

## Память формы

Явление, которому посвящен этот очерк, в научной и даже популярной литературе именуется бесцветным сочетанием букв «ЭЗФ» — эффект запоминания формы. Подробно не аргументируя, мы этим термином пользоваться не станем, предпочтем ему словосочетание «память формы». Нам оно кажется выразительнее безликой аббревиатуры.

Итак, память формы. С одним типом памяти у твердого тела мы уже встречались в очерке об обсидиановом ноже, побывавшем в огне костра и запомнившим, как давно это произошло. Обсидиан — вещество аморфное, но свойственный ему тип памяти, конечно же, свойствен и кристаллам. А в этом очерке — рассказ о том, что некоторые металлические сплавы обладают емкой и устойчивой памятью, хранящей воспоминание о форме, которая некогда была придана образцу, изготовленному из такого сплава. "Емкой" - это означает, что образец запоминает деформацию до 10% и при надлежащих условиях может восстановить некогда приданную ему форму; «устойчивой» — это означает, что во времени она практически не ограничена, если только образец не будет подвержен перегреву выше некоторого температурного предела. Десять процентов — это очень много! Обычным, неизбранным сплавам свойственна память, количественная мера которой 0,1% и меньше.

Подобно памяти живого организма, «памяти формы» металлического сплава свойствен и этап запоминания, и этап хранения информации, и этап ее выдачи. В нашем случае «информация» — это форма, о которой образец сплава может вспомнить. Эти этапы мы далее обсудим, а также поговорим и о некоторых из множества возможных практических приложений памяти формы. Выполнив такую программу, сочтем, что цель очерка достигнута.

В начале об этапе запоминания. Он, видимо, должен состоять в деформировании образца, для примера, скажем, в превращении прямой проволоки в спираль. В начале предположим, что проволока изготовлена из чистого металла или из сплава, которым не свойственна память формы. В этом случае после снятия деформирующей нагрузки с проволокой произойдет вот что. Если деформация не превзошла обычный предел упругости ( $\epsilon_y \approx 10^{-3}$ ), спираль распрямится, спружинит, превратится в исходную прямую проволоку и при этом совершенно забудет о форме, которая некогда ей была придана деформирующей нагрузкой. А если деформация превзойдет предел упругости, после снятия нагрузки спираль спружинит не полностью, все то, что с ней происходило при деформации за пределом упругости, в проволоке сохранится: она забудет об упругой доле деформации, но сохранит последствия пластической деформации. Это означает, что, как уже упоминалось, обычные металлы и сплавы имеют память формы очень малой емкости, сохраняющейся только под нагрузкой. Слов нет,— память! Не лучшего качества, но память, хорошо известная, широко используемая конструкторами и технологами и уже давным-давно (со времени Роберта Гука, то есть со второй половины семнадцатого века) никого не удивляющая.

Удивляющее обнаруживается, когда деформации подвергают образец, изготовленный из сплавов Cu-Zn, Cu-Al-Ni, Au-Cd и некоторых других. Очень выразительно это «удивляющее» проявляется в образцах из сплава NiTi, который именуют «нитинол».

Говоря о «памяти формы», свойственной специальным сплавам, надо подчеркнуть два обстоятельства. Во-первых, оказывается, что емкость их «упругой» памяти огромна, почти в сто раз больше, чем у чистых металлов. Деформация  $\epsilon$  не  $10^{-3}$ , а  $10^{-1}$ ! А во-вторых, удаление деформирующей нагрузки — не помеха памяти, память сохраняется.

