



БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •  
выпуск 32

В. А. ЗАЙМОВСКИЙ  
Т. Л. КОЛУПАЕВА

# НЕОБЫЧНЫЕ СВОЙСТВА ОБЫЧНЫХ МЕТАЛЛОВ





**БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •**  
**выпуск 32**

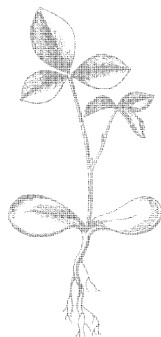
---

**В. А. ЗАЙМОВСКИЙ**  
**Т. Л. КОЛУПАЕВА**

# **НЕОБЫЧНЫЕ СВОЙСТВА ОБЫЧНЫХ МЕТАЛЛОВ**



**МОСКВА «НАУКА»**  
**ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ**  
**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ**  
**ЛИТЕРАТУРЫ**  
**1984**



22.37

3-17

УДК 539.2

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Академик **И. К. Кикоин** (председатель), академик **А. Н. Колмогоров** (заместитель председателя), профессор **Л. Г. Асламазов** (ученый секретарь), член-корреспондент АН СССР **А. А. Абрикосов**, академик **Б. К. Вайнштейн**, заслуженный учитель РСФСР **Б. В. Воздвиженский**, академик **П. Л. Капица**, профессор **С. П. Капица**, академик **С. П. Новиков**, академик **Ю. А. Осипьян**, академик АПН СССР **В. Г. Разумовский**, академик **Р. З. Сагдеев**, профессор **Я. А. Смородинский**, академик **С. Л. Соболев**, член-корреспондент АН СССР **Д. К. Фаддеев**, член-корреспондент АН СССР **И. С. Шкловский**.

**Займовский В. А., Колупаева Т. Л.**

3-17 Необычные свойства обычных металлов /Под ред. Л. Г. Асламазова. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 192 с. — (Библиотечка «Квант». Вып. 32). — 30 к.

В книге рассказано о самых обычных механических свойствах и самых необыкновенных «сверхсвойствах» металлов и сплавов: сверхупругости, сверхпластичности, сверхпрочности. Читатель узнает о том, почему из одного металла можно сделать хорошую пружину, а другой вообще ведет себя как резина; почему один сплав издает великолепный колокольный звон, и другой — нем как рыба; почему один и тот же сплав может быть прочным и упругим, а может и течь подобно жидкому стеклу. В книге также уделено значительное место открытому недавно свойству металлов напоминать форму и применению запоминающих сплавов в космосе и в земных условиях.

Для школьников, преподавателей, студентов.

З  $\frac{1704060000-068}{053(02)-84}$  190-84

**ББК 22.37**

**531.9**

© Издательство «Наука».  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1984

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. НАПРЯЖЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИЯ	11
§ 1. Напряжение. Где тонко, там и рвется	11
§ 2. Деформация. Кому удобнее на прокрустовом ложе	14
Глава 2. УПРУГОСТЬ, НЕУПРУГОСТЬ И СВЕРХУПРУГОСТЬ	17
§ 1. Закон Гука, а модуль — Юнга	20
§ 2. Диаграмма деформации	23
§ 3. Почему мы говорим: «ластик»	24
§ 4. Почему стальная проволока пружинит, а медная нет?	29
§ 5. Ле Шателье против Гука	33
§ 6. Работа упругой деформации	37
§ 7. Почему звонит колокол, или внутреннее трение в металлах	38
§ 8. Как измерять скорость диффузии атомов, когда они не диффундируют?	45
§ 9. Что просто больше, а что — сверх?	52
§ 10. Несматывающаяся проволока	53
§ 11. Неслабеющие пружины и немые сплавы	56
Глава 3. ПЛАСТИЧНОСТЬ И СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ	59
§ 1. Пластичность. Как удлинить колоду карт?	59
§ 2. Как происходит сдвиг, или суровый боцман и хитроумный юнга	65
§ 3. Дислокации	69
§ 4. Сколько требуется дислокаций	73
§ 5. Откуда они берутся?	77
§ 6. Дислокации — желанные и гонимые	78
§ 7. Дислокации — ловушки и дислокации — проводники	84
§ 8. Сверхпластичность	87
1*	3



Глава 4. МЕХАНИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ МЕТАЛЛОВ	101
§ 1. Металл запоминает форму	101
§ 2. Удивительный бараний рог	103
§ 3. Самоуправство или хитрость?	106
§ 4. Сплав способен на самоубийство?	107
§ 5. Пророки древние и современные	111
§ 6. Космические и земные профессии запоминающих сплавов	113
§ 7. Как закаливается сталь?	122
§ 8. Оловянная чума и открытие Г. В. Курдюмова и Л. Г. Хандроса	127
§ 9. Двойная память и «вечный» двигатель	132
Глава 5. РАЗРУШЕНИЕ, ПРОЧНОСТЬ И СВЕРХПРОЧНОСТЬ	138
§ 1. Трещина — жилище змея	140
§ 2. Теоретическая прочность	141
§ 3. Концентрация напряжений	142
§ 4. Трещина Гриффитса	144
§ 5. Сверхпрочность	154
§ 6. Усталость и живучесть металлов	159
Глава 6. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТЕКЛА	165
Глава 7. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ — МАТЕРИАЛЫ БУДУЩЕГО	177
§ 1. Очередное самоубийство	178
§ 2. Упругость и прочность измеряются в километрах!	180
§ 3. Предпосылки для композитора	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	189

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Этой книгой мы обращаемся к молодым читателям, интересующимся физикой и техникой. С давних пор физическая наука двигает вперед развитие техники, которая, в свою очередь, ставит новые задачи перед физикой, открывает в ней новые разделы. Один из сравнительно молодых разделов физики, который бурно прогрессирует в последние десятилетия, — это физика металлов.



Рис. 1.

По нашим наблюдениям многие школьники не всегда правильно представляют себе содержание науки о металлах, которая на самом деле охватывает очень широкий круг вопросов. Часто считают, что, например, в Московском институте стали и сплавов, к которому авторы имеют самое прямое отношение, учат лишь плавить чугуны и

сталь, ковать и прокатывать металл. Но здесь готовят и металлофизиков высокого класса, поскольку металлургия, как и другие области техники, базируется на использовании ряда интереснейших физических явлений и процессов.

Необходимо производить металл, но не менее важно проникать в тайны его внутреннего строения, учиться управлять его свойствами. Сами же эти свойства могут изменяться в таких широких пределах, что бывает просто невозможно обойтись без приставки «сверх». Исследование сверхупругости, сверхпластичности, сверхпрочности, способности металлов запоминать форму и других явлений, о которых рассказано в книге, — как раз и входит в задачу металлофизиков.

Наша цель будет достигнута, если те, кто считал малоинтересной или даже скучной науку о металлах, хоть отчасти изменят свое мнение.

Авторы искренне благодарят профессора кафедры теоретической физики Московского института стали и сплавов Л. Г. Асламазова, который стимулировал создание этой книги и принял активное творческое участие в работе над ней.

*В. А. Займовский  
Т. Л. Колупаева*

## ВВЕДЕНИЕ

---

В этой книге речь пойдет о механических свойствах металлов — о их способности сопротивляться нагрузкам в самых разнообразных условиях.

Если внимательно посмотреть на окружающие нас предметы, то легко увидеть, что все они несут нагрузку: стол, на который мы облокотились, стул, на котором сидим, гвоздь, на котором подвешена к стене картина, сама эта стена, пол комнаты, участок земли, где стоит дом. Это все — примеры нагрузок статических, т. е. действующих постоянно или прикладываемых медленно. Совсем другое дело, например, работа двигателя автомобиля. Газы, с огромной скоростью сгорающие в цилиндре, толкают поршень, а тот в свою очередь передает эти толчки через шатун на коленчатый вал с частотой более 7 тысяч раз в минуту. За 50 тысяч километров пробега коленвал совершает 100 миллионов оборотов, испытывая во время каждого оборота изгибающую нагрузку то одного, то другого знака.

Многие знают, как печально звучат слова: «у меня полетел коленвал», и уж каждый легко представит себе, что последствия разрушения стен и полов в его доме могут быть по-настоящему трагичными. А разрушение и гибель самолетов, кораблей? Однако хватит ужасов.

Какой красивый, мелодичный звон издают колокола! Представим себе, что из такого же сплава изготовлены станины токарных станков, а еще лучше (или хуже?) кузнечных молотов. Что за музыка будет в цехе, и кто возьмется играть в таком оркестре и дирижировать им?

Почему стальная проволока пружинит, а медная — нет? Что происходит внутри металла, когда его деформируют? Почему один сплав «звучит», а другой — нем как рыба? Как разрушается металл, как его легче разрушить и как предохранить от разрушения? Ответы на эти и многие другие вопросы являются предметом науки

о механических свойствах металлов, и именно о них пойдет наш рассказ.

Более 99 % производимого человеком металла (а его выпускается сейчас более 600 миллионов тонн или около 150 кг на одного жителя Земли в год) используется в технике в силу того, что металлы обладают нужным сочетанием механических свойств, хорошо сопротивляются нагрузкам. Менее 1 % металла потребляют электротехника, электроника и другие отрасли техники, где нужны материалы с особыми физическими свойствами (электрическими, магнитными и др.). Да и там вопрос о механических свойствах не снимается с повестки дня, так как все детали нагружены по крайней мере собственным весом. Только в невесомости может быть ненагруженная деталь, но путь к невесомости лежит через перегрузки.

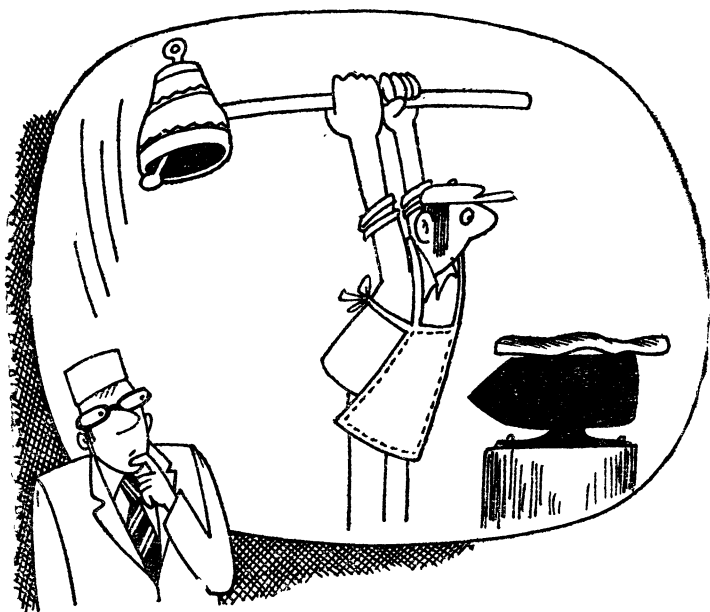


Рис. 2.

Если читатель разберется в том, что такое обычная упругость, пластичность и прочность металлов, то он, вероятно, будет удивлен (а может быть и поражен), узнав, что обычный уровень этих свойств может быть превзойден в десятки раз. А поняв причины проявления свехупру-

гости, сверхпластичности, сверхпрочности и еще более интересного эффекта — механической «памяти» металлов, — он, возможно, испытает удовлетворение (а может быть и удовольствие).

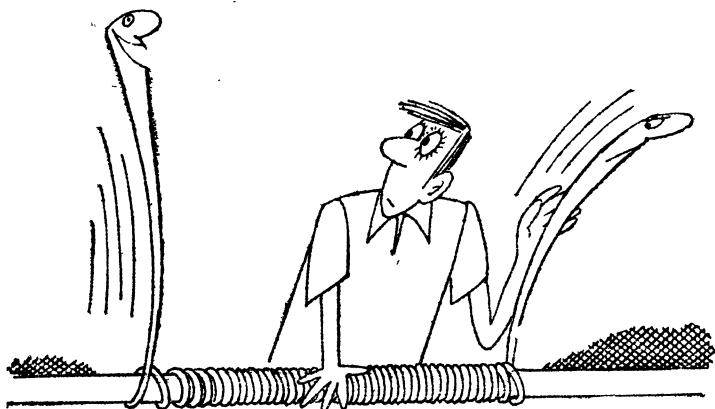


Рис. 3.

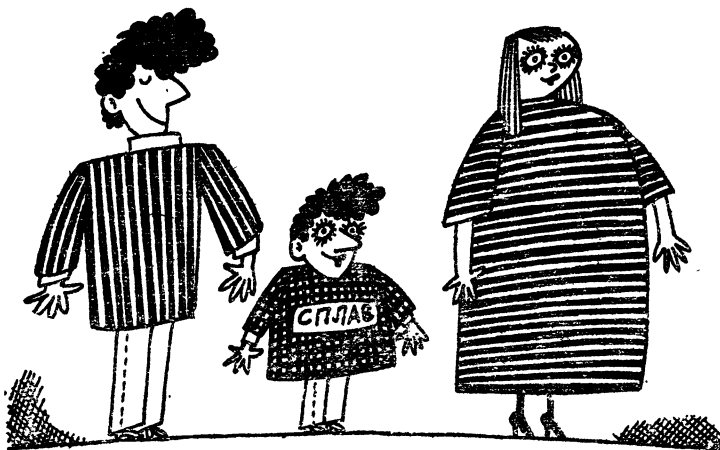


Рис. 4.

Действительно, ведь можно удлинить металлический стержень без разрушения в 50 раз, можно навить по всем правилам пружину, а она тут же превратится снова в прямую проволоку, можно заставить металл сжиматься при нагревании, хотя хорошо известно, что тела при нагревании обычно расширяются.

Можно изменить даже естественный порядок во взаимном расположении атомов металла, заставить его отказаться от своей обычной кристаллической структуры и получить аморфный металл или металлическое стекло с таким атомным строением, какое имеет застывшая жидкость. Из двух материалов с сильно различающимися свойствами можно «собрать» третий новый материал, который как бы суммирует преимущества каждого, а их недостатки — сглаживает.

Читатель узнает, как эти необычные явления и свойства используются в земной и космической технике, в медицине, и, возможно, интерес к затронутым в книге проблемам определит его будущую профессию.

## НАПРЯЖЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИЯ

### § 1. Напряжение. Где тонко, там и рвется

Это утверждение ни у кого не вызывает сомнений. Каждый знает, что тонкую проволочку можно разорвать руками, а толстый канат из этих же проволок выдержит огромную тяжесть. Так что интуитивно мы хорошо представляем себе, что такое механическое напряжение. И сам этот термин часто используем в разговорной речи: «он без напряжения поднимает двухпудовую гирю», «он покраснел от напряжения».



Рис. 5.

Теперь определим это понятие более точно. Напряжением  $\sigma$  называют величину приложенной силы (нагрузку)  $F$ , отнесенную к площади поперечного сечения нагруженного тела  $S$ :

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Таким образом, напряжение имеет размерность  $\left(\frac{\text{сила}}{\text{площадь}}\right)$ , в системе СИ — это паскали ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ );



для нас удобнее будет пользоваться мегапаскалями ( $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$ ).

Сама по себе величина нагрузки еще ничего не говорит о результате ее действия. Надо знать, какое напряжение в материале вызовет эта нагрузка. Один и тот же рюкзак кажется легким силачу, у которого большая

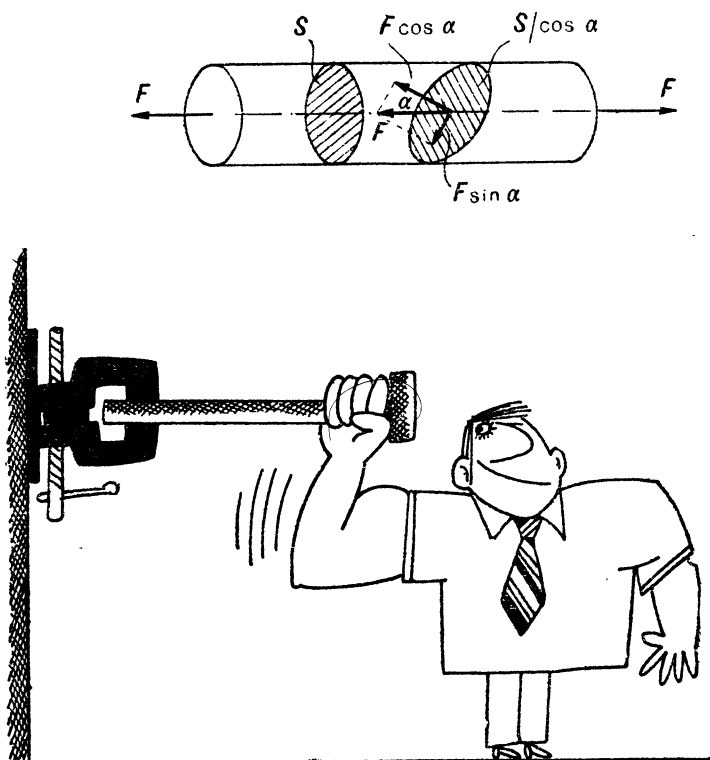


Рис. 6.

площадь сечения костей и мышц, и вызывает гораздо большее напряжение в теле обычного человека. В технике чаще всего заранее известна нагрузка, которую будет нести деталь из данного материала, и напряжение, которое для него может быть опасным. Задача конструктора — так выбрать размеры и форму деталей, чтобы уровень напряжения не превысил допустимого.

Это все просто и ясно, но есть одна подробность, очень важная для анализа поведения тел при нагружении. Ведь любое тело имеет множество сечений, у каждого из них — своя площадь и, значит, в каждом — свое напряжение. Действительно, если мы будем, например, растягивать цилиндрический стержень двумя одинаковыми силами  $F$ , направленными вдоль его оси (рис. 6), то в каждом поперечном сечении площадью  $S$  возникнет растягивающее напряжение  $\sigma = F/S$ . Если же мы выберем сечение, перпендикуляр к которому составляет угол  $\alpha$  с осью цилиндра, то оно, во-первых, будет иметь уже не круглую форму, а форму эллипса площадью  $S/\cos \alpha$ , а, во-вторых, сила  $F$  будет направлена не перпендикулярно этому сечению, а наклонно.

Пользуясь правилом параллелограмма, легко найдем, что в таких сечениях возникают два напряжения: первое

$$\sigma = \frac{F \cos \alpha}{S/\cos \alpha} = \frac{F}{S} \cos^2 \alpha,$$

которое называют нормальным, стремится оторвать эту площадку от соседней, ей параллельной, и второе — его называют касательным или сдвиговым и обозначают

$$\tau = \frac{F \sin \alpha}{S/\cos \alpha} = \frac{F}{S} \sin \alpha \cos \alpha,$$

которое стремится сдвинуть эти площадки друг относительно друга.

