

## У металлов есть память?!

Доктор физико-математических наук  
В. А. ЗАЙМОВСКИЙ

Явления живой и неживой природы настолько многообразны и так тесно переплетены друг с другом, что, столкнувшись с чем-то новым в неорганическом мире, мы невольно ищем аналогии с проявлениями жизнедеятельности человека. Это стремление отражается и на научной терминологии. Такие термины, как «время жизни» или «время оседлой жизни» (применительно к частицам), «живучесть», «усталость» (применительно к конструкционным материалам), считаются вполне строгими и стали общепринятыми наряду с сотнями других, им подобных в этом смысле. И не случайно открытое сравнительно недавно свойство металлических сплавов получило название «память формы». Могут ли металлы вспоминать, помнить, забывать? Давайте попробуем приписать металлам эти способности живых существ, и тогда мы увидим, что металлы способны даже на самоубийство!

### Упругая и пластическая деформация

Вначале вспомним, что нам известно из школьного курса физики о деформации металлов, и договоримся о некоторых обозначениях.

Если к металлическому образцу приложить нагрузку — внешнюю силу, которая сообщает ускорение одной части тела относительно другой, то образец изменит свои размеры и форму — деформируется. Деформацию обычно характеризуют отношением изменения  $\Delta l$  размера образца к исходному размеру  $l$ :  $\epsilon = \Delta l / l$ . Удельной мерой нагрузки служит напряжение  $\sigma$  — отношение величины действующей на образец силы к площади поперечного сечения образца.

Связь между  $\sigma$  и  $\epsilon$  определяется только свойствами материала и для обычных металлов и сплавов отображается кривой, приведенной на рисунке 1.

На участке  $OA$  зависимость  $\sigma$  ( $\epsilon$ ) линейна. Эта закономерность была установлена еще в XVII веке английским ученым Гуком. Закон Гука  $\sigma = E\epsilon$  действует только в пре-



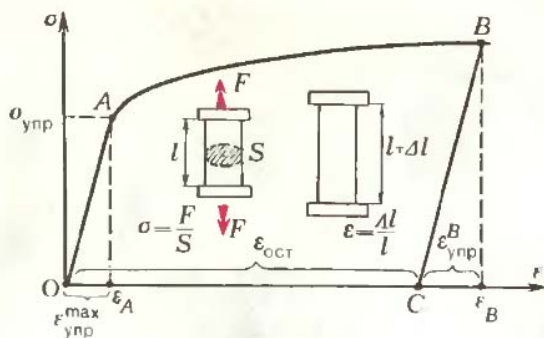


Рис. 1. Диаграмма напряжение — деформация.

делах «упругой области» диаграммы, пока напряжение не превысило предела упругости  $\sigma_{\text{упр}}$ . Константа  $E$  называется модулем упругости. Для большинства металлов  $E$  имеет порядок величины  $10^{10} - 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, а порядок  $\sigma_{\text{упр}}$  обычно  $10^7 - 10^8$  Н/м<sup>2</sup>; поэтому максимальная упругая деформация чаще всего имеет порядок величины  $10^{-3}$ , то есть составляет десятки доли процента. Формальный признак упругой деформации — ее обратимость: деформация исчезает при разгрузке, и образец возвращается к исходным размерам и форме. Между прочим, это означает, что, находясь под любым напряжением, не превышающим  $\sigma_{\text{упр}}$ , металл помнит свою исходную форму и восстанавливает ее сразу после уstra-

нения нагрузки. Например, если мы изогнем тонкое стальное лезвие для бритвы (толщина  $h = 0,08$  мм) в полукольцо радиуса  $\varrho = 10$  мм, то резкое изменение формы — налицо (рисунок 2), а деформация, тем не менее, еще остается упругой. Наружные слои металла при этом растянуты, а внутренние сжаты; максимальная величина относительной деформации равна  $\epsilon = h/2\varrho$  и составляет 0,4%, что для хорошей стали (у которой  $\sigma_{\text{упр}}$  достигает  $10^9$  Н/м<sup>2</sup>) еще не превышает  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{max}}$ . Тогда при разгрузке лезвие вернется к исходной плоской форме, которую оно помнило, будучи согнутым в полукольцо. Линия разгрузки на диаграмме (см. рисунок 1) будет следовать прямой  $AO$ , и деформация уменьшится до нуля.