Придадим осязаемость и зримость деформации, запоминаемой обычным металлом и, допустим, сплавом нитинол, и попытаемся воочию увидеть отличие величин  $\epsilon = 10^{-3}$  и  $\epsilon = 10^{-1}$ ! Для этого вернемся к нашему примеру о навивке спирали из проволоки. Известно, что деформация, испытываемая проволокой при изгибе,  $\epsilon = r/R$ , где  $r$  - радиус проволоки, а  $R$  — радиус навивки. Для определенности предположим, что  $r = 10^{-2}$  см. Так вот, спираль, навитая из проволоки обычного металла после навивки сможет восстановить свою исходную прямолинейную форму, если радиус навивки был не меньше, чем  $R = 10^{-2} \text{ см} / 10^{-3} = 10 \text{ см}$ ! А спираль из проволоки сплава нитинол способна вспомнить свою прямолинейную форму и в том случае, если радиус навивки не меньше, чем  $R = 10^{-2} \text{ см} / 10^{-1} = 10^{-1} \text{ см}$ , то есть всего 1 мм! Представьте себе: проволока, навитая на миллиметровый стерженек, способна самопроизвольно и полностью распрямиться.

Для того чтобы понять этап хранения памяти формы, нам необходимо ввести в обиход представление о «мартенситном» фазовом переходе, который испытывают сплавы, обладающие памятью формы. Собственно, понятие «фазовый переход», видимо, большинству читателей знакомо. Напомню лишь, что имеется в виду процесс перехода вещества при определенной температуре и давлении из одного состояния в другое (например, лед ↔ вода, вода ↔ пар) или из одной кристаллической структуры в другую (например, «белое олово» - «серое олово»). Значком «↔» подчеркнута, что переход разрешен и происходит в обоих направлениях. Здесь надо заметить, что в обычных фазовых переходах атомы, образующие кристаллическую решетку, смещаются на расстояние, превосходящее межатомное. При таком перемещении в новой фазе не сохраняются соседства между атомами, ранее существовавшие в старой фазе, испытывавшей превращение. Говорят так: произошло диффузионное превращение, подчеркивая этим, что в процессе превращения атомы участвовали в диффузионном перемешивании, в этом процессе каждый из них имел свою личную судьбу.

А вот теперь об интересующем нас «мартенситном» фазовом превращении. Важные для нас его особенности состоят в следующем. Во-первых, в процессе охлаждения при мартенситном переходе, когда в недрах исходной, так называемой «аустенитной» фазы, формируется мартенситная фаза, атомы не обмениваются местами, а лишь смещаются друг относительно друга на расстояние, не превосходящее межатомное. Происходит упорядоченное перемещение атомов, сохраняющих соседство между собой. Это и означает, что мартенситное превращение происходит бездиффузионно, а следовательно, аустенитная и мартенситная фазы имеют один и тот же состав. Мартенситный переход может происходить при относительно невысокой температуре, когда диффузионно атомы практически не перемещаются.

Нам вполне достаточно усвоить лишь то, что «аустенитная фаза» существует при более высокой температуре, а «мартенситная» — при более низкой. Только это! В этом случае общепринятые наименования фаз сохраняют лишь символический смысл. Итак, в объеме охлажденной аустенитной фазы может зародиться и расти мартенситная фаза. Этот процесс сопровождается значительным сдвигом вещества: требующаяся перестройка кристаллической структуры, как мы знаем, должна произойти бездиффузионно, без нарушения атомных соседств, а это условие может быть соблюдено лишь при коллективном перемещении атомов, участвующих в превращении. Сдвиг — одна из разновидностей такого перемещения. Сдвиг — это, разумеется, деформация, однако не вследствие изменения расстояния между атомами, а вследствие их коллективного перемещения. Зримым примером происходящего может служить значительная деформация стопки картонок (или монет) вследствие их малых сдвигов друг относительно друга.

Совсем не просто растет даже кристаллик соли из охлажденного раствора соли в воде, где его рост не стесняется средой: среда жидкая и примет ту форму, которую кристаллик ей продиктует.