Отсюда вытекает, что в сечениях, перпендикулярных оси действия нагрузки, действуют только нормальные напряжения  $\sigma = P/F$  ( $\cos \alpha = 1$ ), а касательные напряжения достигают максимума на площадках, наклоненных под углом  $45^\circ$  к оси (так как при  $\alpha = 45^\circ$  произведение  $\sin \alpha \cos \alpha$  максимально и равно  $1/2$ ). Таким образом, при растяжении максимальные касательные напряжения вдвое меньше максимальных нормальных.

Итак, под нагрузкой заданной величины  $F$  стержень с большей площадью поперечного сечения  $S$  испытывает меньшие напряжения, чем более тонкий стержень. Если стержень имеет переменное сечение, то в самом тонком месте он и разорвется, так как именно здесь будут действовать наибольшие напряжения.

## § 2. Деформация. Кому удобнее на прокрустовом ложе

Согласно мифологической легенде в Аттике жил разбойник Дамаст, по прозвищу Прокруст (вытягиватель). У Прокруста было ложе, на которое он заставлял ложиться тех, кто попадал к нему в плен. Если ложе было слишком длинно, Прокруст вытягивал несчастного до тех пор, пока его ноги не касались края ложа. Если же ложе было коротко, то Прокруст обрубал пленнику ноги.

Ужасная легенда, но вдумайтесь: всем ли так уж страшно прокрустово ложе? Если человек вдвое короче кровати, то ему, конечно, будет не сладко. Если же его рост лишь немного меньше длины ложа, то он вполне может выдержать небольшое дополнительное удлинение.

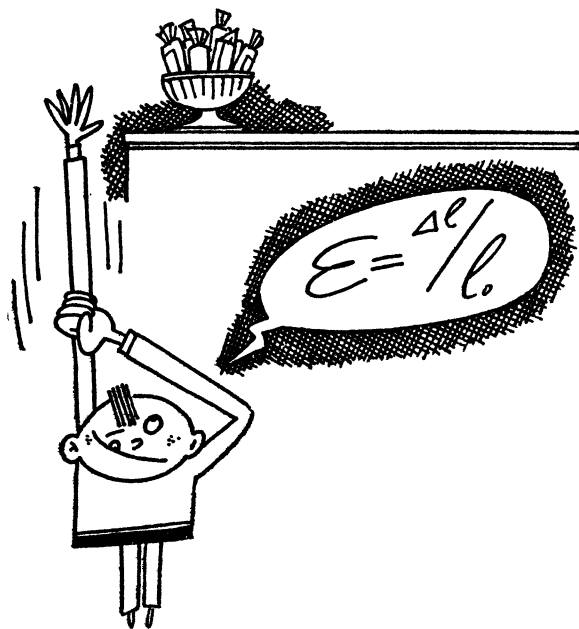


Рис. 7.

Этот пример ясно показывает, что величину деформации надо оценивать относительной мерой. Забудем на время о Прокрусте и определим точную меру деформации.

Деформацию характеризуют относительным изменением длины тела  $\epsilon = \Delta l / l_0$ , где  $l_0$  — исходная длина,

а  $\Delta l$  — абсолютное изменение длины, разность между конечной длиной и исходной. Величина  $\epsilon$  безразмерная и ее удобно выражать в процентах. При одинаковом относительном удлинении тела разной длины испытывают равные деформации  $\epsilon$ , а указать лишь приращение длины  $\Delta l$  для характеристики деформированного состояния так же недостаточно, как указать лишь

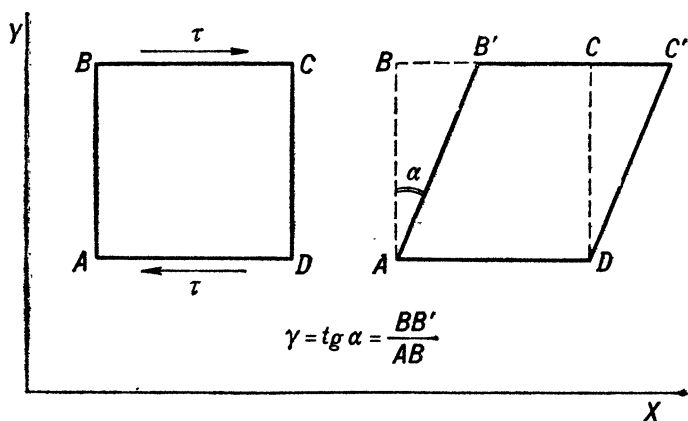


Рис. 8.

величину нагрузки для характеристики напряженности детали. Даже далекому от техники человеку ясно, что растянуть гвоздь исходной длины 6 мм до 3 м невозможно — он порвется (только в следующей главе мы узнаем, что иногда невозможное возможно!). А вот, например, стальные канаты подвесного моста через залив

Форт в Шотландии растянуты именно на 3 м. При их исходной длине около 3 км относительное удлинение составляет всего 0,1 %, что вполне допустимо даже для столь ответственной конструкции.

И, наконец, есть важная подробность и в характеристике деформированного состояния. Чтобы полностью описать деформированное состояние, кроме относительных удлинений, надо узнать и относительные сдвиги, которые могут быть вызваны касательными напряжениями. Например, если мы деформируем кубик так, как показано на рис. 8 (здесь показано изменение формы его передней грани), то первоначально прямой угол  $BAD$  становится острым, величина относительного сдвига  $\gamma$  при этом оценивается тангенсом угла  $BAB'$  (при небольших деформациях — величиной самого угла. Значит, если при определении относительного удлинения мы относили изменение размера вдоль какой-либо оси к исходному размеру вдоль той же оси, то относительный сдвиг  $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$  находят как изменение размера вдоль оси  $X$ , деленное на размер вдоль перпендикулярной ей оси  $Y$ . Рис. 8 показывает, кроме того, что сдвиговая деформация вызывает не только изменения углов, но также удлинение (вдоль  $AC'$ ) и укорочение или сжатие (вдоль  $B'D$ ).

## УПРУГОСТЬ, НЕУПРУГОСТЬ И СВЕРХУПРУГОСТЬ

Тем, кто еще не читал записных книжек И. Ильфа, можно только позавидовать — у них впереди огромное удовольствие. Там, среди прочих, есть такая запись: — Книга по высшей математике начиналась словами «Мы знаем...». Хотя наш предмет проще высшей математики, все же и нам придется предполагать, что кое-что мы уже знаем.

Итак, «мы знаем», что при обычных условиях затвердевания жидкого металла его атомы располагаются в пространстве в строго определенном геометрическом порядке, образуя кристаллическую решетку. При комнатной температуре и атмосферном давлении любой металл, за исключением ртути, представляет собой твердое кристаллическое тело. Да и ртуть кристаллизуется уже при  $-39^{\circ}\text{C}$ , так что при сильных морозах ртутные термометры непригодны.

Не случайно сказано: «при обычных условиях затвердевания». Дело в том, что при охлаждении с огромными скоростями — порядка миллиона градусов в секунду — можно подавить процесс кристаллизации и сохранить при комнатной температуре взаимное расположение атомов, характерное для жидкого металла. В этом случае получится аморфный металл или металлическое стекло, т. е. твердое (иногда даже очень твердое), но не кристаллическое тело. О металлических стеклах мы поговорим позднее, а пока продолжим наш рассказ.

Металл закристаллизовался, расставив свои частицы в определенном порядке. Раньше для простоты мы называли эти частицы атомами. Теперь уточним: частицы, располагающиеся в узлах кристаллической решетки — это ионизированные атомы, положительно заряженные ионы. Характер химической связи в металлических кристаллах таков, что атомы отдают часть внешних валентных электронов как бы в общее пользование. Получается, что остов из ионов плавает в облаке «электрон-

ного газа», омывается обобществленными электронами, не принадлежащими ни одному из них в отдельности.

Формирование ионного скелета металла, кристаллической решетки, его способность сохранять (в отличие от газа и жидкости) полученную при затвердевании форму и даже противостоять довольно мощным внешним силовым воздействиям — все это обеспечивается силами межатомного взаимодействия.

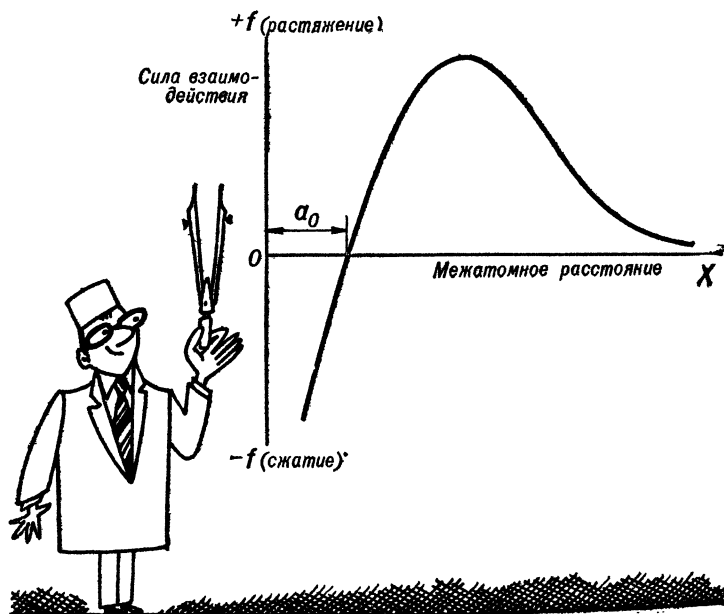


Рис. 9.

Природа сил межатомного взаимодействия и законы, их определяющие, исследуются методами квантовой механики и являются достаточно сложными. На рис. 9 качественно показана зависимость равнодействующей всех сил, действующих на два соседних иона, от расстояния между ними. Для нас сейчас важны следующие два обстоятельства.

Во-первых, сила взаимодействия  $f$  равна нулю в точке, определяющей равновесное расстояние между ионами  $a_0$ . Во-вторых, вблизи точки равновесия зависимость силы взаимодействия от расстояния между ионами близка

к линейной. Это позволяет предложить довольно грубую, но зато наглядную модель строения кристалла (рис. 10). Его можно представить в виде пружинок, к концам которых прикреплены ионизированные атомы, занимающие узлы решетки. Пружинки можно считать ненагруженными ( $f = 0$ ), но если появится внешняя сила, требующая увеличения размера тела, например, в направлении  $X$ , они сразу же начнут работать, стремясь сохранить целостность ансамбля атомов (ионов). Всякая попытка деформировать или разрушить металл наталкивается на противодействие этих «пружин».

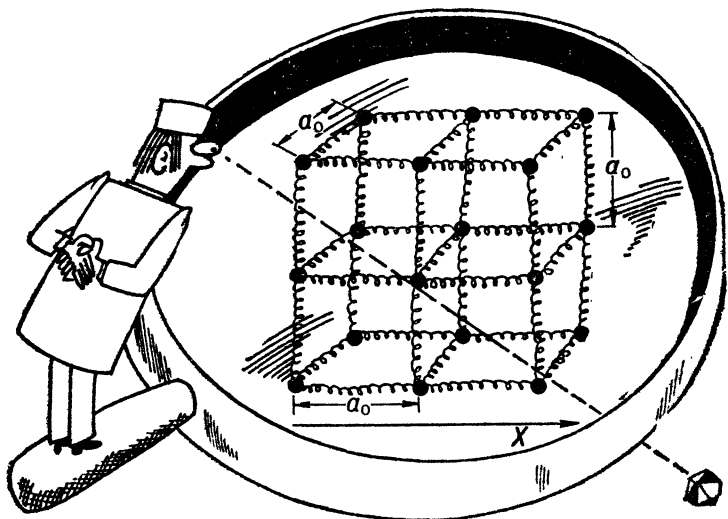


Рис. 10.

Если мы попытаемся удалить атомы друг от друга (увеличить  $X$ ), возникнет сила взаимного притяжения ( $+f$ ), которая будет стремиться вернуть атомы в исходные позиции, находящиеся на расстоянии  $a_0$  друг от друга. Попытка сблизить атомы (уменьшить  $X$ ) ведет к появлению силы обратного знака ( $-f$ ), стремящейся снова восстановить начальное состояние. Этими особенностями межатомного взаимодействия и обусловлены, во-первых, само свойство упругости металлов, а, во-вторых, — закон упругой деформации, известный как закон Гука.



## § 1. Закон Гука, а модуль — Юнга

Английский физик, архитектор и инженер Роберт Гук, член Лондонского Королевского общества, интересовался свойствами упругости металлов в связи с проблемой создания пружинных часов, которые были очень нужны современным ему кораблям. Используемые в те времена маятниковые часы работали ненадежно, проблема стояла остро. Ею занимался, в том числе, и знаменитый голландец Гюйгенс, изобретатель маятниковых часов, создатель волновой теории света и автор многих других блестящих работ в области физики, математики и астрономии. Между Гуком и Гюйгенсом шел спор о праве считаться создателем пружинных часов.



Рис. 11.

Результаты своих измерений Гук опубликовал в 1676 г. в виде анаграммы из латинских букв: *ceiinosssttuu*. В анаграмме буквы расставлены по алфавиту, но если расположить их в правильном порядке, известном только автору, то должна получиться фраза, выражающая суть дела. Так зашифровывали в те времена свои открытия, если не было полной уверенности в их достоверности. Этим как бы делалась заявка на приоритет на случай, если кто-нибудь вдруг опередит автора. Гук три года спустя, убедившись в своей правоте, опубликовал расшифровку анаграммы. Краткая формулировка его закона на латыни записывается так: «*Ut tensio sic vis*», что в переводе означает: «Каково удлинение, такова и сила».

Между прочим, с этими анаграммами и борьбой за приоритет в те времена происходили подчас комичные истории. Так, Гюйгенс, впервые увидев в телескоп кольцо Сатурна, тоже опубликовал свое открытие в виде анаграммы. Один из околонуучных ловкачей, занимавшихся вместо кропотливых изысканий расшифровкой опубликованных анаграмм, сумел «прочесть» запись Гюйгенса, решив, что она относится к спутникам Марса. Получилось: «Привет вам, близнецы, Марса порожденье». Какой же был конфуз, когда Гюйгенс, проверив свои наблюдения, сам расшифровал свою анаграмму: из тех же букв (тоже на латыни) составила фраза: «кольцом окружен тонким, плоским, нигде не прикасающимся, к эклиптике наклоненным».

Но вернемся к закону Гука. Каково удлинение, такова и сила. На современном, более строгом, но и более скучном языке это означает, что удлинение тела прямо пропорционально действующей на него растягивающей силе. Несомненно Гук знал, что его утверждение относится к случаю, когда поперечное сечение растягиваемого тела и его исходная длина остаются постоянными. Более длинные стержни давали, конечно, большее удлинение. Он знал также, что при постоянной величине силы вызываемое ею удлинение стержня обратно пропорционально площади его поперечного сечения, и, кроме того, что у стержней одинакового сечения и длины из разных материалов при одном и том же усилии будет разное удлинение. Однако Гук не сумел скомбинировать результаты своих экспериментов в такой форме, чтобы охарактеризовать упругость как свойство самого материала, не зависящее от размеров и формы конструкции. Оставался всего один шаг до привычной нам формулировки закона упругости, и этот шаг был сделан английским ученым Томасом Юнгом лишь более 100 лет спустя — в самом конце XVIII века.

Юнг понял, что если удлинение  $\Delta l$  прямо пропорционально силе  $F$  и исходной длине  $l_0$  и обратно пропорционально площади сечения  $S$  растягиваемого стержня, то это можно выразить простой формулой

$$\Delta l = \text{const } F l_0 \frac{1}{S}$$

или

$$\frac{F}{S} = \text{const } \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Теперь ясно, что слева от знака равенства записано напряжение  $\sigma$ , а справа — относительное удлинение  $\epsilon$ . Итак,

$$\sigma = E\epsilon,$$

причем, коэффициент пропорциональности в этой формуле — константа  $E$  — получил название модуль Юнга. Численно модуль Юнга, очевидно, равен напряжению, которое вызывает упругую деформацию, равную 1 или 100 %. Но, если вспомнить, что относительная деформация  $\epsilon = \Delta l/l_0$ , то окажется, что  $\epsilon = 100\%$  соответствует удвоению исходной длины.

Такие большие упругие деформации выдерживает резина, но ни один металл их выдержать не может. При гораздо меньших деформациях металлов они начинают либо деформироваться пластически, т. е. не возвращаются в исходное состояние, либо разрушаются. Мы увидим далее, что чисто упругая деформация металлов не превышает обычно нескольких десятых долей процента, поэтому  $E$  — это напряжение, которое вызвало бы удвоение длины стержня, если бы можно было получить такую огромную упругую деформацию.

Закон Гука справедлив и для случая упругой сдвиговой деформации  $\gamma$ , которую вызывает касательное напряжение  $\tau$  (рис. 8):

$$\tau = G\gamma.$$

Здесь фигурирует уже другая константа  $G$ , которую называют модулем сдвига, а величина  $\gamma$  обычно мала.

Модули упругости  $E$  и  $G$  связаны между собой ( $G \approx \frac{3}{8} E$ ) и являются такими же фундаментальными константами материала, как, например, температура плавления. Модуль упругости характеризует силы межатомного взаимодействия. Чем больше угол наклона к горизонтальной оси кривой, изображенной на рис. 9, вблизи точки равновесия, тем мощнее наши пружинки, тем сильнее они сопротивляются смещениям атомов от исходных позиций.

Чтобы получить представление о том, какое напряжение потребовалось бы для упругого удвоения длины разных материалов, а заодно сопоставить их упругие свойства, заглянем в табл. 1, где сведены значения модуля Юнга некоторых металлов и неметаллов.

Таблица I

Материал	$E, \text{МПа} \cdot 10^{-4}$	Материал	$E, \text{МПа} \cdot 10^{-4}$
Алюминий	7	Кость	3
Медь	10	Древесина	1
Сталь	20	Резина	0,0007
Стекло	7		

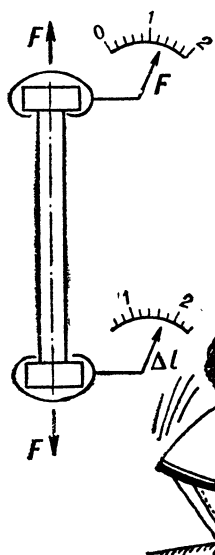
Из таблицы видно, что если бы, например, стальная проволочка поперечным сечением  $1 \text{ мм}^2$  могла выдерживать, не разрушаясь, упругую деформацию  $\epsilon = 100 \%$ , то на ней можно было бы подвесить огромный 20-тонный самосвал. К сожалению, эта картинка далека от реальности. Теоретическая оценка прочности на разрыв, как мы увидим в гл. 5, дает значение разрушающегося напряжения в 5—10 раз меньшее модуля Юнга, а фактическая прочность используемых в технике металлов еще меньше — в сотни, а иногда в тысячи раз.