Упругая деформация связана с изменением расстояний между равновесными положениями атомов в кристаллической решетке. При разгрузке силы межатомного взаимодействия возвращают атом в исходные позиции, и форма тела восстанавливается. Но что произойдет, если мы увеличим нагрузку и напряжение превысит  $\sigma_{\text{упр}}$ , а деформация выйдет за пределы  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{max}}$ ? Упругая деформация продолжает нарастать прямо пропорционально растущей величине напряжения (в соответствии с законом Гука), но появляется вторая составляющая деформации — пластическая. Общая величина деформации, соответствующей некоторой точке  $B$  на рисунке 1, складывается теперь из  $\epsilon_{\text{упр}}$ , которая исчезнет при разгрузке (линия разгрузки  $BC$  пойдет параллельно упругому участку  $AO$ ), и  $\epsilon_{\text{ост}}$  — остаточной деформации, которая остается при снятии нагрузки. Из рисунка 1 видно, что  $\epsilon_{\text{упр}}^B$  больше  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{max}}$ , поэтому символ «max» здесь не означает, что нельзя получить упругую деформацию большей величины. Он означает лишь, что если общая деформация превысит  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{max}}$ , то она уже не будет чисто упругой и форма тела после разгрузки будет отличаться от исходной.

Таким образом, формальным признаком пластической деформации является ее необратимость: после разгрузки сохраняются остаточные изменения размеров, то есть память

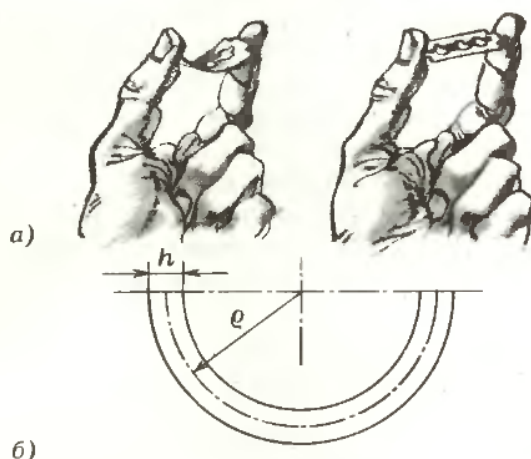


Рис. 2. а) — изгиб пластины в пределах упругой деформации;

б) — пластический изгиб. Средний слой изогнутой пластины не деформирован, его длина равна  $\pi\varrho$ . Нижний слой растянут, его длина равна  $\pi(\varrho + h/2)$ .

$$\epsilon = \frac{\pi(\varrho + h/2) - \pi\varrho}{\pi\varrho} = \frac{h}{2\varrho}$$

металла начинает давать перебои. Если продолжать деформацию дальше, за точку *B*, то пластическая составляющая будет нарастать при сравнительно слабом росте напряжения. Конечно, в конце концов процесс закончится разрушением образца; величина  $\epsilon_{ост}$  перед разрушением у пластичных металлов составляет десятки процентов, то есть на 2 порядка превышает  $\epsilon_{упр}$ . Это уже практически полный «склероз» — металл забывает исходную форму и принимает новую.

На такой забывчивости металлов основаны промышленные процессы их обработки, когда мы проделываем, например, путь от огромного слитка до тонкой проволочки. Если вернуться к нашему примеру с тонкой пластинкой, согнутой в полукольцо, но увеличить ее толщину до 2 мм, то деформация наружных слоев составит уже 10%. Теперь после разгрузки концы пластины лишь немного «спружинят», разойдутся в стороны (относительная деформация уменьшится на 0,5%), и пластина останется почти таким же полукольцом с чуть большим радиусом.

Когда говорят: «согнуть в бараний рог», имеют в виду именно такие большие деформации, при которых упругой составляющей уже можно пренебречь из-за ее малости по сравнению с остаточной. Между строк этого решительного выражения можно прочесть: «уже не разогнешься». Действительно, чтобы устранить последствия пластической деформации и вернуть тело к исходной форме, необходимо принудительно пластически деформировать его в противоположном направлении. Если же нагревать пластически деформированный металл, то форма его остается прежней — нет никаких причин для уменьшения или роста величины остаточной деформации.