А вот кристаллики мартенситной фазы оказываются в совсем иной ситуации, так как аустенитная среда естественно сопротивляется той значительной деформации, которая сопутствует появлению кристалликов мартенсита. Именно поэтому они (пластинки, иглы) располагаются в объеме так, чтобы, пусть не полностью, но компенсировать напряжение, вызванное соседними аналогичными выделениями, у которых иное направление сдвиговых смещений. Общая деформация образца при этом оказывается небольшой, а на поверхности образца появляется рельеф. Описанную мартенситную структуру металловеды называют «мартенсит охлаждения».

Охлаждая или нагревая образец, можно заставить полный объем образовавшейся мартенситной фазы увеличиваться или уменьшаться соответственно. Именно это имеют в виду, когда говорят, что мартенситная фаза термоупруга. Явление «термоупругости» было открыто выдающимся металлوفизиком Г. В. Курдюмовым и носит его имя: «эффект Курдюмова».

Продолжим наш затянувшийся путь к проблеме «память формы». Нам еще необходимо знать, что кроме «мартенсита охлаждения», может формироваться «мартенсит напряжения». Это означает вот что: под влиянием извне приложенного напряжения формируется мартенситная фаза, ориентированная так, чтобы образец, уступая действующим напряжениям, максимально деформировался. Это означает, что иглы и пластинки мартенситной фазы будут преобразовывать свою ориентацию так, чтобы направление сдвиговых смещений атомов совпадало с

направлением действующей нагрузки. В этом процессе «выгодно» ориентированная пластинка будет увеличивать свой объем за счет ориентированных «невыгодно». Это означает, что деформация будет накапливаться.

После снятия нагрузки образец с мартенситом напряжения могут постичь две участи. Первая: достигнутая деформация мгновенно исчезнет. Это будет означать, что образец обнаружил аномально большую упругость. Вторая: деформация сохранится и исчезнет лишь после нагрева образца, когда мы переведем его из мартенситной области в область аустенитную и, следовательно, образец обретет исходную форму, то есть обнаружит память формы. Обе эти участи в одном образце могут быть представлены в разных пропорциях. Нас интересует предельный случай, когда вся деформация хранится в «памяти формы» и обнаруживается при нагреве.

Длительные подготовительные рассуждения по пути к цели завершены. Обратимся к собственно цели, к памяти формы, последовательно пройдя все фазы: запоминание, хранение и выдачу хранившейся информации, представляющей собой сведения о форме образца. Сделаем это, имея в виду конкретный пример изделия из проволоки сплава нитинол.

Вначале при высокой температуре, заведомо в аустенитной фазе, подвергнем проволоку стабилизирующему отжигу. Затем охладим ее до температуры  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при которой в нитиноле начинает формироваться мартенсит охлаждения. При  $T = 52\text{ }^{\circ}\text{C}$  этот процесс практически завершается. Из проволоки, находящейся в мартенситной фазе, изготовим нужное изделие, в нашем примере — проволочную антенну полусферической формы. Проволоке нитинола придана определенная форма, которую надлежит запомнить.

Затем изомнем эту антенну, но так, чтобы нигде деформация проволоки не превосходила  $\varepsilon=10^{-1}$ , чтобы память проволоки не оказалась перегруженной. В этой процедуре смятия проволочного изделия мы формируем мартенсит напряжения. А вот теперь образовавшийся комок проволоки начнем греть, переводя его в аустенитную фазу. Комок начнет шевелиться, словно живой, постепенно распрямляться, вспоминая и в конце концов вспомнив ранее приданную ему форму полусферической антенны. Наблюдение за процессом вспоминания формы в ситуации, подобной описанной и изображенной на приводимом монтаже рисунков, может вызвать ощущение, что проволока воистину живая.