Хотя это обстоятельство сильно огорчает нас, справедливости ради надо признать, что ни Гук, ни его закон, ни даже Юнг в этом не виноваты. Более того, благодаря их исследованиям мы теперь не задумываясь рисуем первый участок диаграммы, описывающей механические свойства металлов — так называемой диаграммы деформации.

## § 2. Диаграмма деформации

Как-то само собой получилось, что свирепый Прокруст стал чуть ли не главным героем первой части нашей книги. Конечно, это отрицательный герой, и мотивы его действий мы не можем одобрить. Однако сам его метод заслуживает внимания. По сути дела в несколько модернизированном виде он используется в современных испытательных машинах, предназначенных для растяжения металлических образцов. На сегодня это самый распространенный метод измерения механических свойств во всех соответствующих лабораториях мира. Суть его в следующем. Из испытуемого металла изготавливают образец с головками для его крепления в зажимах машины и растягивают обычно с постоянной скоростью, регистрируя значения силы  $F$  и абсолютного удлинения  $\Delta l$  (рис. 12).

На рисунке процедура испытания изображена, конечно, схематически. На самом деле испытательная машина представляет собой довольно сложное устройство, снабженное современной электронной аппаратурой. Лучшие из них дороже самого комфортабельного автомобиля.



Машина дает достоверные объективные данные о всех стадиях процесса испытания. Ее самописцы рисуют диаграмму в координатах « $F - \Delta l$ », которую легко преобразовать в диаграмму « $\sigma - \epsilon$ ». Для этого надо каждое значение силы  $F$  разделить на площадь поперечного сечения

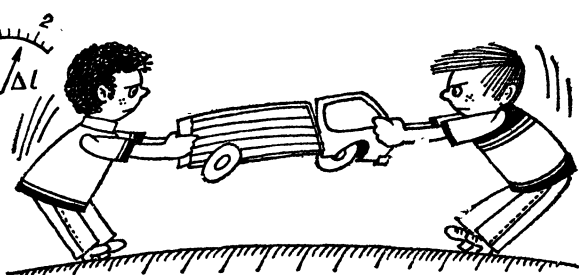


Рис. 12.

образца  $S$ , а каждое значение абсолютного удлинения  $\Delta l$  — на длину образца. Диаграмму « $\sigma - \epsilon$ » называют диаграммой деформации. Пример такой диаграммы для пластичного материала показан на рис. 13. Сейчас займемся ее первым, линейным участком.

### § 3. Почему мы говорим: «ластик»

Каждому со школьной скамьи известно это слово. Ластик — наш первый помощник в исправлении наших первых ошибок. Тем более странно, что само это слово содержит ошибку, точнее — в нем со временем исчезла одна буква. Эластик (elastik) означает «упругий». Это слово происходит от греческого *elastos* — гибкий, тягучий. Еще в начале XX века гимназисты говорили: «гуммиэластик» — упругая резинка. Но время превра-

тило это слово сначала в «гуммиластик», а потом оставило от него только вторую половину.

Все же мы хорошо знаем, что такое эластичный материал — это значит гибкий, немнущийся, а в точном значении слова — упругий. Металлы тоже в определенных

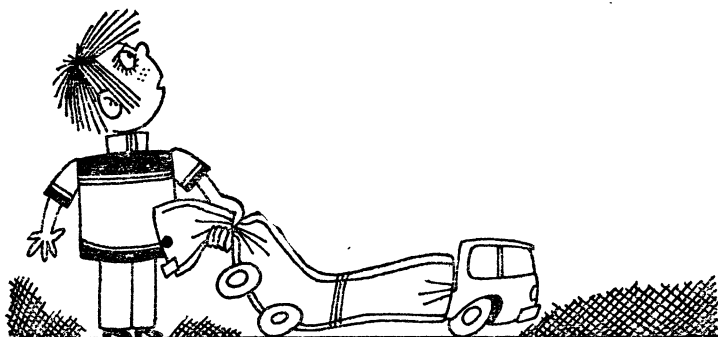
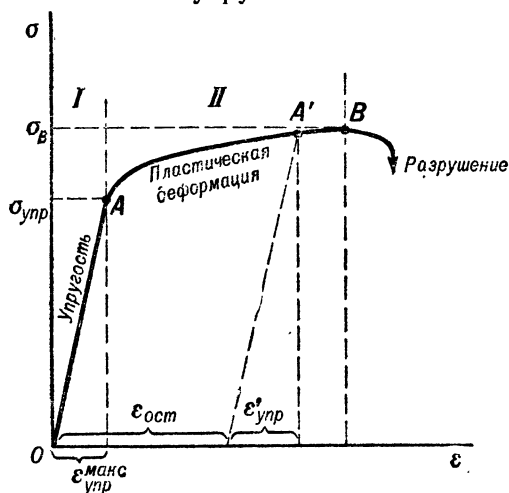


Рис. 13.

пределах обладают этим свойством. В каких же именно пределах?

На языке диаграммы деформации этим пределом является точка А — граница первого участка. Абсцисса точки А представляет собой максимальную деформацию материала, в пределах которой он ведет себя упруго.

Обозначим ее  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$ . Ордината — напряжение, которое вызывает эту деформацию, — называется пределом упругости,  $\sigma_{\text{упр}}$ .

Уточним смысл  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$ . Важнейшим признаком упругой деформации является ее обратимость — при разгрузке, т. е. устранении силы, вызвавшей деформацию, тело возвращается к своим исходным размерам и форме. Если речь идет об одежде, то, называя материал «немнущимся», мы подразумеваем именно это свойство обратимости деформации. Таким образом, если деформация не выходит за пределы упругой зоны  $OA$ , линия разгрузки идет вдоль прямой  $AO$ , и деформация уменьшается до нуля; размеры образца после разгрузки останутся теми же, что и до нагружения, а значит, атомы (ионы) возвратятся в исходные позиции.

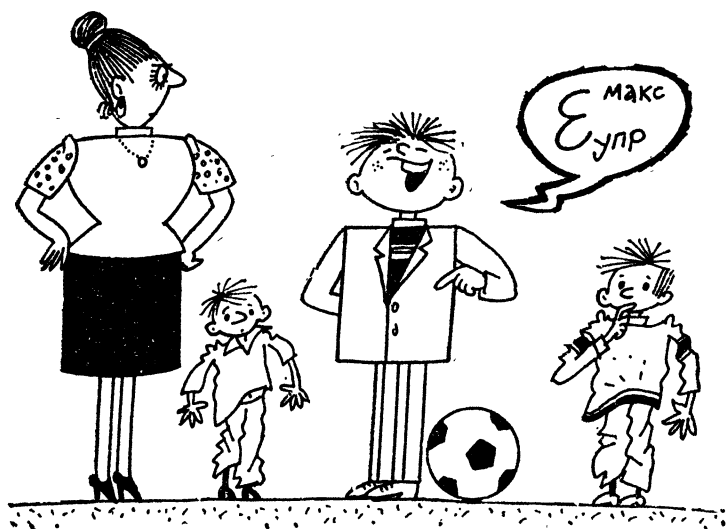


Рис. 14.

Мы уже знаем, что это вызвано действием пружин — сил межатомного взаимодействия (рис. 10), которые при разгрузке возвращают атомы 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  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$ ? Упругая деформация продолжает нарастать прямо пропорционально

растущей величине напряжения, но само напряжение теперь значительно медленнее увеличивается с ростом деформации, чем это было в пределах упругого участка. Линия разгрузки в соответствии с законом Гука идет параллельно прямой  $AO$ , и появляется вторая составляющая деформации — пластическая. Общая величина деформации, соответствующая некоторой точке  $A'$ , складывается теперь из  $\epsilon'_{упр}$ , которая исчезнет при разгрузке, и  $\epsilon_{ост}$  — остаточной деформации, которая остается после устранения нагрузки. Из рис. 13 видно, что  $\epsilon'_{упр}$  больше, чем  $\epsilon_{макс\ упр}$ , поэтому символ «макс» здесь не означает, что нельзя получить упругую деформацию большей величины. Он означает лишь, что если общая деформация превысит  $\epsilon_{упр}$ , то она уже не будет чисто упругой и форма тела после разгрузки будет отличаться от исходной. Материал становится «мнущимся», это уже не вполне качественный эластик.

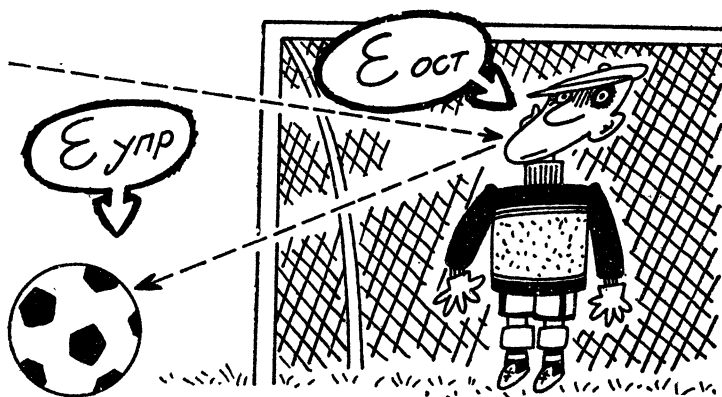


Рис. 15.

Пластическая деформация продолжается вплоть до точки  $B$ , в которой напряжение достигает максимума. Это максимальное напряжение, которое может выдержать материал, называют пределом прочности или временным сопротивлением. После того как достигнуто это напряжение  $\sigma_B$ , вскоре наступает разрушение — образец разрывается.

Таким образом, если мы хотим, чтобы наше изделие «пружинило», чтобы оно не давало остаточных деформаций,



ций, нельзя, нагружая его, превышать предел упругости. Тогда и деформация не выйдет за пределы  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$  и полностью исчезнет при разгрузке. Важно, что в этой области напряжений и деформаций они связаны простым, линейным законом Гука. Это очень облегчает расчеты конструкторам. Однако мы знаем, что линейная связь между межатомными силами и расстояниями действует лишь при небольшом удалении атомов от равновесных положений.

Пределы упругости металлов обычно очень низки. В следующей главе мы узнаем, почему пластическая деформация металлов начинается и развивается при низких напряжениях, а здесь примем как факт, что предел упругости большинства чистых металлов — порядка 10—100 МПа. Даже у лучших сортов стали  $\sigma_{\text{упр}}$  редко превышает  $10^3$  МПа.

В ходе пластической деформации скорость роста напряжения на 2—3 порядка ниже, чем в упругой зоне. Тангенс угла наклона диаграммы деформации к горизонтальной оси (рис. 13) на первом участке равен модулю Юнга  $E$ , который для многих металлов имеет порядок  $10^4$ — $10^5$  МПа, а на втором участке тангенс этого угла обычно порядка  $10^3$  МПа.

Теперь, пользуясь законом Гука, мы можем оценить предельную величину упругой деформации металлов:

$$\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}} = \frac{\sigma_{\text{упр}}}{E};$$

значит, величина  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}} \sim (10^1 \div 10^2)/(10^4 \div 10^5)$ , т. е. порядка  $10^{-3}$  и составляет десятые доли процента. В пластической области даже у весьма пластичных металлов к моменту разрушения величина упругой деформации может увеличиться еще приблизительно на столько же, так что все наши «упругие достижения» не выходят за пределы 1 % деформации. В этой области закон Гука соблюдается достаточно хорошо.

Как можно экспериментально проверить закон Гука при больших деформациях? Казалось бы просто — «запретить» пластическое течение металла. Но этот путь ведет к другому краю пропасти — металл, у которого отняли способность пластически деформироваться, становится хрупким и часто разрушается при напряжениях ниже  $\sigma_{\text{упр}}$ . И все же удалось «уличить» Гука с помощью особого рода кристаллов — «усов», которые способны

упруго деформироваться на несколько процентов, так как имеют прочность, близкую к теоретически возможной. Но об этом — в гл. 5, а сейчас мы от сухих цифр перейдем к близким нам примерам и решим следующий вопрос.

#### § 4. Почему стальная проволока пружинит, а медная нет?

Хотя в лабораториях металлы чаще всего испытывают на растяжение, наиболее распространенной схемой нагружения в практике является изгиб. На изгиб работают коленчатые валы, оси вагонов, крылья и корпуса самолетов и др. Понятно, что изгиб не является каким-то особым видом деформации; это всего лишь комбинация двух основных видов — растяжения и сжатия.

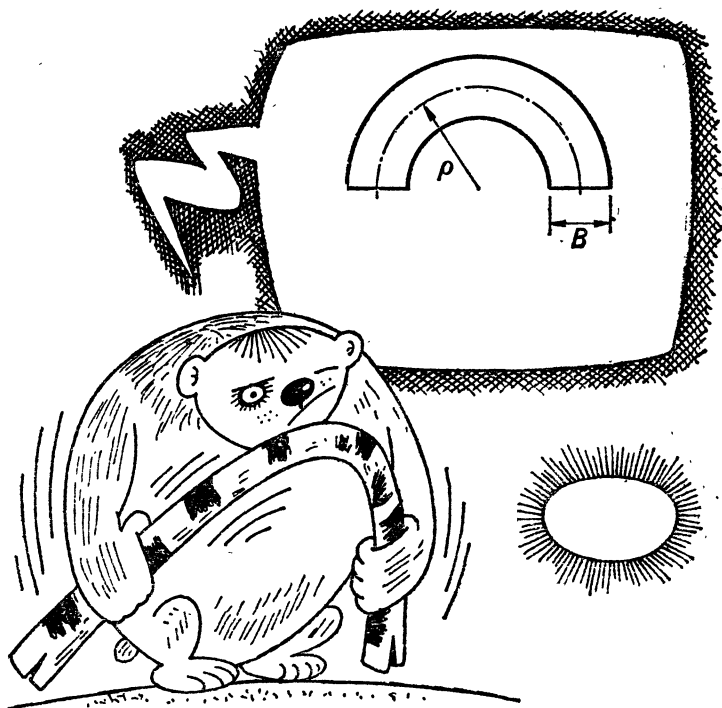


Рис. 16.

Если мы изогнем по определенному радиусу  $\rho$  тонкую плоскую пластину толщиной  $B$  (рис. 16), то

ее внешние слои будут растянуты, а внутренние сжаты. На середине толщины, т. е. на так называемой нейтральной оси, деформация будет равна нулю, и ее величина будет нарастать линейно по мере движения от этой оси к поверхности. Максимальная относительная деформация будет, конечно, на верхней и нижней поверхностях пластины, а ее величину легко определить. Длина внешней полуокружности  $\pi(\rho + B/2)$ , а исходная длина этого слоя  $\pi\rho$ , поэтому относительная деформация:

$$\epsilon = \frac{\pi(\rho + B/2) - \pi\rho}{\pi\rho} = \frac{B}{2\rho}.$$

Если величина этой деформации  $\epsilon$  не превышает  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$ , то при разгрузке она исчезнет, и пластина снова станет плоской, поскольку, как видно из рис. 9, закон Гука в равной степени справедлив и для растяжения, и для сжатия. Теперь рассмотрим распространенный пример с лезвием для бритвы. Если оно имеет толщину 0,08 мм

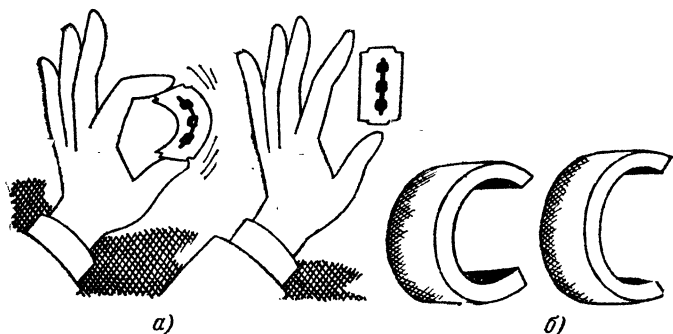


Рис. 17.

и изготовлено из хорошей стали с пределом упругости 1000 МПа, то  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$  составит  $\sim 0,5\%$  (модуль Юнга стали примерно такой же, как у железа —  $2 \cdot 10^5$  МПа, поскольку примеси мало меняют модуль). Это значит, что можно изогнуть это лезвие в полукольцо радиусом 10 мм (рис. 17,а) и при разгрузке оно распрямится, так как  $\epsilon = 0,08/20 = 0,4\%$ . Каждый легко может убедиться в этом — лезвие пружинит.

Если мы попытаемся изогнуть таким же полукольцом пластину из той же стали, но толщиной 2 мм (рис. 17,б), то деформация наружных слоев составит  $\sim 10\%$ . Напря-

жение, которое при этом возникает, должно превышать  $\sigma_{\text{упр}}$ , поскольку сама деформация выходит далеко за пределы  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$ . На диаграмме (рис. 13) такая деформация соответствует приблизительно точке  $A'$ . При разгрузке от точки  $A'$  исчезнет лишь упругая часть деформации — приблизительно 0,5 %, а остаточная деформация составит 9,5 %. Значит, пластическая деформация здесь почти в 20 раз больше упругой (на рис. 13 масштаб по горизонтальной оси несколько искажен), и когда мы снимем нагрузку, концы полукольца лишь немного разойдутся в стороны, но оно останется почти таким же полукольцом, только чуть большего радиуса.

Хотя о механизме пластической деформации и о способности металла запоминать форму пойдет речь в следующих главах, уже здесь мы можем взглянуть на описанную ситуацию под несколько иным углом. Буквально слово «деформация» означает «изменение формы». Когда при разгрузке деформация исчезает, тело возвращается к исходной форме. Между прочим, это означает, что находясь под любым напряжением, не превышающим  $\sigma_{\text{упр}}$ , металл «помнит» свою первоначальную форму и «вспоминает» ее сразу после устранения нагрузки. Так было и с нашим лезвием.

Признаком пластической деформации является ее необратимость. После разгрузки появляются остаточные изменения размеров и формы, т. е. память металлов начинает давать перебои. Способность металлов деформироваться пластически, конечно, ограничена — рано или поздно произойдет разрушение. Но величина  $\epsilon_{\text{ост}}$  перед разрушением у пластичных металлов составляет десятки процентов, т. е. на 2 порядка превышает  $\epsilon_{\text{упр}}$ . Это уже практически полный «склероз». Металл забывает исходную форму и принимает новую.

На такой «забывчивости» металлов основаны промышленные процессы их переработки, когда мы проделываем, например, путь от огромного слитка до тонкой проволочки.