Чтобы хорошо понять существо эффекта памяти формы в металлах, надо разобраться в механизме их пластической деформации. Точнее, нам понадобится рассмотреть лишь геометрический аспект этого механизма. Будучи телами кристаллическими, металлы пластически деформируются путем сдвигов

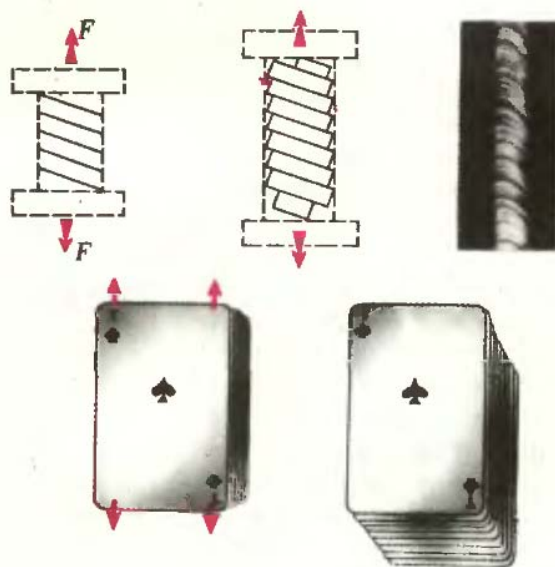


Рис. 3. Пластическая деформация осуществляется путем сдвигов. На фотографии — кристалл цинка после сильной пластической деформации ( $\times 50$ ).

по определенным атомным плоскостям в решетке (рисунок 3). Это напоминает сдвиг в стопке монет или в колоде карт. Мы не можем увеличить размер колоды, потянув сразу все карты в продольном направлении, но длина колоды увеличится, если мы будем сдвигать вдоль нее карты одну за другой. Так же удлиняется при растяжении металлический стержень — происходит сдвиг соседних слоев металла друг по другу. Чтобы при этом не нарушалась сплошность металла, слои, разделенные плоскостями сдвига, постепенно разворачиваются в направлении действия нагрузки. Эти сдвиги, как мы уже знаем, необратимы; они и вызывают остаточную деформацию.

### Открытие

Г. В. Курдюмова и Л. Г. Хандрова

Существуют ли в металлах сдвиговые процессы, которые могут идти без воздействия внешней силы? Оказывается, существуют и уже 3000 лет используются человеком. Еще в древней Греции и Риме использовали явление закалки стали для придания ей особой твердости и прочности. Однако только в XX веке выяснилось, что это изменение свойств стали связано с превращением одной кристаллической модификации железа в другую.



Всем знакомы превращения с изменением агрегатного состояния вещества: при высоких температурах устойчиво газообразное состояние, при более низких температурах — жидкое, что и вызывает конденсацию (при достаточно большом давлении). При дальнейшем охлаждении вещество затвердевает, кристаллизуется, то есть его атомы располагаются в пространстве в строгом геометрическом порядке, образуя кристаллическую решетку. Конкретные типы решеток могут быть различными, причем многим металлам и сплавам свойственно явление полиморфизма — способность изменять тип решетки в зависимости от окружающей температуры, давления и т. д. Такие металлы и сплавы, охлаждаясь от температуры кристаллизации, испытывают полиморфные превращения: вещество остается в твердом состоянии, но его высокотемпературная модификация переходит в низкотемпературную, и порядок расположения атомов в пространстве меняется.

Есть два основных типа подобных превращений в твердом теле. Если температура еще достаточно высока (скажем, около половины от температуры плавления по абсолютной шкале) и атомы сравнительно подвижны, они способны обмениваться местами с соседями и перемещаться на расстояния, превышающие межатомные. В этом случае атомы как бы покидают свои позиции в старой решетке и поодиночке или небольшими группами пристраиваются к новой. Но если этот переход одной кристаллической решетки в другую идет при низких температурах, то характер атомных смещений меняется. Здесь уже атомы менее подвижны, они не могут менять соседей. Поэтому они попадают в новые положения, соответствующие другой решетке, в результате взаимно согласованных перемещений на малые расстояния. Геометрически эта ситуация близка к изображенной на рисунке 3: атомы в одном слое совместно смещаются относительно атомов другого слоя. Отличие лишь в том, что порядок упаковки атомов в соседних слоях разный — в одном слое они

