством памяти формы оказывается в полторы–две тысячи раз выше термочувствительности обычной пружины! Это обстоятельство открывает качественно новые перспективы для проектирования ранее невыполнимых устройств. Иницируя изгибные деформации в проволоке, из которой сделана пружина, можно придать ей свойство, вообще нетипичное для таких элементов, – способность изменять диаметр D и число витков N . Простые оценки показывают, что диаметр пружины при возврате деформации изменится на величину, примерно равную $\Delta D \sim d \epsilon^{-1}$, то есть на порядок для $d = 1$ мм и $D = 10$ мм, а число витков приобретет приращение примерно в той же пропорции.

Пример с пружиной лишь частная иллюстрация. Важно, что 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 “самосооружающиеся (трансформируемые) конструкции”. Известными примерами служат самораскрывающиеся космические антенны, самовдвигающиеся телескопические устройства, трансформируемые стержневые несущие конструкции (формы) 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.

Материалы с эффектом памяти формы широко применяют в медицине для вытяжения костей и лечения переломов, соединения костных фрагментов, при лечении сколиоза и кровеносных сосудов и т.д.

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. Так, если металл находится при температуре вблизи A_k , то его модуль упругости весьма мал, а если температура существенно превышает A_k , то он близок к обычному модулю упругости. Тогда, 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.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 218 с.
2. Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. Сплавы с эффектом памяти формы: Пер. с яп. / Под ред. Х. Фунакубо. М.: Металлургия, 1990. 224 с.
3. Гюнтер Э.В. и др. Эффекты памяти формы и их применение в медицине. Новосибирск: Наука, 1992. 741 с.

* * *

Владимир Александрович Лихачев, доктор физико-математических наук, профессор, президент Санкт-Петербургской академии наук по проблемам прочности, руководитель лаборатории прочности материалов НИИ математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета. Специалист в области физики и механики твердого тела. Автор более 1000 научных трудов, 15 монографий, обладатель 77 авторских свидетельств на изобретения.

Скоропостижно скончался 26 марта 1996 года.

После кончины автора подготовку статьи к печати осуществлял кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИИ математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета Сергей Павлович Беляев.