Теперь уже наверное понятно, как разобраться с вопросом о стальной и медной проволоке. Проволока из хорошей стали диаметром 1 мм, будучи изогнута по оправке радиуса 100 мм, находится еще «в здоровой памяти», так как ее максимальная деформация составляет 0,5 %. Она полностью распрямится, если отпустить ее концы. Примерно так проверяли качество знаменитых булатных

клинков на Златоустовском металлургическом заводе. Клинки изгибали до соприкосновения его кончика с эфесом и годными считали те, которые полностью распрямлялись.

Медь, как видно из табл. 1, имеет вдвое более низкий модуль упругости, чем железо или сталь, но главное, что она значительно сильнее уступает стали по величине  $\sigma_{\text{упр}}$ . Предел упругости технической меди редко достигает 100 МПа. Подсчитав по гуковской формуле  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}} = 100/10^5 = 0,1 \%$ , мы убедимся, что, будучи изогнута по той же оправке, миллиметровая медная проволока окажется пластически деформированной. Из полной деформации 0,5 % лишь малая часть (0,1 %) придется на долю упругой, а остальная (0,4 %) — на долю пластической деформации. Концы проволоки после разгрузки,



Рис. 18.

конечно, немного разойдутся в стороны, но сама она будет представлять собой уже не прямую, а часть окружности радиусом приблизительно 125 мм. Эти несложные расчеты и есть обоснование наших ощущений, когда мы говорим «пружинит» или «не пружинит». В описанной

ситуации медная проволока будет прекрасно пружинить, если уменьшить ее диаметр до 0,05 мм. Таким образом, вопрос заключается лишь в соотношении между пределом упругости и модулем Юнга материала (которое определяет  $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$ ) и в величине относительной деформации при испытании.

## § 5. Ле Шателье против Гука

Как мы уже знаем, во времена Гука, т. е. в начале второй половины XVII века, остро стояла проблема создания пружинных часов. Водяные и солнечные часы к тому времени уже отжили свой век, а маятниковые не устраивали многих и в частности мореплавателей. Однако именно наблюдения за колебаниями маятника помогут нам разобраться в природе явлений, объединяемых общим термином «неупругость». К числу этих явлений относятся такие, как последействие, релаксация, внутреннее трение в металлах.

Мы уже говорили о том, что простое линейное соотношение между силой и удлинением, установленное Гуком, верно лишь при малых деформациях, а при больших, хотя деформация остается чисто упругой и исчезает после разгрузки, она уже зависит от напряжения нелинейно.

Но есть другая важная причина отклонения от гукского поведения металла при напряжениях, значительно меньших  $\sigma_{\text{упр}}$ , т. е. в той области диаграммы деформации, которую мы привыкли считать чисто упругой. Эта причина связана с действием фактора времени.

Термин «релаксация» происходит от латинского *relaxatio*, что в буквальном переводе означает «ослабление». Чтобы понять сущность релаксационных процессов, не надо далеко ходить за примерами. Каждому случалось втискиваться в переполненный автобус или вагон метро, и всем знакомы связанные с этим неприятные ощущения. В бок впивается чей-то локоть, кто-то наступил на вашу ногу, а сосед еще норовит читать газету, и как на грех он выше ростом, так что его рука лежит на вашем плече. Но вот поезд тронулся и постепенно напряжение со стороны соседей ослабевает, релаксирует, все утрясается, каждый находит сравнительно удобную позицию и позу. Или, например, человек устал от тяжелой физической работы. Руки и ноги «гудят», в мышцах как бы накопи-

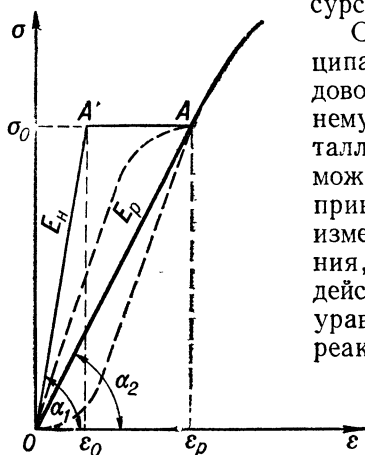
лось напряжение. Человек прилег отдохнуть — постепенно напряжение спадает, исчезает неприятное ощущение усталости. Между прочим, совокупность процессов, вызывающих релаксацию внутренних напряжений в металле, скажем, после сильной пластической деформации или закалки, так и называют — отдых. Металл тоже может отдыхать, и термин «отдых» широко используется в научной литературе. Позже мы еще поговорим о путях формирования научной терминологии. А сейчас вернемся к понятию релаксации. Этот термин приобрел в дальнейшем более широкий смысл, и теперь им пользуются для описания многих процессов постепенного приближения к равновесию, после вызванного каким-либо воздействием изменения состояния системы.



Рис. 19.

Известный французский физик и химик Анри Луи Ле Шателье (1850 — 1936), избранный в 1926 г. почетным иностранным членом Академии наук СССР, установил важную закономерность, которая, как оказалось, имеет довольно общий характер. Принцип Ле Шателье можно сформулировать так: внешнее воздействие, выводящее

систему из положения равновесия, стимулирует в ней процессы, стремящиеся ослабить это воздействие. Ни одна система не соглашается безропотно переносить насилие над ней и мобилизует все свои внутренние ресурсы, чтобы ему противостоять.



С проявлением действия принципа Ле Шателье мы сталкиваемся довольно часто и еще не раз к нему вернемся. Сопротивление металла упругой деформации также можно объяснить с помощью этого принципа: под внешней нагрузкой изменяются межатомные расстояния, а силы межатомного взаимодействия меняются так, чтобы уравновесить внешнюю силу. Но реакция системы атомов металла



Рис. 20.

на приложение внешней силы этим не ограничивается; как уже сказано, система мобилизует все свои ресурсы для борьбы с внешним воздействием. Какая возможность есть в ее распоряжении?



Вспомним о термическом сжатии и расширении: при изменении температуры меняются и расстояния между атомами. Мы еще будем говорить о том, как металлы, зажимающие форму, можно заставить сжиматься (!) при нагреве и какие это открывает великолепные перспективы для техники. Но это лишь «маленькие хитрости», которые позволяют в какой-то мере обойти, но никак не отменяют известный закон: тела при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. Чтобы воспрепятствовать попытке увеличить расстояния между его атомами, растянутый металлический образец «постарается» понизить свою температуру.

Теперь снова рассмотрим уже знакомую нам схему изгиба металлической пластины (рис. 16). Ее верхняя половина растянута, а нижняя — сжата. Если нагружение произошло достаточно быстро, то теплопередачей можно пренебречь, и температура нижних слоев будет выше, чем у верхних, растянутых. Затем возникнет поток тепла, направленный снизу вверх. Следовательно, новое равновесное расстояние между атомами, а значит, и величина относительной деформации, которая определяется законом Гука, достигаются не сразу, а по истечении определенного промежутка времени, необходимого для выравнивания температуры.

Посмотрим, как это обстоятельство отражается на виде диаграммы деформации в упругой области (рис. 20). Закон Гука, который, как теперь ясно, полностью справедлив лишь для случая бесконечно медленного нагружения, выражается на графике прямой линией  $OA$ . Если напряжение растет медленно, то в каждый данный момент успевает установиться равновесное расстояние между атомами, а система атомов проходит через последовательность равновесных состояний. Если же растяжение ведется достаточно быстро, то, в силу принципа Ле Шателье, образец охлаждается, в результате чего расстояния между атомами будут в первый момент меньше тех равновесных, которые отвечают гуковскому соотношению. Значит, и относительное удлинение  $\epsilon_0$  меньше  $\epsilon_p$ . В свою очередь это означает, что связь между напряжением и деформацией в первый момент описывается не модулем Юнга, а другой, большей величиной ( $\alpha_1 > \alpha_2$ ). Далее при неизменном значении напряжения  $\sigma_0$  расстояние между атомами будет увеличиваться вследствие нагрева образца от окружающего воздуха и соответствующе-

щего термического расширения. Величина относительной деформации будет постепенно расти от  $\epsilon_0$  до  $\epsilon_p$  — по линии  $A'A$ . Этот процесс называют релаксацией упругой деформации или упругим последствием. Модуль  $E_n$ , равный  $\operatorname{tg} \alpha_1 = \sigma_0/\epsilon_0$ , называют нерелаксированным. Он определяет связь между напряжением и деформацией, когда процесс релаксации еще не начался. Величина  $E_n$  больше величины модуля Юнга, соответствующего медленному нагружению (его называют релаксированным модулем  $E_p$ ).

Фактически теплообмен образца с окружающей средой, а значит, и процесс релаксации идет уже в ходе нагружения и вместо ломаной  $OA'A$  мы получаем плавную пунктирную кривую  $OA$ , которая, однако, располагается левее гуксовой прямой. Выходит, что в каждый данный момент нагружения связь между  $\sigma$  и  $\epsilon$  описывается некоторым эффективным модулем, который больше  $E_p$ , но меньше  $E_n$ .  $E_n$  и  $E_p$  относятся к двум крайним случаям: в рассмотренном примере  $E_n$  — к адиабатическому, когда в ходе нагружения исключен теплообмен образца с окружением, а  $E_p$  — к изотермическому, когда в результате теплообмена (медленное нагружение) температура образца не успевает меняться.

При разгрузке все процессы пойдут в обратном порядке, и мы получим пунктирную кривую  $AO$ , симметричную кривой  $OA$  относительно прямой  $OA$ . Многократно повторяя циклы «нагружение — разгрузка» с той же скоростью, мы будем двигаться по петле  $OA O$ . А теперь задумаемся над тем, что означает образование петли на диаграмме  $\sigma — \epsilon$ .

## § 6. Работа упругой деформации

Если бы разбойник Прокруст умел измерять напряжения, то мог бы точно вычислить работу, затрачиваемую им на его черное дело. Действительно, работа — это произведение силы на путь. При растяжении образца путь равен абсолютному удлинению  $\Delta l$ , а работа  $A = F \Delta l$ , где  $F$  — среднее значение силы, вызвавшей удлинение  $\Delta l$ . Теперь найдем величину работы, необходимой для упругой деформации единицы объема образца. Поскольку речь идет об упругой деформации, среднее значение силы будет равно  $F/2$ , так

как сила линейно растет от 0 до  $F$ . Объем образца представим в виде произведения площади его поперечного сечения  $S$  на длину  $l_0$ , и тогда удельная работа

$$a = \frac{1}{2} \frac{F \Delta l}{S l_0} = \frac{1}{2} \sigma \epsilon.$$

Итак, работа упругой деформации на единицу объема (удельная работа деформации) равна половине произведения напряжения на величину относительной деформации. При напряжении  $\sigma_0$  на рис. 20 она будет численно равна площади треугольника  $OA\epsilon_p$ .

Легко доказать, что удельная работа деформации  $a$  всегда равна площади фигуры, ограниченной диаграммой, вертикалью, проведенной из той точки диаграммы, до которой мы дошли в процессе нагружения, и горизонтальной осью (площади под соответствующим участком диаграммы).

Теперь понятно, что если мы нагружаем и разгружаем образец очень медленно (изотермически) и линии нагрузки и разгрузки на диаграмме деформации совпадают — прямые  $OA \rightarrow AO$ , — то при нагружении затрачивается ровно столько же работы, сколько выделяется при разгрузке. В действительности же при нагружении затрачивается работа, равная площади  $OA\epsilon_p$  (где  $OA$  — левая пунктирная кривая), а при разгрузке высвобождается работа  $AO\epsilon_p$  (где  $OA$  — правая пунктирная кривая). Площадь самой петли есть мера механической энергии, которая утеряна в цикле нагружение — разгрузка. Таким образом, появление петли на диаграмме  $\sigma - \epsilon$  свидетельствует о рассеянии энергии в цикле нагружение — разгрузка.

## § 7. Почему звонит колокол, или внутреннее трение в металлах

В замечательном романе Э. Хемингуэя «По ком звонит колокол», конечно, не рассматривается вопрос, почему он звонит. Автора и читателей волнуют другие проблемы. Да собственно, в вопросе о том, почему звонит колокол, нет особой загадки. Удар язычка о стенки колокола вызывает колебания колокола, а затем и звуковую волну определенной частоты, которая воспринимается барабанными перепонками ушей. Интересен другой вопрос. Почему так долго звучит колокол после

каждого удара язычка? Или, почему так долго не затухают в нем колебания? Здесь мы вернемся к примеру с маятником. Если прикрепить к маятнику снизу карандаш, а под ним с постоянной скоростью пустить бумажную ленту перпендикулярно плоскости качания, то карандаш нарисует известную всем кривую, изображенную



Рис. 21.

на рис. 21. Колебания маятника постепенно затухают в результате действия внешних сил сопротивления (трения о воздух, о бумагу и пр.). Затухание колебаний есть не что иное, как процесс релаксации — постепенного приближения к равновесию, из которого был выведен маятник. Закон изменения амплитуды колебаний маятника со временем (пунктирная кривая на рис. 21) определяется формулой:

$$A = A_0 e^{-Bt},$$

Это знаменитая экспонента — показательная функция с основанием, равным основанию натурального логарифма, которая управляет многими процессами в природе. В написанном выражении  $A_0$  — начальная амплитуда колебаний маятника,  $t$  — время, а  $B$  — константа, обратная величина которой называется временем релаксации. В начальный момент ( $t = 0$ ) амплитуда  $A = A_0$ , а через промежуток времени, равный  $1/B$ , она уменьшится в  $e$  раз. Хотя полное равновесие в принципе достигается лишь при  $t = \infty$  ( $A = 0$ ), доля релаксационных изменений, происходящих за время  $1/B$ , считается достаточно «лвиной».

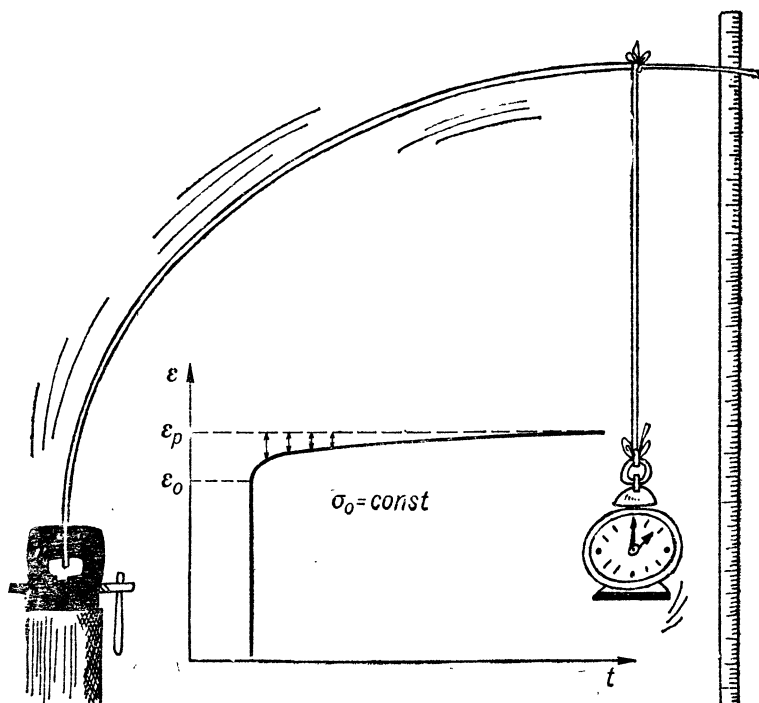


Рис. 22.

Экспоненциальной зависимости от времени подчиняется и величина деформации в ходе релаксационного процесса, иллюстрированного рис. 20. Если изобразить это в координатах деформация — время, то получится

такая картина (рис. 22). На участке релаксации недостающая часть деформации (недостающая до равновесного значения  $\epsilon_p$ ) уменьшается по тому же закону, что и амплитуда маятника.

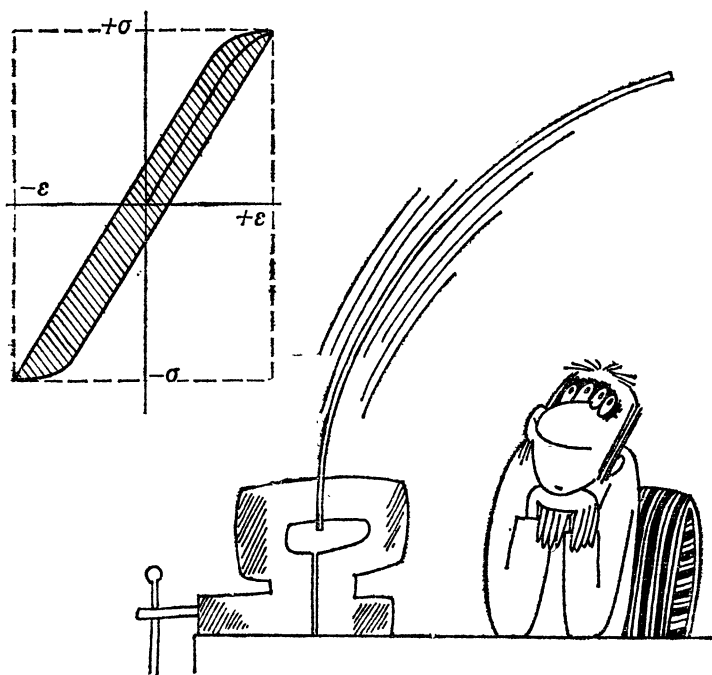


Рис. 23.

Колебания маятника затухают, как уже было сказано, из-за действия внешних сил трения. Если нам удалось бы устранить их, то маятник качался бы вечно. Если же мы возбуждем колебания металлического предмета (скажем, возьмем металлическую линейку, зажем один ее конец, а другой отведем в сторону и отпустим), то они будут затухать даже в самом крошечном вакууме и при полном отсутствии внешних источников трения. Причина затухания — наличие внутреннего трения в металлах, образование петли на диаграмме деформации вследствие протекания релаксационных процессов. Картина, изображенная на рис. 20, качественно не изменяется, если вместо цикла нагружение — разгрузка мы

имеем дело с циклом растяжение — сжатие, т. е. если напряжения и деформации циклически меняют знак. В примере с линейкой будет именно такая ситуация: она будет изгибаться то в одну, то в другую сторону, но это не спасает от появления замкнутой петли на диаграмме  $\sigma - \epsilon$  (рис. 23).

Здесь речь уже может идти об амплитуде изменения напряжения и деформации, и аналогия с маятником еще более наглядна. С течением времени уменьшается амплитуда свободных колебаний. Соответственно уменьшается и площадь заштрихованной петли, поэтому в каждом следующем цикле амплитуда изменяется все меньше. Таково свойство экспоненциальной функции: если ее показатель положителен, то она возрастает все быстрее (снежный ком), а если отрицателен, то она уменьшается с затухающей скоростью. Чем меньше отклонение от равновесия, тем медленнее система приближается к нему (рис. 21).