образуют решетку одного типа, а в другом — другого. Превращенная область в кристаллическом теле как бы испытывает сдвиг относительно соседней, в которой еще сохранилась старая решетка, а также относительно того участка с прежним порядком упаковки атомов, в котором она сама образовалась. Важно, что все это происходит без участия внешних сил — просто в результате понижения температуры. Превращения этого типа были названы мартенситными, а образующаяся в результате фаза с новой решеткой — мартенситом (в честь немецкого металловеда Мартенса; не путайте с Мартеном, изобретателем сталеплавильного процесса). Высокотемпературную фазу в железе и стали (а позднее, по аналогии, и в других сплавах) называли аустенитом — в честь английского металлурга Аустена. Именно превращение аустенита в мартенсит ответственно за резкое изменение свойств стали при закалке. В сталях мартенситное превращение начинается обычно при температурах 400—600 К. Температуру начала этого превращения обозначают  $M_s$  и называют мартенситной точкой. Хотя  $M_s$  и не имеет такого строго определенного значения, как, скажем, температура плавления, при данном химическом составе сплава ее колебания, как правило, невелики.

Мартенситное превращение связано со значительными сдвиговыми смещениями атомов, но форма тела при закалке в целом не изменяется. Дело в том, что в ходе превращения мартенситная фаза разбивается на отдельные кристаллы, так чтобы направления сдвиговых смещений в соседних кристаллах были противоположны. Это снижает общий уровень напряжений, возникающих при мартенситном превращении из-за сильных деформаций решетки и различия в плотности двух участвующих в нем фаз. Упрощенно эта картина изображена на рисунке 4, а. Форма тела в целом не изменилась, но первоначально плоские поверхности стали ребристыми. На поверхности появился рельеф — неперенный спутник мартенситного превращения.

В 1948 году один из крупнейших советских металлофизиков академик



Г. В. Курдюмов предсказал, а уже в следующем году вместе со своим сотрудником Л. Г. Хандросом (ныне доктором физико-математических наук) экспериментально наблюдал новый тип мартенситного превращения в алюминиевой бронзе. В 1980 году это было признано открытием. Авторы открытия получили соответствующий диплом, а само явление — название «эффект Курдюмова». Суть его в следующем. При благоприятном сочетании определенных условий (в частности, нужно, чтобы разница объемов фаз была небольшой) превращение аустенита (А) в мартенсит (М) приобретает особые черты. Оно становится, как выразился Г. В. Курдюмов, «термоупругим». Этот термин отражает многие необычные особенности такого мартенситного превращения. В частности, он подчеркивает то обстоятельство, что если прекратить охлаждение, то превращение сразу прекращается на той стадии, на которой его застигла температурная остановка, а если начать нагревать образец, то превращение вскоре начинает идти в обратную сторону. Это значит, что мартенсит снова превращается в аустенит, все сдвиговые смещения атомов идут в обратном направлении, а сами атомы возвращаются точно в свои исходные позиции, соответствующие решетке аустенита.

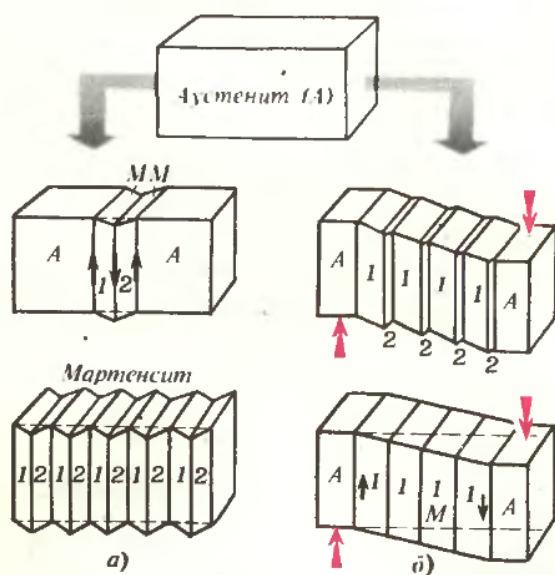


Рис. 4. Мартенситное превращение при охлаждении (а) и под действием нарастающей внешней силы (б).

В сплавах, испытывающих термоупругое превращение, приложением внешнего напряжения можно вызвать повышение температуры мартенситного превращения, но главное — в этих сплавах наличие внешней нагрузки особенно резко меняет геометрическую картину превращения. Если напряжение приложено так, как показано на рисунке 4, б, то увеличивается доля кристаллов 1, в которых направление сдвиговых смещений атомов согласуется с направлением действия нагрузки, а доля кристаллов 2 уменьшается. В предельном случае при  $A \rightarrow M$ -переходе реализуется только один вариант смещений атомов (рисунок 4, б), и мы получаем значительную общую деформацию образца, которая соответствует относительному удлинению 10% и более.