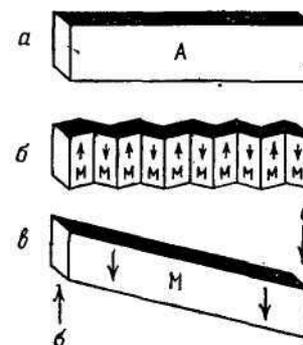


Рис.10. Схема возможных превращений аустенита в мартенсит: а — аустенит, б — мартенсит охлаждения, в — мартенсит напряжения; а — извне приложенные напряжения, которые определили и выгодное положение элементов мартенситной структуры, и значительную деформацию. При снятии нагрузки и нагреве позиция «в» перейдет в позицию «а»

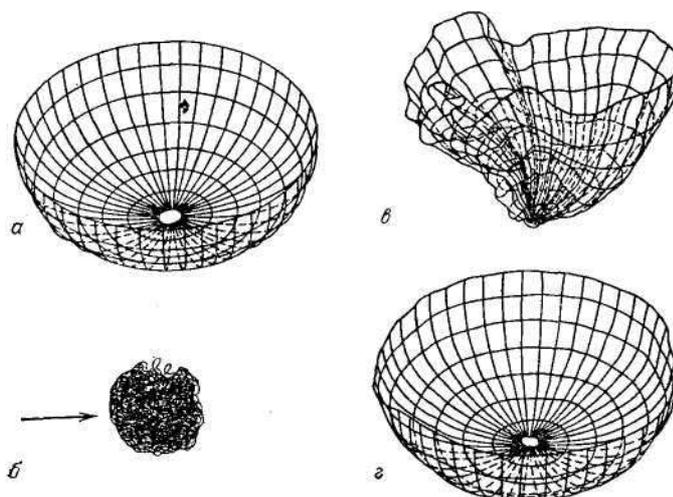


Рис.11. Последовательные стадии процесса потери формы и вспоминание ее проволочной конструкцией

В заключение - о трех примерах практического использования памяти формы в надежде на то, что читатель, всего лишь малость склонный к изобретательности, легко представит себе множество иных.

Первый пример посвящен способу сопряжения двух одинаковых труб, изготовленных из сплава, обладающего памятью формы. Идея проста. Если при низкой температуре в мартенситной фазе, деформируя, увеличить внутренний диаметр одной трубы, плотно вставить в нее другую трубу, которая не подвергалась деформации, а затем, отогрев, перевести трубу в аустенитную фазу, деформированная труба «вспомнит» о своем диаметре до его растяжки, сожмется и сожмет вставленную в него трубу. Заметьте, сожмется при нагреве, пренебрегая правилом, известным всем: при нагреве тела расширяются. Нас это не должно удивлять, так как речь идет не об обычной тепловой деформации. Описанный способ сопряжения труб нашел в технике широчайшее распространение.

Второй пример иллюстрирует возможности использования памяти формы в медицине. Медики небезуспешно пытаются лечить искривление позвоночника, вживляя в тело больного нитиноловый стержень и скрепляя его с позвоночником. Приняв температуру тела, стержень вспомнит ранее заданную ему форму здорового позвоночника и таким образом спрямит искривленный.

Третий пример посвящен возможности создания теплового двигателя с использованием нитиноловой проволоки. Впервые такой двигатель был осуществлен еще в начале семидесятых годов. Идея конструкции очень проста: горизонтально расположенное колесо, спицы которого разделены петлями из нитиноловой проволоки. Периодически попадая из ванны с холодной водой в ванну с водой, подогретой источником тепла, петля сжимается или расширяется и передает усилие на коленчатый вал. Двигатель оказался работоспособным, однако с весьма малым коэффициентом полезного действия. Не будем это специально обсуждать. Обратим внимание на главное: нитиноловый двигатель, основанный на использовании памяти формы, работает!

*При підготовці матеріалу використовувалися результати наукових досліджень викладачів кафедри фізики металів, а також фрагменти з науково-популярної літератури:*

1. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
2. Гегузин Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах. - М.: Наука, 1974. – 255 с.
3. Гегузин Я.Е. Живой кристалл.- М.: Наука, 1987. – 192 с.