Скорость затухания колебаний или время релаксации характеризуется площадью петли в первом цикле, а она, в свою очередь, зависит от источника релаксации, действие которого ответственно за появление внутреннего трения.

Существует несколько различных мер внутреннего трения, которые отличаются численными коэффициентами. Одна из них — отношение энергии, потерянной за один цикл колебаний, к полной энергии цикла, т. е. отношение площади петли к площади прямоугольника со сторонами  $2\sigma$  и  $2\epsilon$ , окружающего петлю (он показан на рис. 23 пунктиром). При термоупругом затухании, о котором идет речь, это отношение порядка  $1 : 10^4$ , и соответственно внутреннее трение порядка  $10^{-4}$ , так что петля на рис. 23 изображена в искаженном масштабе.

Однако существуют и значительно более мощные источники релаксации, которые создают внутреннее трение порядка  $10^{-1}$ . Теперь уже легко ответить на вопрос, из какого материала нужно делать колокол, а из какого станину тяжелого молота или другую амортизирующую деталь или конструкцию. В первом случае надо взять материал, в котором в максимальной степени подавлены все источники релаксации, материал с минимальным внутренним трением. К таким относится, например, твердый и хрупкий сплав меди с 25 % олова, который дает хорошее, длительное звучание. Сплав той же меди

с 25—30 % марганца обладает огромным внутренним трением. Его так и называют — «немой сплав», он совсем не звучит, так как в первых же нескольких циклах колебания практически полностью гасятся из-за действия особых внутренних источников рассеяния энергии, о которых мы поговорим позже.

Более дешевым материалом с меньшим, но достаточно высоким внутренним трением, является чугун. Станины крупных станков и кузнечных молотов отливают из чугуна, в частности, по этой причине. Если бы материал станин плохо поглощал звук, в цехах стоял бы невообразимый шум, которого не вынесли бы даже тренированные уши звонаря.

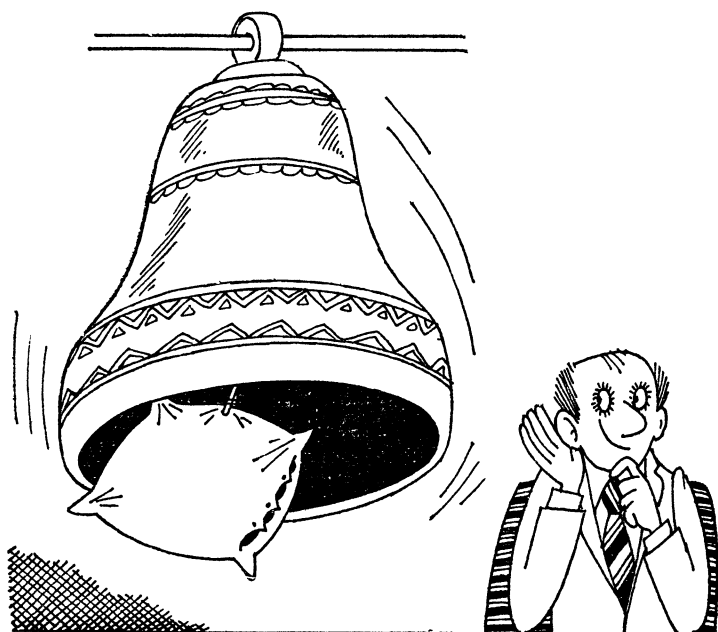


Рис. 24.

В случае рассмотренного теплового релаксационного процесса время релаксации определяется теплопроводностью материала и некоторыми другими его физическими свойствами. Допустим, что частота колебаний будет очень высокая (а ее мы можем регулировать, меняя, на-



пример, длину свободной части линейки — так скрипач регулирует высоту звука, меняя свободную длину струны). Тогда за время одного полуцикла колебаний еще не успеет начаться процесс выравнивания температуры, как напряжение уже поменяет знак. В каждый данный момент связь между напряжением и деформацией будет определяться нерелаксированным модулем  $E_n$  (рис. 20), а петля на рис. 23 выродится в прямую линию с наклоном  $\alpha_1$  (см. рис. 20). В этом предельном случае внутреннего трения нет.

Наоборот, если частота колебаний очень низка, в ходе нагружения, разгрузки и в другом полуцикле все время будет успевать устанавливаться тепловое равновесие, и мы получим прямую с наклоном  $\alpha_2$ . Внутреннего трения снова нет.

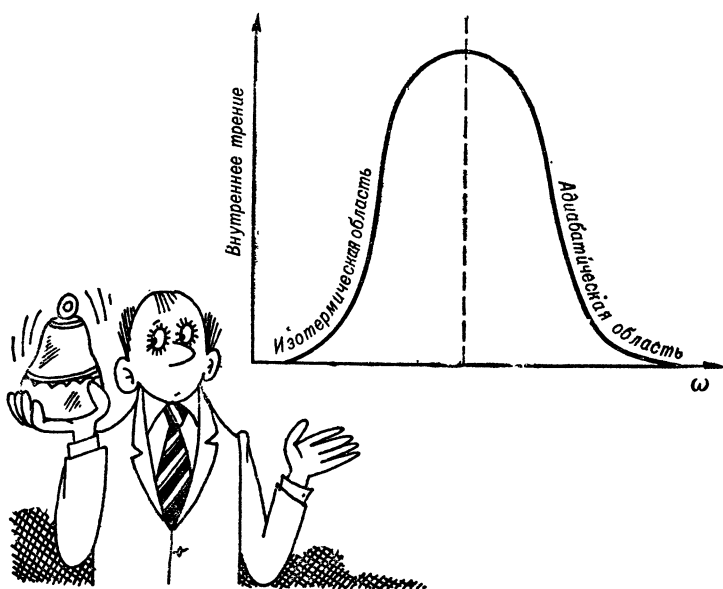


Рис. 25.

Отсюда понятно, что внутреннее трение как функция частоты колебаний будет нарастать, достигать максимума и затем спадать (рис. 25). Максимальное внутреннее трение возникает тогда, когда время одного цикла будет

совпадать со временем релаксации данного процесса, ответственного за рассеяние энергии.

Таким образом, максимальному затуханию соответствует условие  $\omega/B = \omega\tau_p = 1$ , где  $\omega$  — частота колебаний,  $\tau_p$  — время релаксации.

С одной стороны, это уточняет требования к материалу колоколов и других звучащих изделий. Для них  $\omega$  известна — это собственная частота колебаний, которая зависит от свойств материала (модуля Юнга, плотности) и от геометрии изделия. Значит, надо блокировать не все источники релаксации, а лишь те, для которых  $\tau_p$  близко к  $1/\omega$ .

С другой стороны, внутреннее трение сравнительно легко определяется экспериментально методом измерения скорости затухания свободных колебаний и некоторыми другими способами в диапазоне частот от сколь угодно низких до мегагерцевых (миллионы циклов в секунду). Это дает в руки физиков мощный инструмент исследования разнообразных внутренних процессов в металлах. Об одном интересном примере мы расскажем в следующем параграфе.

## **§ 8. Как измерять скорость диффузии атомов, когда они не диффундируют?**

Проблема диффузии — это одна из ключевых проблем физики твердого тела. Движущей силой диффузии обычно является различие концентраций растворенного вещества в разных объемах тела. Например, если в железе растворен углерод и в каких-то участках концентрация его атомов больше, чем в других, то атомы углерода будут двигаться в том направлении, где их меньше. Кристаллическая решетка большей части металлов соответствует одному из трех типов, показанных на рис. 26 упаковки ионов (шаров): гранецентрированная кубическая (рис. 26, а), гексагональная плотноупакованная (рис. 26, б) и объемноцентрированная кубическая (рис. 26, в).

При комнатной температуре железо существует в своей  $\alpha$ -модификации и имеет решетку третьего типа. Атомы углерода располагаются в межузлиях решетки основного компонента, внедряются в промежутки между его атомами. Это, между прочим, не так легко, поскольку атомы металла плотно прилегают друг к другу. Напри-

мер, в пору, соответствующую позиции в центре ребра куба, можно вписать шар радиуса 0,02 нм, так что даже маленький атом углерода не помещается в ней. Он с трудом «втискивается» на свое место и вызывает искажения в решетке, раздвигая соседние атомы железа.

В процессе диффузии атом углерода совершает «скачок» из того межузлия решетки железа, которое он занимает, в соседнее, такое же межузлие, затем в следующее и т. д. Каждый раз он с трудом «протискивается» между плотно прилегающими друг к другу атомами растворителя, прежде чем окажется в соседней позиции внедрения, где ему тоже тесно, но все же «терпимо».

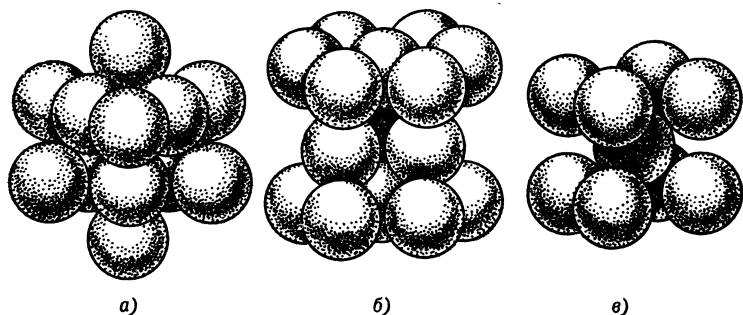


Рис. 26.

Для того чтобы диффундирующему атому совершить скачок, он должен обладать избыточной энергией (существует как бы некоторый энергетический барьер, который нужно преодолеть). Высота этого барьера и есть так называемая энергия активации диффузии  $Q$ . Чем выше температура, тем интенсивнее тепловые колебания атомов и тем легче преодолевается барьер.

Важнейшим показателем диффузионной подвижности атомов является коэффициент диффузии  $D$ . Согласно теории диффузии расстояние, на которое в среднем удаляется атом при диффузионных блужданиях за время  $t$ , пропорционально величине  $\sqrt{Dt}$ . Коэффициент диффузии имеет размерность  $\text{см}^2/\text{с}$ , так что  $\sqrt{Dt}$  — размерность длины. Понятно, что коэффициент диффузии резко увеличивается с повышением температуры. Эту зависимость впервые установил шведский ученый С. Аррениус в 1889 г.:

$$D = D_0 e^{-Q/kT}.$$

Здесь  $k$  — постоянная Больцмана, а  $D_0$  — коэффициент пропорциональности (предэкспоненциальный множитель)\*).

Чтобы измерить коэффициент диффузии какого-либо вещества в данном металле, его (или его радиоактивный

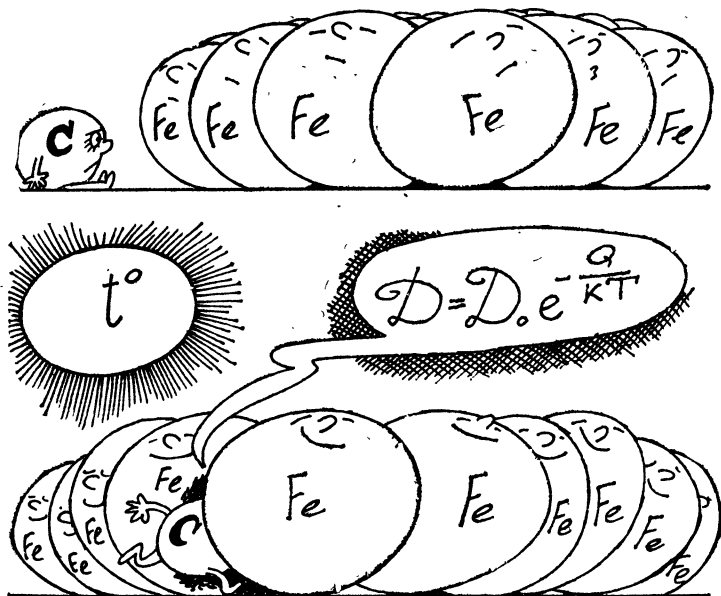


Рис. 27.

изотоп) наносят на поверхность металла, затем нагревают и длительное время выдерживают образец при высокой температуре, чтобы получить достаточно толстый слой металла со сравнительно большой концентрацией диффундирующего вещества (хотя бы около 100 мкм — чтобы можно было хорошо видеть этот слой в микроскопе и точно измерить его).

Тогда, зная диффузионный путь  $\sqrt{Dt}$  и время отжига, этим методом можно измерить коэффициент  $D$  с достаточной точностью. А как быть, если нужно знать коэффи-

\*) В книге Б. С. Бокштейна «Атомы блуждают по кристаллу» (М.: Наука, 1983. Библиотечка «Квант», вып. 28) детально рассмотрена проблема диффузии в твердых телах и убедительно показана необходимость определения параметров диффузии.

пиент диффузии при невысоких температурах, когда для получения такого слоя требуются месяцы? Здесь нет никакого преувеличения. Например, коэффициент диффузии углерода в железе при комнатной температуре порядка  $10^{-17}$  см<sup>2</sup>/с, и перемещение атома углерода всего на одно межатомное расстояние требует уже нескольких секунд. А при температуре 900—950 °С насыщение поверхности железа углеродом на глубину 1 мм (это очень распространенный в технике процесс — цементация) происходит за несколько часов. Понятно, что все дело в величине коэффициента диффузии, который при 900 °С составляет примерно  $10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с, т. е. на 10 порядков больше, чем при комнатной температуре (экспонента!). Скорость диффузии при этом увеличивается, соответственно, на 5 порядков.

Между тем параметры диффузии при низких температурах знать очень нужно. В частности, в железе и стали уже при комнатной температуре идут важные структурные изменения, связанные с перемещениями атомов углерода на небольшие расстояния. Так как же быть? На помощь приходит уравнение Аррениуса. Поскольку  $D_0$  и  $Q$  не зависят от температуры, достаточно измерить  $D$  при двух разных температурах (но обе должны быть высокими, так как нужен достаточно толстый слой). Тогда  $D_1 = D_0 e^{-Q/kT_1}$  и  $D_2 = D_0 e^{-Q/kT_2}$ , и в этой системе двух уравнений остается два неизвестных. Найдя  $D_0$  и  $Q$ , мы можем методом экстраполяции вычислить коэффициент диффузии при любой температуре.

Справедливость уравнения Аррениуса многократно проверена экспериментально, но ведь все эти эксперименты проведены в области достаточно высоких температур. Будет ли оно действовать и при низких температурах, правомерна ли экстраполяция? Есть основания сомневаться в этом, по крайней мере, в некоторых случаях. Например, в сильно деформированном металле при низких температурах есть множество дефектов кристаллической решетки (о них речь в следующей главе), которые могут сильно влиять на диффузионную подвижность атомов. А при высоких температурах, необходимых для диффузионного отжига, их число уменьшается в тысячи раз, и мы поневоле получаем искаженное представление об их роли в диффузионных процессах.

Так нельзя ли определить коэффициент диффузии непосредственно при низкой температуре, когда самой

диффузии практически нет (точнее, когда она идет крайне медленно)? Здесь как раз и скажет свое веское слово метод измерения внутреннего трения.

Как мы уже установили, при растворении в решетке  $\alpha$ -железа атомы углерода с трудом размещаются между

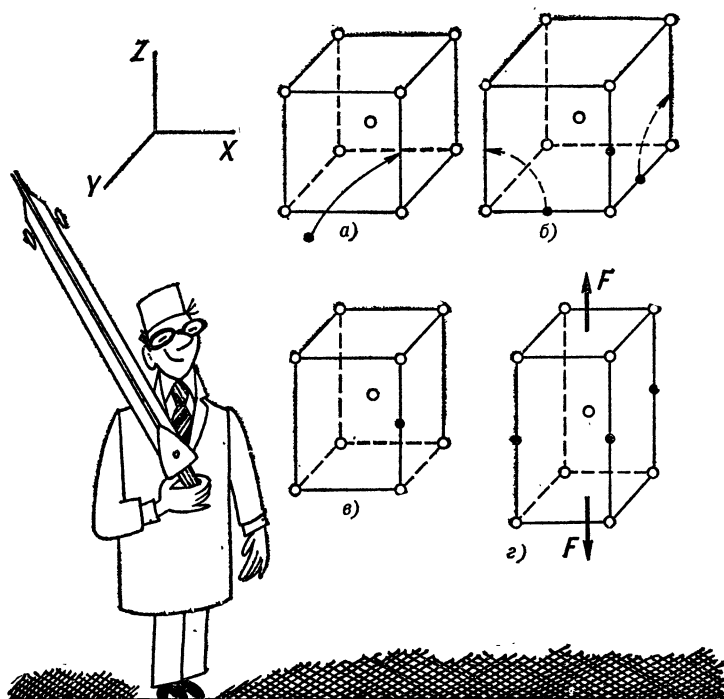


Рис. 28.

атомами железа и вынуждены раздвигать их. Особенно сильно смещаются из нормальных положений два ближайших атома железа, расположенные по краям того ребра, центр которого занял атом углерода. Изобразим элементарную ячейку  $\alpha$ -железа утрированно (рис. 28, а), увеличив расстояния между атомами. Если в данной ячейке находится атом углерода, то она искажается так, как (тоже утрированно) показано на позиции «в» — вместо куба мы получаем призму, у которой размеры по оси  $Z$  больше, а по двум другим осям — меньше, чем у исходного куба.

Поскольку атомы углерода вызывают сильные искажения в решетке  $\alpha$ -железа, в силу известного уже нам принципа Ле Шателье, оно не любит растворять углерод. При комнатной температуре предельная растворимость углерода в  $\alpha$ -железе измеряется тысячными долями процента, так что один его атом приходится на несколько тысяч ячеек. Искажения быстро убывают по мере удаления от занятой атомом углерода ячейки, поэтому решетка в целом остается кубической. Кроме того, у атомов углерода нет никаких причин предпочитать ось  $Z$  другим осям, поэтому они в среднем равномерно распределяются по всем трем непараллельным ребрам куба. Условно эта ситуация изображена на позиции «б». Условность в том, что трем атомам углерода будет слишком тесно в одной ячейке. Если в одной из них атом углерода расположится в ребре, параллельном оси  $Z$ , то в другой удаленной на тысячи межатомных расстояний, он скорее всего окажется на ребре, параллельном оси  $X$  или  $Y$  и т. д.