По своей величине эта деформация намного превышает  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{max}}$  обычных металлов, но она накапливается не за счет необратимых сдвигов, а за счет направленного превращения  $A \rightarrow M$ . Внешняя сила упорядочивает смещения атомов при этом превращении. Если теперь вызвать обратное превращение  $M \rightarrow A$ , то вся эта огромная деформация исчезнет, так как атомы возвращаются в исходное положение, которое они занимали в решетке аустенита.

Получается, что пластина, изготовленная из такого сплава и согнутая в кольцо, помнит исходную плоскую форму, причем может достаточно долго хранить ее в своей памяти. Процесс «вспоминания» реализуется при нагреве, и теперь мы уже можем «взывать к памяти» металла в то время и в той обстановке, когда нам это потребуется.

В настоящее время известны сотни сплавов, проявляющих эффект Курдюмова. Регулируя их состав, мы можем смещать интервал  $A \rightarrow M \rightarrow A$ -превращений по температурной шкале. Например, сделаем так, чтобы мартенситная точка  $M_n$  была немного ниже комнатной температуры, а  $A_n$  — температура начала обратного  $M \rightarrow A$ -превращения при нагреве — немного выше. Тогда небольшое напряжение, приложенное при комнатной температуре, вызовет превращение  $A \rightarrow M$  и значительное изме-



нение формы тела, а при нагреве на  $50\text{--}100^\circ\text{C}$  оно вспомнит свою исходную форму. Можно «спустить» интервал превращений в глубокий холод. Тогда задавать новую форму нужно будет при низкой температуре, а вспоминать прежнюю форму металл будет в ходе отогрева до температуры окружающей среды. Интересно, что если мы будем препятствовать возвращению сплава к его первоначальной форме, то в нем возникают очень высокие напряжения. Скажем, изогнуть стержень вблизи  $M_n$  можно грузом 10 Н, а при нагреве, стремясь выпрямиться, он сможет уже поднять груз 100 Н. Если же мы подвесим «непосильный» груз, то мучительно вспоминая свою прежнюю прямую форму, стержень иногда даже разрывается на части (самоубийство?!).

#### Как используют память металлов?

Возможности практического применения сплавов, обладающих уникальным свойством запоминать форму, исключительно разнообразны и заманчивы. Здесь перед конструкторами — широкое поле деятельности, усеянное принципиально новыми инженерными решениями. Например, в космической технике с помощью этих сплавов эффектно решается традиционная проблема экономии места в корабле. Свернутые или скрученные в компактную форму и уложенные в небольших нишах космического корабля антенны, излучатели энергии и т. п. распрямляются после запуска аппарата на орбиту от действия солнечного тепла. Сплавы с памятью можно использовать для создания космического радиотелескопа — компактный моток тонкой проволоки разворачивается при нагреве в круг диаметром около 2 км!

Конечно, запоминающим сплавам есть много применений и на Земле. Их способность поднимать грузы при нагреве открывает возможность создания двигателей прямого преобразования тепла в механическую работу. Модели таких двигателей уже построены. Их КПД невысок, но ведь для их работы можно использовать низкотемпературные источники тепла — солнечную энергию, тепловые отходы промышленных предприятий и т. п.

Это же свойство запоминающих сплавов нашло применение при создании соединения способом, заменяющим сварку, пайку и другие традиционные методы. Допустим, нам надо соединить две трубки для получения, скажем, топливопровода двигателя самолета. Берем втулку из низкотемпературного запоминающего сплава, внутренний диаметр которой на 4% меньше наружного диаметра соединяемых трубок (рис. 5). В жидком азоте ( $-196^\circ\text{C}$ ) деформируем втулку так, что ее внутренний диаметр становится на 4% больше наружного диаметра трубок. Теперь концы трубок мы можем ввести внутрь втулки, которая, отогреваясь до комнатной температуры, вспоминает прежнюю форму, сжимается и сжимает концы трубок, обеспечивая прочное герметичное соединение. Здесь используется совершенно необычная с инженерной точки зрения особенность проявления памяти металла. Ведь все нормальные, то есть «забывчивые», металлы при нагреве расширяются во всех направлениях. А запоминающий сплав мы заставили при нагреве сжиматься! Конечно, он сжимается только по двум осям, а по третьей — вдоль оси трубок — растягивается, так как объем материала втулки в ходе  $M \rightarrow A$ -превращения меняется мало. Но в данном случае это

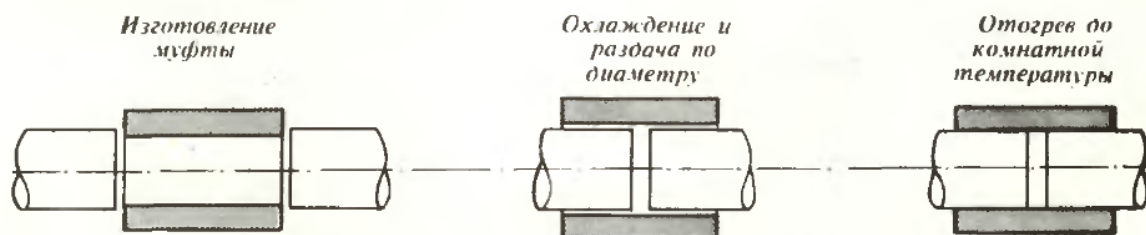


Рис. 5. Схема получения соединения с использованием муфты из сплава с памятью.



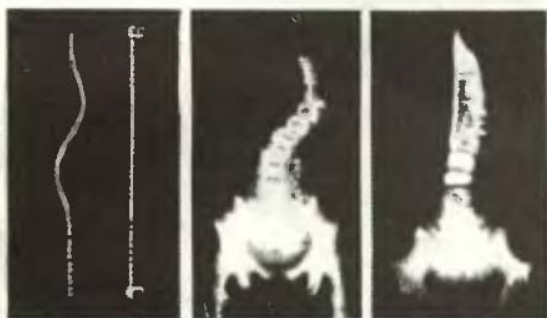


Рис. 6. Новый способ лечения сколиоза.

не мешает решению задачи; важно получить при нагреве уменьшение диаметра втулки, чтобы она сжала концы соединяемых трубок.

В авиации и кораблестроении уже установлены сотни тысяч таких соединений. Они показали высокую надежность и работают безотказно. А ведь надо учитывать, что технически это значительно проще, чем сваривать или паять. Можно легко выполнять такие соединения в труднодоступных или пожароопасных местах и даже в таких экзотических условиях, когда сварка или пайка вообще невозможны, — например, на дне моря.

Запоминающие сплавы используют и для создания разного рода автоматических терморегуляторов, срабатывающих при небольшом превышении заранее заданного значения температуры.

Интересны возможности использования этих сплавов в медицине. Их уже применяют при операциях, связанных со сращиванием костных переломов. Разрабатываются новые способы лечения такого заболевания, как сколиоз — искривление позвоночника. В организм больного оперативным путем вводят стержень, изогнутый так, что он повторяет неправильную форму позвоночника, и скрепляют его с позвоночным столбом. Стержень помнит заранее заданную ему форму правильного позвоночника и начинает восстанавливать ее при небольшом (не опасном и безболезненном для человека) повышении температуры (рисунок 6). Врач может легко регулировать ход лечения.

Другой пример — фильтры для улавливания тромбов (сгустков кро-



Рис. 7. Тромб, остановленный в кровеносном сосуде собаки фильтром из нитинола.

ви) в сосудах. Слегка охлажденная прямая тонкая проволочка вводится в нужное место кровеносного сосуда и там, отогреваясь до температуры тела, принимает ранее заданную ей причудливо-запутанную форму. Фильтр пропускает кровь, но задерживает тромб (рисунок 7), который, добравшись до сердца или мозга, мог бы привести к смертельному исходу.

Начаты работы по созданию искусственного сердца с использованием тонких проволок из запоминающих сплавов. В медицине, кроме памяти, используется еще и то обстоятельство, что некоторые из запоминающих сплавов, в частности сплав никеля и титана — нитинол, имеют очень высокую коррозионную стойкость и показали отличную совместимость с тканями живых организмов.

Нитинол не ржавеет, он легкий и достаточно прочен. Не исключено, что в будущем из него будут, например, делать корпуса автомобилей. Такой автомобиль, даже после серьезного дорожного происшествия, восстановит форму кузова просто в результате легкого подогрева поврежденных мест.

Конечно, сейчас «автомобильный» прогноз выглядит, пожалуй, слишком смелым, так как запоминающие сплавы еще довольно дороги. Но ведь мы еще не знаем, чем нас завтра порадают геологи.