Однако ситуация резко меняется, если мы приложим растягивающую силу, например, вдоль оси  $Z$ . Это само по себе вызывает искажения решетки того же вида, как на позиции «в». Вертикальные ребра растягиваются, остальные сжимаются (так же, естественно, изменяются внешние размеры самого растянутого образца). Теперь позиции внедрения, наиболее удобные для атомов углерода, перестают быть равноправными. Им удобнее располагаться в вертикальных ребрах, уже растянутых внешним напряжением, чем в горизонтальных — сжатых. Это вызовет перескоки атомов из позиций в осях  $X$  и  $Y$  в вертикальные ребра и вызовет их дополнительное растяжение. На рис. 28, г показано, к чему это приводит. Здесь та же условность, что и на позиции «б» — каждый атом совершает этот скачок, конечно, в пределах «своей» элементарной ячейки, но во всех ячейках, занятых атомами углерода, они будут стремиться перепрыгнуть в вертикальное ребро. Атом углерода ищет то место, где больше размер поры.

Но такие же скачки из одного ребра в другое атомы углерода совершают и при их диффузионном перемещении в решетке. Скорость скачка определяется диффузионной подвижностью атомов при данной температуре. Имеется простое соотношение между коэффициентом диффузии и временем скачка  $\tau$  в решетке с длиной реб-

ра  $a$ , которое было установлено А. Эйнштейном:  $D = a^2/\tau$ ; это соотношение верно с точностью до коэффициента, зависящего от геометрии решетки и близкого к единице (переписанное в виде  $a = \sqrt{D\tau}$ , оно напомнит вам уже знакомое выражение — одно из основных уравнений диффузии).

Вот мы и получили типичный релаксационный процесс, вызывающий внутреннее трение. Будем циклически изменять нагрузку, приложенную вдоль оси  $Z$  (растяжение — сжатие). Если частота колебаний очень высока и время цикла мало по сравнению с  $\tau$ , атомы не успеют совершить перескок, как напряжение уже изменит знак и ребра  $Z$  начнут сжиматься, становясь вместо более удобных, наоборот, более неудобными позициями внедрения. Атом углерода успевает лишь «захотеть» перескочить, как ситуация резко изменяется.

При слишком низких частотах все перескоки будут успевать следовать за изменяющимся напряжением. В ходе нагружения атомы успевают занять вертикальные ребра, в ходе разгрузки — перескочить обратно и создать первоначальное беспорядочное распределение по трем осям. Когда внешнее напряжение начнет сжимать кристалл вдоль оси  $Z$ , атомы из вертикальных осей будут переходить в горизонтальные и т. д., причем, поскольку время цикла велико по сравнению с  $\tau$ , в каждый данный момент будет успевать устанавливаться именно то распределение атомов по трем осям, которое лучше всего соответствует величине и знаку напряжения.

Как мы уже знаем, в этих двух крайних случаях внутреннего трения нет. Оно достигнет максимума при частоте колебаний, отвечающей условию  $\omega\tau_p = 1$ , причем  $\tau_p$  здесь близко по величине к  $\tau$  — времени диффузионного скачка. Ведь не так уж важно, что именно является движущей силой скачков — различие в концентрации атомов углерода в разных местах, как при обычной диффузии, или периодически изменяющееся внешнее напряжение, как в нашем примере.

Теперь, измерив частоту  $\omega$ , при которой внутреннее трение достигло максимума, и период решетки  $a$ , мы легко определим коэффициент  $D$ .

Интересно, что максимум внутреннего трения, обусловленный рассмотренным процессом, при комнатной температуре обнаруживается при частоте около 1 Гц, что очень удобно для измерений. Но вообще мы можем



по своему усмотрению изменять и частоту колебаний, и температуру образца. Это дает возможность найти энергию активации того диффузионного процесса, который нас интересует. Например, при температуре  $T_1$ , согласно уравнению Аррениуса, коэффициент диффузии равен  $D_1$ , а время скачка (по формуле Эйнштейна)  $\tau_1$ . Если при этой температуре мы будем плавно изменять частоту колебаний  $\omega$ , то внутреннее трение достигнет максимума при  $\omega_1 = 1/\tau_1$ . При температуре  $T_2$  максимум появится при другой частоте  $\omega_2$ , так как коэффициент диффузии при этой температуре равен  $D_2$  и время скачка  $\tau_2$ . Так мы снова получаем два уравнения Аррениуса с двумя неизвестными  $D_0$  и  $Q$ . Остальное — дело техники.

Вот мы и закончили самый, пожалуй, скучный раздел книги. Дальше, как мы рассчитываем, дело пойдет веселее. В «Записных книжках» написано: «Вы даже не представляете себе, каким я могу быть скучным и нудным». Если читатель улыбнется этой ильфовской шутке, то авторы могут себя поздравить. Если же скажет: «Вот именно», то они должны себе посочувствовать.

## § 9. Что просто больше, а что — сверх?

Вообще говоря, это — вопрос вкуса или темперамента. Есть очень впечатлительные люди, склонные к самым сильным терминам, а есть такие, которые ничему не удивляются. Все же существуют более или менее общепринятые нормы и в этом вопросе. Если человек в состоянии одолеть себе подобного в поединке, то это — обычный человек, если двоих-троих, то это очень сильный и ловкий человек, вероятно, владеющий приемами каратэ. Если же, как это часто бывает в кинофильмах, один одолевает несколько десятков, то это уже супермен, сверхчеловек.

Конечно, когда жидкий гелий течет, не имея вязкости, или когда электросопротивление металла становится равным нулю, термины «сверхтекучесть» и «сверхпроводимость» выглядят, пожалуй, даже слишком скромными. Если медь имеет предельную упругую деформацию только 0,1 %, а закаленная сталь — около 0,5 % (помните пример с проволокой?), то это просто «больше», хотя у нас и сложилось мнение о том, что стальная проволока пружинит, а медная — нет. А вот если предельная упру-

гая деформация составляет 10 % и более, т. е. в 20—100 раз превышает норму, то вряд ли кто-нибудь возразит против термина «сверхупругость».

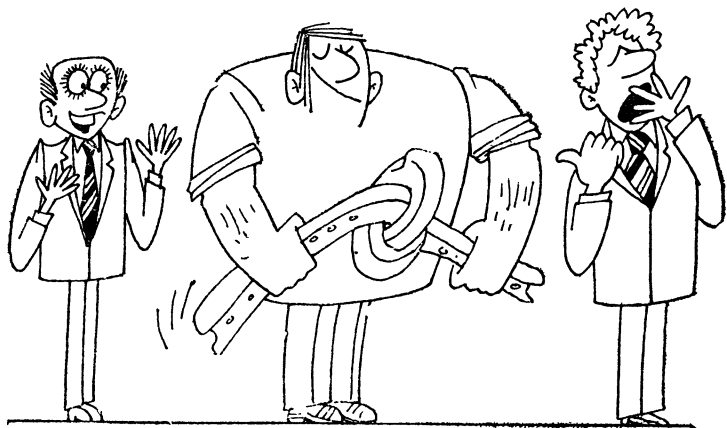


Рис. 29.

Чтобы понять внутренние причины проявления сверхупругости, надо заглянуть в гл. 4. А можно вместе с нами вначале рассмотреть внешнюю сторону этого интересного явления и те практические следствия, которые оно имеет, а затем уже заняться анализом причин.

## § 10. Несматывающаяся проволока

Случалось ли вам видеть, как из проволоки делают пружину? Берут оправку — цилиндрической формы пруток соответствующего диаметра, один конец ее зажимают в патроне токарного станка, и тем самым заставляют ее вращаться. Затем по копиру, с определенным шагом наматывают проволоку на оправку. Готовая пружина легко снимается с оправки, так как диаметр пружины увеличивается, после того как освобождаются ее концы — ведь упругая часть деформации при разгрузке исчезает. Значит, чтобы получить цилиндрическую пружину заданного внутреннего диаметра, надо брать оправку несколько меньшего диаметра, делая поправку на упругую «отдачу».

Навивая пружину, мы, конечно, заходим довольно далеко в пластическую область диаграммы деформации, развиваем напряжение, превышающее  $\sigma_{упр}$ , поэтому и получаем резкое изменение формы первоначально прямой проволоки. Упругая «отдача» — это проявление остатков памяти, слабые воспоминания металла о его исходной форме. Как рассчитать диаметр оправки, мы уже знаем (см. с. 32). Например, если мы хотим свить пружину диаметром 250 мм из миллиметровой медной проволоки, то надо брать оправку диаметром 200 мм \*). Если же намотать на ту же оправку прутки диаметром 20 мм, то деформация наружных волокон составит 10 % и «отдача» будет очень мала, так как упругая деформация в этом случае в 100 раз меньше пластической. Итак, если проволоку какого-либо диаметра наматывать на оправку в 10 раз большего диаметра, то внутренняя поверхность пружины после разгрузки будет довольно близко примыкать к наружной поверхности оправки.

Специалисты-пружинщики все эти расчеты проделывают машинально, в уме. Большой опыт позволяет им «на глаз» определять, какая пружина получится из какой проволоки на данной оправке. Можно представить себе их изумление, когда им показали навитую по всем правилам пружину с соотношением диаметров проволоки и оправки 1 : 10, которая полностью «развилась», как только отпустили ее концы. Проволока вновь сделалась прямой!

Ситуация выглядит довольно странно. Вроде бы нас убедили в том, что предельная упругая деформация — доли процента, что эту цифру, как два стража, охраняют, с одной стороны, пластическая деформация, с другой — разрушение. Мы уже говорили и еще вернемся к этому вопросу в гл. 5, что есть особые кристаллы — усы, которые можно деформировать упруго на 3—5 %, но 10 % — это чересчур. И все же «если очень хочется, то можно»! Нашлись такие материалы. Правда, механизм явления здесь принципиально отличается от механизма обычной упругой деформации, но об этом позже.

Посмотрим, как выглядит диаграмма деформации сверхупругого материала (рис. 30). Вначале идет обыч-

---

\*) На самом деле пружина и кольцо — это не полностью аналогичные в механическом смысле детали и расчет оправки для пружины несколько сложнее, но принцип здесь, конечно, один и тот же.

ный гукковский участок  $OA$ , а затем диаграмма резко изгибается вправо, и пока мы не начали разгрузку, мы вполне можем принять точку перегиба за предел упругости. Главный признак налицо — скорость роста напряжения резко уменьшилась, похоже, что началось пластическое течение металла. Когда накопилось общее удлинение, соответствующее относительной деформации  $\epsilon \approx 10\%$ , мы начинаем разгрузку, ожидая, что она пойдет по линии  $A'C$ , параллельно гукковскому участку — упругая деформация будет уменьшаться, и в итоге получится остаточная деформация  $\epsilon_{\text{ост}} \approx 10\%$ .

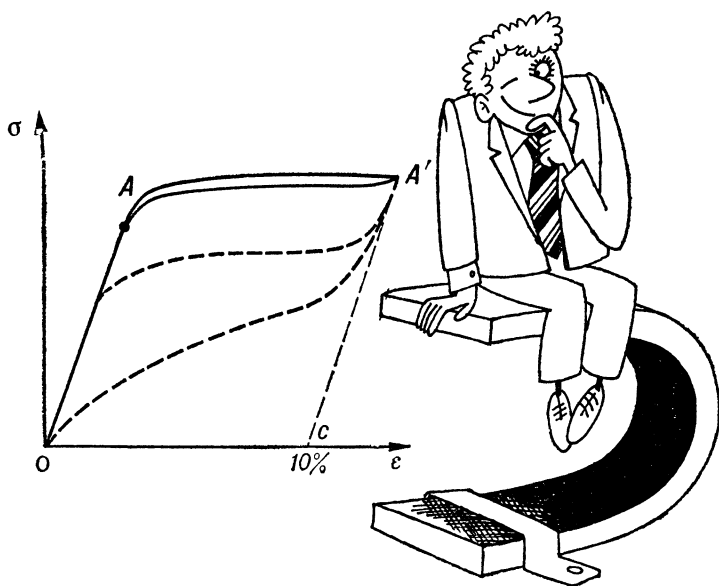


Рис. 30.

Но чудо! Линия разгрузки идет вдоль  $A'A$ , почти совпадая с линией нагружения, и далее — по  $AO$ , и вся наша якобы пластическая деформация исчезает. Взгляните на полукольцо, изображенное на рис. 17, б. Верится ли (на глаз), что оно может полностью распрямиться, когда мы отпустим его концы? И все-таки это возможно.

## § 11. Неслабеющие пружины и немые сплавы

Заманчивые перспективы открывает использование сверхупругих сплавов в технике. Не рассматривая этот вопрос детально, мы остановимся лишь на трех принципиально важных обстоятельствах.

Во-первых, задумаемся, почему остановились наши наручные часы, если мы забыли их завести. Все ясно — «кончился завод». А что значит «кончился завод»? Это значит полностью разгрузилась заводная пружина, она исчерпала весь свой запас упругой энергии. А почему нельзя увеличить этот запас?

Энергия упругой деформации единицы объема, как мы знаем, равна  $a = \sigma\epsilon/2$ . Путь, связанный с увеличением объема пружины, обсуждать не будем — это поведет к росту габаритов часов и другим неудобствам. Может быть увеличить напряжение, туже затягивать пружину? Но нас сдерживает величина  $\sigma_{упр}$ . Больше грузить нельзя, будут появляться остаточные деформации с вытекающими отсюда последствиями. Тогда нельзя ли увеличить деформацию? Но в упругой области  $\sigma$  и  $\epsilon$  связаны законом Гука и любое увеличение  $\epsilon$  повлечет рост  $\sigma$ . Вот мы и оказались в тупике, выхода нет. Приходится раз в сутки заводить часы.

Теперь изготовим заводную пружину из сверхупругого материала и рассчитаем ее так, чтобы при полном заводе в ней развивалось напряжение, соответствующее точке  $A'$  на рис. 30. Остаточной деформации после разгрузки не будет, а сама разгрузка будет длиться в десятки раз дольше, чем разгружался бы обычный металл от того же уровня напряжения. В такой пружине запасено при данном значении  $\sigma$  гораздо больше упругой энергии, так как величина сверхупругой деформации значительно больше обычной упругой. Есть много других разнообразных конструкций, в которых необходимо накапливать большую упругую энергию с тем, чтобы расходовать ее или постепенно, или же сразу «выплеснуть» ее в нужный момент. Здесь сверхупругие сплавы еще должны сказать свое веское слово.

Второе обстоятельство по сути дела является одним из аспектов первого. Рассмотрим его снова на примере пружины. Всем известно, что пружины постепенно «сдаются», частично утрачивают свои функции. Часто при-

чиной этого являются внутренние процессы релаксации, протекающие в материале самой пружины. Но нередко возникает и другая ситуация — пружина слабеет из-за изменения размеров соединенной с ней детали, которое



Рис. 31.

происходит под действием самой пружины. Это может сильно осложнить решение некоторых конкретных задач. Вот пример из области медицины, к которому мы еще вернемся (см. рис. 69).

Для лечения такой травмы, как перелом челюсти, применяют скобку-пружинку, которую натягивают и вставляют в два отверстия, высверленных в кости по обе стороны от места перелома. Под давлением пружинки сращивание кости происходит гораздо быстрее, чем в свободном состоянии, но по мере сращивания концы пружинки сближаются, ее деформация уменьшается и оказываемое ею давление на кость снижается по закону Гука. Так происходит с любой «нормальной» пружиной — изменение ее силовой характеристики следует линии  $AO$  на рис. 13.

Но взглянем на линию разгрузки сверхупругого материала —  $A'O$  на рис. 30. Видно, что на очень боль-

шом перемещении усилие остается практически неизменным, что и нужно для решения данной задачи. Этот метод уже используется в нашей стране и, между прочим, дает солидный экономический эффект: большой бюллетенит одну неделю вместо обычных трех.

Много подобных задач возникает и в технике, когда требуется обеспечить постоянное усилие прижатия одной детали к другой. Сверхупругие сплавы с успехом используются, например, для изготовления микрозондов, контролирующих параметры интегральных схем в электронной технике. При контроле с помощью такого микрозонда обеспечивается постоянство электросопротивления контактной площадки и, следовательно, высокая точность измерений.

И, наконец, снова о «говорящих» и «немых» сплавах. Есть сверхупругие сплавы, у которых линия разгрузки располагается заметно ниже линии нагрузки, как показано пунктиром на рис. 30. Вспомним, что внутреннее трение определяется площадью петли на диаграмме  $\sigma - \epsilon$ ; видно, что названная ранее цифра (внутреннее трение порядка 10 %) — не предел для сверхупругих сплавов. Если возбудить колебания в сверхупругом сплаве с такой исходной амплитудой деформации, которая уже выходит на сверхупругий участок  $AA'$  диаграммы, то они будут затухать с чрезвычайно большой скоростью. Амплитуда каждого следующего колебания будет в несколько раз меньше, чем предыдущего. При ударе молотка по куску такого сплава мы услышим лишь слабый, глухой, короткий звук. Сверхупругие сплавы — самые «немые» из существующих. Вряд ли можно придумать лучший металлический амортизатор, если не прибегать к специальным конструктивным приемам — использованию гидравлики и пр.

## ПЛАСТИЧНОСТЬ И СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ

Продолжим свой путь вдоль линии  $\sigma(\epsilon)$  (рис. 13) и рискнем зайти за точку А диаграммы деформации. Мы попадаем во владения Пластичности—одного из важнейших свойств металлических материалов. Это свойство металлов — давать значительные остаточные деформации без разрушения или практически полностью забывать свою исходную форму и легко принимать новую — имеет огромное значение для техники. Ломоносовское определение — металл есть светлое тело, которое ковать можно, — основано именно на этом свойстве. Оно настолько важно, что издавна и до сих пор символом рабочих профессий остается молот, т. е. инструмент, которым «ковать можно».

Но дело не только в способности металлов изменять форму. Это всего лишь одна, так сказать технологическая, сторона пластичности. Другая ее сторона во многих случаях еще важнее: пластичность является врагом разрушения, а значит союзником металла в его борьбе с внешними нагрузками. Здесь речь идет уже о взаимоотношениях металла с различными воздействиями не в процессе изготовления деталей, а в процессе их службы. В нехватке пластичности кроется причина многих катастрофических разрушений металлических изделий, о которых пойдет речь в гл. 5.

### § 1. Пластичность. Как удлинить колоду карт?

Мы уже рассматривали три основных типа кристаллической решетки металлов. Взаимное расположение атомов в этих решетках можно представить как упаковку билиардных шаров (рис. 26). Предельная плотность упаковки достигается, когда каждый шар окружен в пространстве 12 такими же шарами. Этому случаю



соответствуют гранецентрированные кубические и гексагональные плотноупакованные решетки. В этих решетках коэффициент заполнения объема атомами равен 0,74 и только 26 % объема приходится на долю пор между атомами. Третий распространенный тип решетки металлов, с которым мы уже знакомы, — объемноцентрированная кубическая. Коэффициент заполнения объема у металлов с такой решеткой несколько меньше — 0,68, но это не означает, что больше размеры пустот между атомами. Наоборот, несложные геометрические вычисления показывают, что размеры пор в этой решетке меньше, чем в решетках с предельно плотной упаковкой, просто самих этих пор — больше.

Если мы разрежем кристалл с плотноупакованной решеткой по плоскости с наиболее тесной укладкой атомов, то получится картина, изображенная на рис. 32. Теперь приложим пару внешних сил так, как показано на рисунке. Это вызовет появление касательных напряжений  $\tau$ , которые стремятся сдвинуть один атомный слой относительно соседнего.

Такой способ пластической деформации называется скольжением — слои кристалла сдвигаются, скользят по другим. Воображаемые плоскости, разделяющие эти слои, называют плоскостями скольжения. Обычно в скольжении участвуют плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов, поскольку расстояния между ними в кристаллах максимальны и поэтому их легче сдвигать одну по другой. Расстояние от плоскости, в которой атомы тесно прилегают друг к другу, до следующей такой же плоскости близко к диаметру атома. Если же мы выберем другую плоскость, в которой атомы расположены реже (пара таких плоскостей показана на рис. 32 пунктиром), то расстояние от нее до следующей такой же будет заметно меньше. Взаимное смещение (скольжение) таких плоскостей требует больших усилий, вызывает большие нарушения правильного атомного строения кристалла в зоне сдвига, чем скольжение вдоль плоскостей плотной упаковки.

Как мы установили в гл. 1, касательные напряжения возникают и при растяжении (и при других способах деформирования). Вызванные ими сдвиги обеспечивают удлинение стержня в направлении растягивающей силы — рис. 33. 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

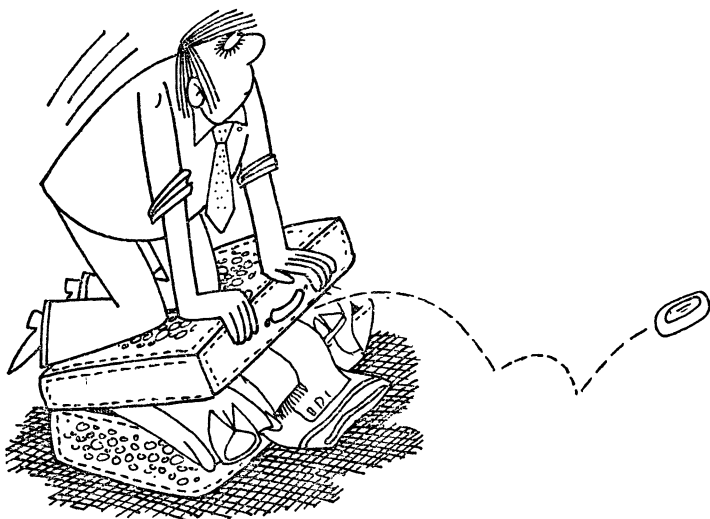
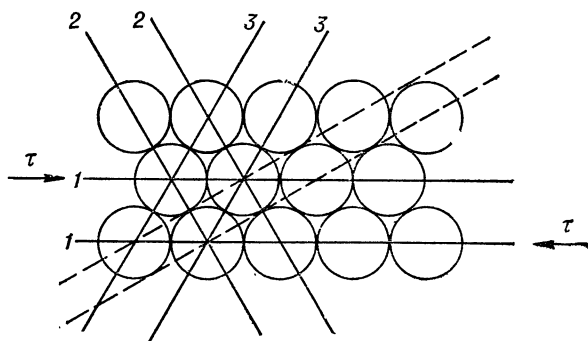
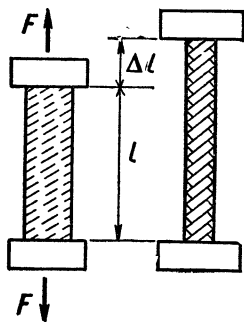


Рис. 32.

нее карты одну по другой. Чтобы при пластической деформации 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.

Особенно отчетливо такой характер пластической деформации виден при исследовании металлических образцов, представляющих собой единый кристалл, — так называемых монокристаллов. На рис. 34 (внизу) показан натуральный снимок монокристалла после пластической деформации. Сходство со стопкой монет налицо.

Если вернуться к рис. 32, то легко увидеть, что в кристалле может быть несколько равноправных плотноупакованных плоскостей (пары 1—1, 2—2, 3—3). Следова-



$$\varepsilon_{осм} = \frac{\Delta l}{l}$$

Рис. 33.

тельно, при пластической деформации кристалл окажется перед выбором. Вопрос будет решен в пользу той плоскости скольжения, в которой будет действовать наибольшее касательное напряжение. При данном направлении действия внешней силы первой «заработает» та группа параллельных плотноупакованных плоскостей, которые составляют с осью растя-

жения угол, возможно более близкий к  $45^\circ$ . Ведь именно на площадках, расположенных под этим углом к оси растяжения, касательные напряжения максимальны.

Несколько сложнее обстоит дело при деформировании обычных поликристаллических металлов, которые состоят из множества зерен — монокристаллов —, случайным образом ориентированных друг по отношению к другу. Такая структура всегда получается при охлаждении расплава (если не принимать особых мер предосторожности, как при выращивании монокристаллов), поскольку возникает множество зародышей твердой фазы, каждый со своей (случайной) ориентировкой решетки в пространстве. Процесс их роста и срастания друг с другом и формирует типичную поликристаллическую структуру металла. На рис. 35 это изображено схематически, а на рис. 36 представлена фотография поликристалла, полученная при увеличении в 400 раз.

В поликристаллах деформация каждого зерна должна быть согласована с деформацией всех его непосредственных соседей, иначе на границах зерен будут появляться разрывы, трещины, пустоты. К счастью, высокая симмет-

рия кристаллических решеток металлов, наличие нескольких возможных плоскостей скольжения в каждом зерне позволяет обойти эту трудность. Все же процесс скольжения в поликристаллах требует больших напряжений, чем в монокристаллах, но принципиально картина скольжения не меняется. Происходит сдвиг одних слоев металла в пределах каждого зерна относительно

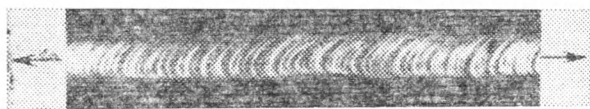


Рис. 34.

соседних по плоскостям скольжения. Внешняя растягивающая сила диктует необходимость разворота этих слоев в направлении оси растяжения, который сопровождается их скольжением друг по другу. В результате каждое зерно вытягивается в осевом направлении и сжимается в двух других. Так из совместной деформации отдельных зерен складывается общая деформация всего поликри-

сталлического агрегата — например, растягиваемого образца, который удлиняется в направлении действия силы. На рис. 37 схематически показан результат такой деформации поликристалла, а на рис. 38 — фотография того же металла, что и на рис. 36, полученная при этом же увеличении.

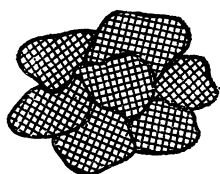


Рис. 35.

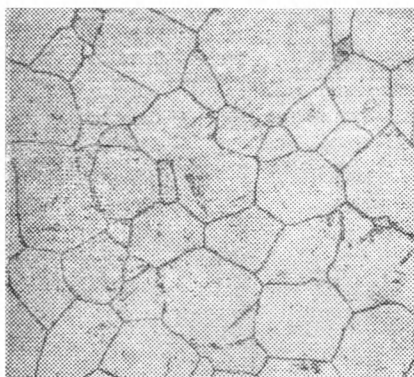


Рис. 36.

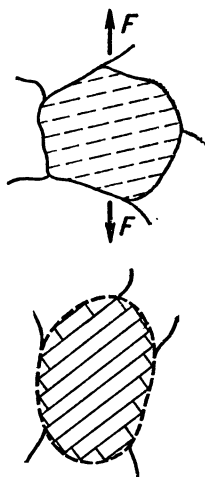


Рис. 37.

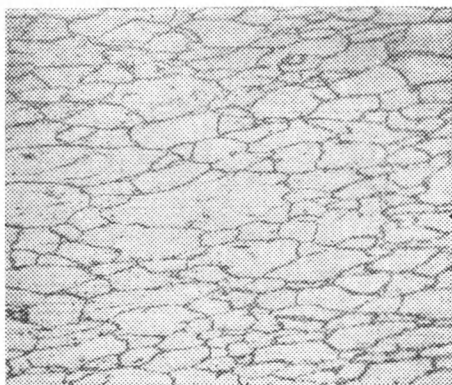


Рис. 38.

Многочисленные эксперименты показывают, что плотность металлов при их пластической деформации практически не изменяется. Это подтверждает отсутствие

пустот у границ и в теле зерен. Раз не меняется плотность, значит и объем деформируемого образца остается постоянным. Если он имел цилиндрическую форму, то его поперечное сечение при растяжении уменьшается пропорционально росту длины.

## § 2. Как происходит сдвиг, или суровый боцман и хитроумный юнга

Очевидный геометрический результат скольжения одних частей кристалла по другим — появление ступенек на внешней его поверхности. При значительной пластической деформации ступеньки на поверхности становятся различимы с помощью обычного оптического микроскопа. Это было известно уже в начале XX века, и когда было установлено кристаллическое строение металлов, казалось, стал ясен и атомный механизм их пластической деформации. Действительно, как будто напрашивается вывод, что одна плотноупакованная атомная плоскость (и вся часть кристалла, ею ограниченная) сдвигается как жесткое целое относительно соседней атомной плоскости (и, значит, остальной части кристалла). Представления о том, что сдвиг одновременно охватывает всю площадь плоскости скольжения, не вызывали сомнений до 1924 г., когда известный советский физик Я. И. Френкель сделал оценку напряжения, необходимого для такого процесса.

Расчет Я. И. Френкеля был очень простым, а его результат — громоздким. Если рассматривать сдвиг как одновременное смещение одной части кристалла по другой (рис. 39), то приложенное касательное напряжение  $\tau$  должно быть периодической функцией величины смещения атомов из исходного положения  $x$ .

Положения 1, 2 и 3 на рисунке — это положения равновесия, но в положении 2 потенциальная энергия системы атомов больше, чем в исходном положении 1. При переходе из 1 в 2 все атомы верхнего слоя должны как бы взобраться на горку, а при переходе в положение 3 атомы верхнего слоя как бы скатываются с горки. Эту аналогию, конечно, не следует понимать буквально, так как речь идет не о силах тяжести, а о силах межатомного взаимодействия.

Если продолжить сдвиг, то картина повторяется с периодом, равным межатомному расстоянию  $b$  в направ-

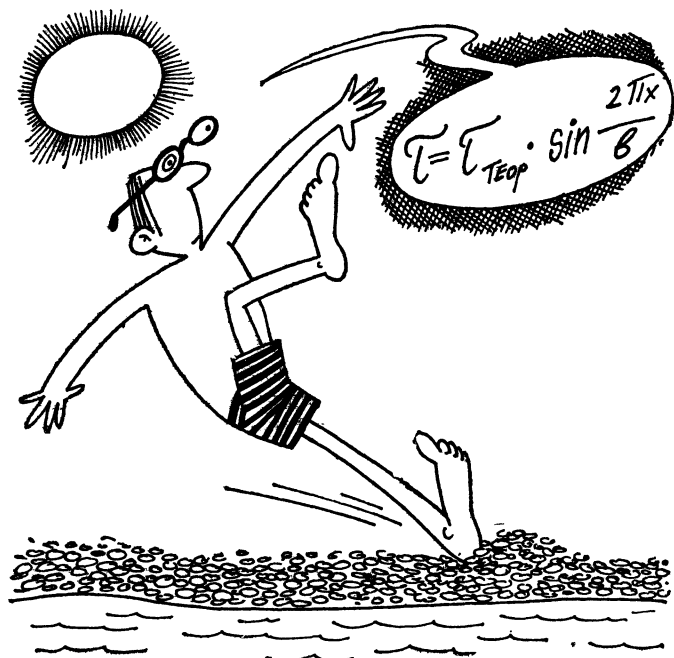
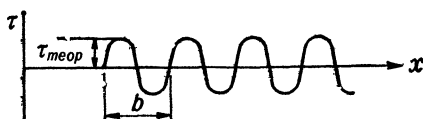
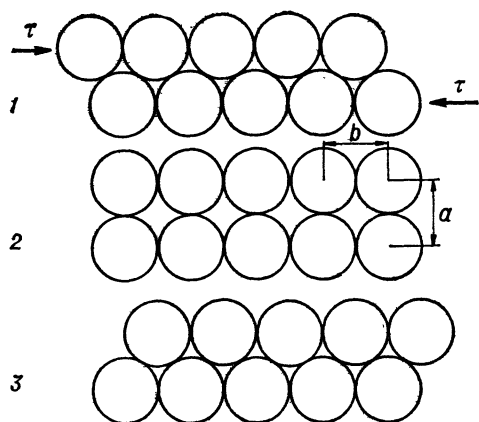


Рис. 39.

лении скольжения. По сути дела положения 1 и 3 ничем не отличаются друг от друга в смысле взаимного расположения атомов, однако первый период нашей синусоиды соответствует появлению на правой и левой поверхностях кристалла ступенек высотой  $b$ , а каждый следующий — росту этих ступенек (всякий раз на величину  $b$ ), т. е. увеличению сдвига.

Для оценочного расчета можно принять, что напряжение сдвига  $\tau$  есть синусоидальная функция смещения  $x$  с периодом  $b$  и амплитудой  $\tau_{\text{теор}}$ , которую и требуется найти:

$$\tau = \tau_{\text{теор}} \sin(2\pi x/b).$$

Для малых смещений (при малых  $x$  величина  $\sin x \approx x$ )

$$\tau = \tau_{\text{теор}} 2\pi x/b.$$

С другой стороны, при малых смещениях справедлив закон Гука, который для случая сдвиговой деформации записывается в виде:

$$\tau = G\gamma,$$

где  $G$  — модуль сдвига,  $\gamma$  — относительная величина сдвига, которая равна  $x/a$ . Приравнявая правые части двух последних равенств, получаем

$$\tau_{\text{теор}} = Gb/2\pi a,$$

а поскольку  $b \approx a$ ,

$$\tau_{\text{теор}} \approx G/2\pi.$$

Конечно, это довольно грубая оценка, так как мы приняли, что смещения атомов значительно меньше межатомного расстояния и справедлив закон Гука. Поэтому не будем настаивать на коэффициенте  $2\pi$ . Важно, что порядок величины  $\tau_{\text{теор}}$  мы нашли правильно.

Неожиданно выяснилось, что касательное напряжение, необходимое для начала скольжения, — одного порядка с модулем сдвига! Причем здесь восклицательный знак? А притом, что к моменту появления расчета Я. И. Френкеля напряжения, при которых начинается пластическая деформация, и модули сдвига были определены экспериментально для многих металлов. Например, для чистого железа  $G \approx 8 \cdot 10^4$  МПа, а  $\tau_{\text{упр}} \approx 10$  МПа, так что их соотношение отличается от расчетного в



тысячу раз \*). Примерно такое же грубое расхождение с расчетом получилось и для других металлов.

В чем же ошибка? Как оказалось, в самом исходном предположении об одновременном смещении всех атомов одной плоскости относительно соседней. Потребовалось, однако, 10 лет, чтобы прийти к такому очевидному сейчас представлению о том, что сдвиг не охватывает одновременно всю плоскость скольжения. Это кажется тем более странным, что подсказки мы теперь (задним умом!) находим на каждом шагу. Ведь если не удастся сделать что-либо разом, «в лоб», то можно это же сделать постепенно.

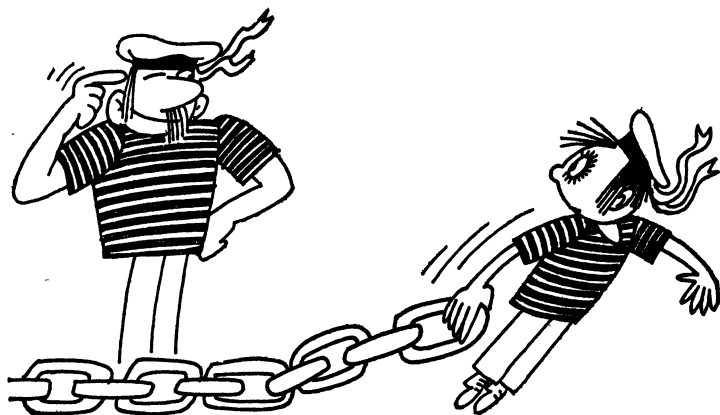


Рис. 40.

Представим себе, что на каком-либо судне боцман приказывает юнге передвинуть по палубе тяжелую якорную цепь (рис. 40). Юнга не имел бы никаких шансов на успех, если бы он пытался двигать цепь вправо, потянув за правый конец. Но, будучи хитроумным, он заходит с левого конца и сдвигает последнее звено цепи вправо настолько, насколько позволяет предпоследнее. Далее он передвигает это предпоследнее звено, насколько позволяет третье от конца, и так же поступает с каждым следующим, пока не доберется до

---

\*) На диаграмме деформации (рис. 13) мы откладываем нормальные напряжения  $\sigma$  и точка А соответствует  $\sigma_{упр}$ . Но нормальные напряжения  $\sigma$  и касательные  $\tau$  связаны соотношениями, которые были выведены в гл. 1. Можно принять, что  $\tau_{упр} \approx \sigma_{упр}/2$ .

крайнего правого. В результате вся цепь перемещается вправо на длину одного звена, а поскольку в силах нашего юнга повторить эту операцию многократно, ему не страшен даже самый суровый боцман.

Тот же принцип использует в своем движении гусеница, так же опытный машинист, чтобы сдвинуть с места тяжелый состав, дает сначала задний ход, создавая зазоры в соединениях вагонов, а затем уже трогается вперед, как бы подключая к составу вагоны поочередно. И точно так же при скольжении в кристалле в положение 2 на рис. 39 переходят не одновременно все атомы верхнего слоя: они совершают это «восхождение» по очереди.

Постепенность распространения сдвига по плоскости скольжения обеспечивается особым рода дефектами кристаллической решетки, так называемыми дислокациями. Представление о дислокациях впервые появилось в 1934 г. в теоретических работах Поляни, Орована и Тейлора, опубликованных одновременно, но выполненных независимо друг от друга. Это представление позволило преодолеть вопиющее противоречие между реальным сопротивлением сдвигу и теоретическим. А с начала 50-х годов открывается подлинная «дислокационная эпоха» в металлофизике. Появляются мощные приборы — электронные микроскопы, позволяющие непосредственно убедиться в существовании дислокаций в металлах и изучать их поведение. Большая часть разработанных к тому времени теоретических положений, описывающих свойства дислокаций, блестяще подтвердилась на опыте.

### § 3. Дислокации

В летнее время, под тенью акации,  
Приятно мечтать о дислокации.

*К. Прутков*

Сатирики, писавшие под этим псевдонимом, высказали такой афоризм от имени вымышленного сына Козьмы Пруткова, Фаддея Козьмича, которому принадлежит немало подобных «глубокомысленных перлов» на военную тему. Термин «дислокация» здесь использован, конечно, в военном аспекте и означает размещение войск. Вообще же слово «дислокация» происходит от латинского *dislocatio* — «смещение» и в качестве научного

термина использовалось раньше лишь в геологии для обозначения смещений в исходном расположении горных пород под влиянием, например, вулканической деятельности.

Что же такое дислокации в кристаллах, как они позволяют постепенно преодолевать сопротивление решетки сдвиговой деформации? Один из двух основных типов этих дефектов кристаллической решетки — краевые дислокации (рис. 41). Краевая дислокация представляет собой линию ограничивающую лишнюю атомную полуплоскость, которая как бы вставлена в кристалл, например, сверху и не имеет продолжения в нижней части кристалла \*).

Видно, что вблизи края лишней полуплоскости решетка искажена: межатомные расстояния отличаются от межатомных расстояний в совершенной решетке. Значит, вдоль дислокации тянется область кристалла с повышенной энергией (так называемое ядро дислокации) — чтобы вставить лишнюю полуплоскость в решетку, надо было затратить определенную работу. Чем длиннее дислокация, тем больше эта энергия, поэтому дислокация всегда стремится уменьшить свою длину и ведет себя в кристалле как «натянутая струна».

Перемещение дислокационной линии, конечно, вместе со всей полуплоскостью и вызывает сдвиг одной части кристалла относительно другой (рис. 42) (на плоской картинке линия дислокации проектируется в точку). Если приложенное касательное напряжение стремится сдвинуть верхнюю часть кристалла вправо, то начальную стадию этого процесса можно представить так, как показано на позиции 1. На левой грани кристалла уже образовалась ступенька, но сдвиг еще не охватил всю площадь плоскости скольжения. Границей зоны сдвига и является наша краевая дислокация, которая пока находится вблизи левой грани. На рис. 42, позиция 2, хорошо видно, что перемещение дислокации на одно межатомное расстояние в решетке требует лишь небольшой перегруппировки атомов вблизи дислокационной линии. Здесь черными кружками показаны положения атомов, соответствующие позиции 1. В дальнейшем дислокация

---

\*) Для простоты мы рассматриваем здесь кубическую решетку, в которой атомы (ионы) расположены только в вершинах кубиков. В реальных металлах возникает несколько более сложная картина, так как они имеют плотноупакованные решетки.

постепенно перемещается все дальше и дальше вправо и в конце концов выходит на правую грань кристалла, образуя на ней ступеньку.

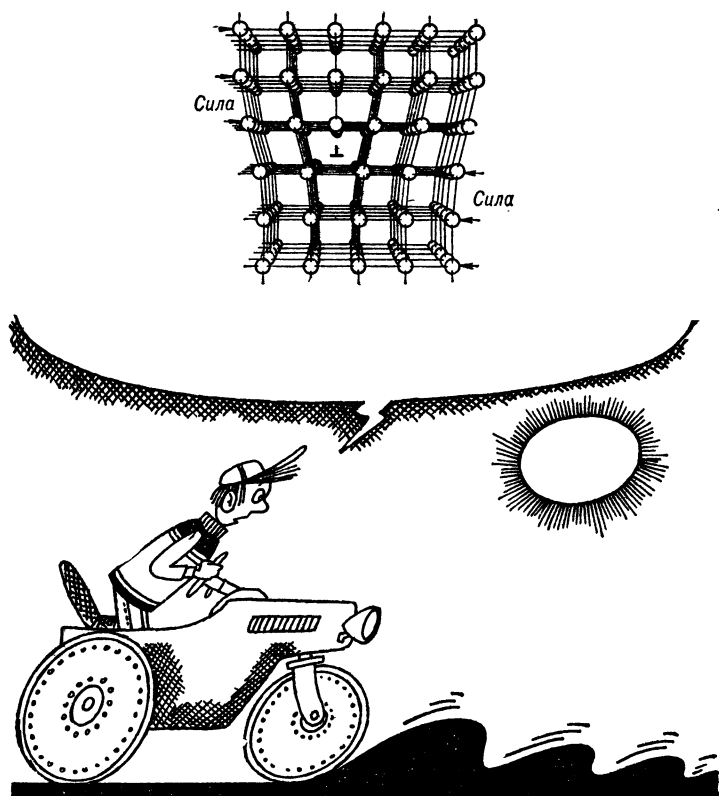


Рис. 41.

Как видно, конечный результат получился таким же, как при одновременном сдвиге всей атомной плоскости. Но для получения этого результата требуются неизмеримо меньшие напряжения. Ведь в расчете Френкеля необходимо преодолеть силы межатомной связи сразу на всей плоскости скольжения (рис. 39), «вкатить» всю верхнюю плоскость на вершунки атомов нижней. Здесь же этот процесс происходит постепенно. При переходе

от позиции 1 к позиции 2 нарушается только одна связь 2 — 3' и формируется новая полная атомная плоскость 2 — 2'. Полуплоскость 3' теперь становится лишней, и дислокация сдвигается вправо на одно межатомное расстояние  $b$ . Таким образом верхняя плоскость перекачивается по нижней не так, как в модели жесткого сдвига (рис. 39), а так, как это делала бы гусеница, преодолевая препятствие.

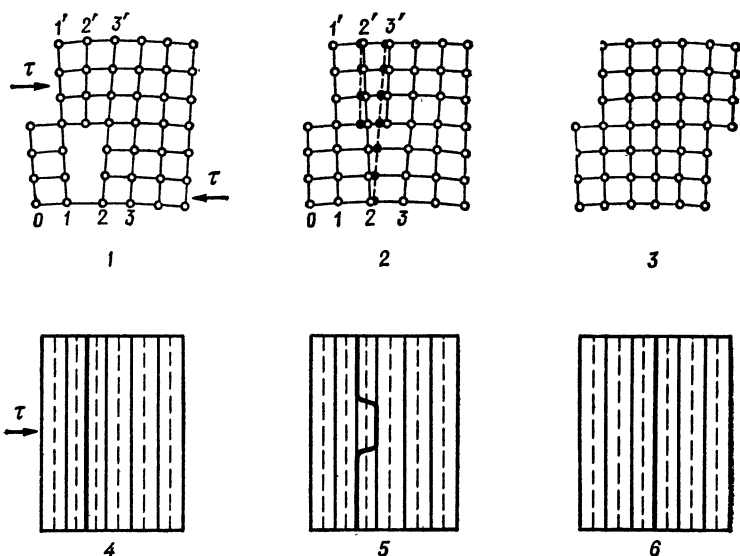


Рис. 42.

В момент перехода дислокации из одного положения равновесия (когда она находится точно посередине между двумя соседними полными, правильными вертикальными плоскостями) в следующее такое же, лишь один атом перекачивается через горку. Все атомы, участвующие в движении дислокации, как видно, смещаются на расстояния, порядка межатомного. Конечно, такая же ситуация создается во всех атомных плоскостях, параллельных плоскости рисунка, поэтому, когда мы говорим «один атом», имеется в виду вся цепочка, перпендикулярная чертежу — край полуплоскости. Длина дислокации, т. е. ее размер в направлении, перпендикулярном чертежу, может быть равна или соизмерима с габаритом

кристалла в этом направлении. В плоскости чертежа все возмущения — отклонения атомов от нормальных позиций, которые они занимали до прихода сюда дислокации, — практически полностью гасятся при удалении от оси дислокации на несколько межатомных расстояний. Поэтому дислокации являются линейными дефектами решетки: их размер в одном направлении велик, а в двух других — мал.

Если мы взглянем на кристалл, изображенный на рис. 41, сверху, то дислокация спроектируется в прямую линию которая будет стремиться занять симметричное положение между двумя соседними плоскостями (позиция 4 на рис. 42). Эта линия должна будет перейти в соседнюю аналогичную позицию, преодолев барьер, обозначенный пунктиром. Дислокация и здесь ищет обходные пути, возможность выполнить эту работу не сразу, а постепенно. Вначале в новое положение переходит лишь небольшая часть длины дислокации — позиция 5 — высаживается десант, а затем перетягивается остальная часть — позиция 6. Так сами дислокации, призванные обеспечить постепенность сдвига, в своем движении используют тот же принцип постепенности: в процессе перехода «на горке» находится не вся длина дислокации, а в каждый данный момент — лишь ее небольшая часть. Многократно повторяясь, такой процесс приведет к выходу дислокации на поверхность — позиция 3.

#### § 4. Сколько требуется дислокаций?

Мы не будем рассматривать здесь другую категорию линейных дефектов — так называемые винтовые дислокации, хотя они играют не менее важную роль в процессах пластической деформации, чем краевые. Строение винтовых дислокаций и их движение в решетке имеют свои отличительные особенности, но пусть они останутся за кадром. Будем считать, что мы в основном выяснили, как происходит скольжение в кристаллах.

Но вслед за фундаментальными вопросами «что, как и почему?» обычно следует уже более прозаическое: «сколько?». Ответ на этот простой вопрос иногда ставит новые «как и почему», в чем мы уже могли убедиться. Например, Френкель первый задался вопросом, какое напряжение (сколько мегапаскалей) нужно приложить,

чтобы вызвать сдвиг. Результатом было появление теории дислокаций, которая сыграла революционную роль во многих разделах физики твердого тела.

Итак, сколько дислокаций нужно, чтобы обеспечить сдвиговую деформацию заданной величины? Это один из первых вопросов, на который должна была ответить количественная дислокационная теория. Предположим, что касательное напряжение  $\tau$  стремится вызвать сдвиг  $\gamma$  вправо части кристалла с размерами  $l_1$  и  $l_2$  (рис. 43), причем в процессе участвует  $n$  дислокаций, скользящих в параллельных плоскостях. Введем количественную меру — плотность дислокаций  $\rho$ , которая определяется как число дислокаций на единицу площади поверхности кристалла:  $\rho = n/l_1l_2$ . Иногда используется другая мера плотности дислокаций — суммарная длина всех дислокационных линий в единице объема. Если предположить, что все дислокации прямолинейны и перпендикулярны площадке, на которой мы фиксируем их выходы на поверхность, то эти меры идентичны. Вообще же они не совпадают, но при оценках можно пользоваться любой из них. Для простоты мы выберем первую.

Когда дислокации пробегут путь  $l_1$  от левой до правой грани кристалла, каждая из них даст на поверхности ступеньку величиной  $b$  (см. рис. 42).

Пока ступеньки есть только на левой грани кристалла, значит изменение его размера в направлении оси  $x$ , связанное с одной дислокацией, на этой стадии деформации меньше  $b$ . Это изменение размера  $\delta$ , составляет такую же долю от  $b$ , какую пробег дислокации  $x$  составляет от  $l_1$ :

$$\delta = b \frac{x}{l_1}.$$

Понятно, что при  $x = l_1$  получим  $\delta = b$ .

Полное изменение  $\Delta$ , размера кристалла в направлении оси  $x$  будет равно сумме тех смещений  $\delta$ , которые связаны с каждой дислокацией:

$$\Delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = \frac{bn\bar{x}}{l_1},$$

где  $n$  — число дислокаций, а  $\bar{x}$  — усредненная по всему кристаллу длина пробега дислокаций.

Относительная деформация сдвига в плоскости  $xy$  равна изменению размера вдоль оси  $x$ , деленному на

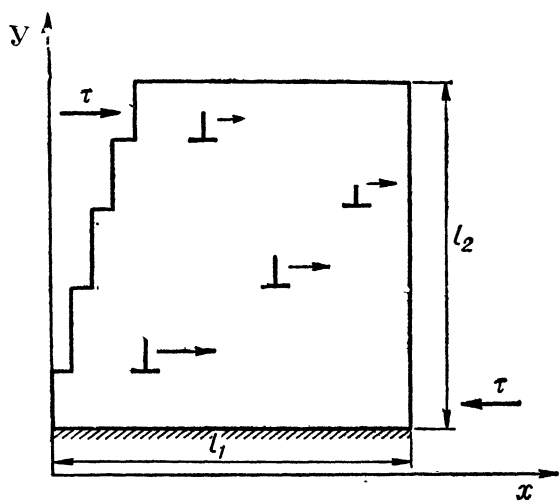


Рис. 43.



исходный размер вдоль оси  $y$ :

$$\gamma = \frac{bnx}{l_1 l_2}.$$

Но  $n/l_1 l_2$  — это и есть плотность дислокаций  $\rho$ , поэтому

$$\gamma = b\rho x.$$

Теперь можно сделать интересующую нас оценку. Примем, что средний пробег дислокаций равен среднему расстоянию между ними, которое в свою очередь, очевидно, равно  $1/\sqrt{\rho}$ . Тогда  $\gamma = b\sqrt{\rho}$ . Так как  $b$  в металлических кристаллах равно  $(2 \div 3) \cdot 10^{-8}$  см, для получения деформаций порядка десятка процентов нужно  $\sim 10^{13}$  дислокаций на  $1 \text{ см}^2$ .

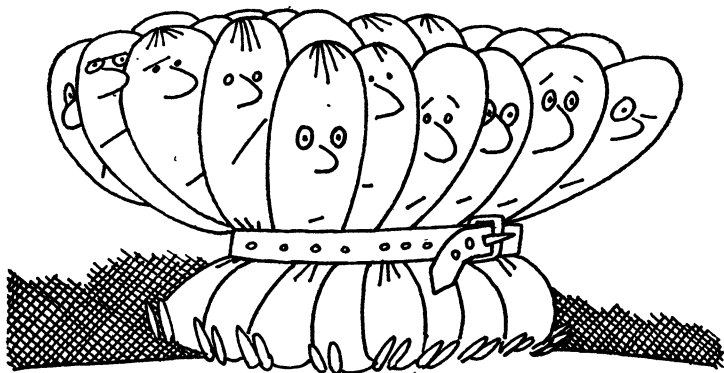


Рис. 44.

Такая плотность дислокаций близка к предельной, так как среднее расстояние между ними при этом — порядка десятка межатомных расстояний. Еще немного — и начнут уже перекрываться искаженные области решетки вблизи оси дислокаций и не останется атомов, занимающих нормальные позиции в ее узлах. И тем не менее в сильно деформированных металлах экспериментально измеренная плотность дислокаций действительно приближается к этой цифре. Сама же цифра должна производить весьма серьезное впечатление, так как она гласит, что в кусочке сильно деформированного металла размером с булавочную головку суммарная длина дислокационных линий превышает расстояние от Земли до Луны!

## § 5. Откуда они берутся?

Но вернемся с Луны на Землю и задумаемся о том, откуда в кристалле возникает такое огромное количество дислокаций. Уже давно известно, что они возникают в металле в процессе кристаллизации. Однако, когда были развиты экспериментальные методы исследования дислокаций, выяснилось, что типичные значения плотности дислокаций в металле после затвердевания  $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$ , а это значит, что в процессе пластической деформации их число возрастает на несколько порядков. Снова ответ на вопрос «сколько?» вызвал вопрос «как?». Как происходит столь резкое увеличение плотности дислокаций?

Остроумный механизм размножения дислокаций был предложен английскими физиками Франком и Ридом, которые пришли к этой идее в 1950 г. практически одновременно и независимо. Утверждают, что разница составила всего несколько часов, но мы не знаем точно, кто из них был первым. Поэтому механизм размножения дислокаций называли именем обоих ученых — механизм Франка — Рида.

Согласно идее Франка и Риды источником, порождающим дислокации, является отрезок дислокационной линии, закрепленный по концам, в точках *A* и *B* (рис. 45). Эти точки в дальнейшем будем считать неподвижными. Ими могут служить места соединения дислокации *AB* с другими дислокационными линиями, которые пересекают плоскость скольжения (плоскость чертежа) и поэтому не могут двигаться в ней.

Если приложить напряжение  $\tau$ , дислокация *AB* выгибается вверх. Этому препятствует натяжение дислокационной линии — закрепленная по концам струна всегда старается выпрямиться. Однако, если напряжение  $\tau$  растет, дислокация выгибается все сильнее, пока она не превратится в полуокружность. Расчеты показали, что после этого дислокационная линия теряет устойчивость и расширяется, как показано на рисунке, охватывая все большую и большую площадь. В итоге взаимодействия сближающихся в нижней части плоскости скольжения

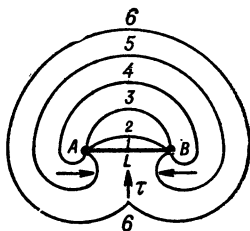


Рис. 45.

двух участков дуги петля замыкается, а дислокация  $AB$  возвращается в исходную позицию. Но продолжает действовать приложенное к кристаллу напряжение  $\tau$ , и процесс многократно повторяется.

## § 6. Дислокации — желанные и гонимые

В 30 — 40-х годах нашего века представления о дислокациях с большим трудом пробивали себе дорогу в физике твердого тела и прочно утвердились пожалуй, лишь в 50-х годах, когда самые упорные противники уже не могли отрицать их существование (тогда они начали отрицать важность их роли). Теперь гонимые прежде дислокации поселились уже и в школьных учебниках физики, а это значит, что их позиции незыблемы. Поэтому вопрос о том, нужны они или не нужны, приобрел совсем иное звучание. Если раньше имелось в виду «нужны ли физике металлов?», то сейчас — «нужны ли металлу?».

Этот вопрос, как и многие ему подобные, не имеет однозначного ответа, так как у проблемы, как минимум, две стороны. С одной стороны, дислокации — это носители пластичности, а пластичность металлу необходима. С другой, — дислокации несут ответственность за низкое сопротивление металла пластической деформации, за низкую прочность на сдвиг, а прочность металла тоже является его главнейшей привилегией. А поскольку дислокации изменяют и физические свойства металла, влияют на процессы разнообразных внутренних превращений в сплавах, на параметры диффузии в твердом состоянии, здесь есть еще третья сторона, четвертая и т. д.

Первое и прямое следствие размножения дислокаций в ходе пластической деформации — это знакомое всем явление наклепа металла. Наклеп выражается в том, что чем сильнее мы деформируем металл, тем больше он сопротивляется деформации, а графически — в том, что линия  $AB$  диаграммы  $\sigma - \epsilon$  (рис. 13) имеет положительный наклон к оси деформаций. Каждая новая порция деформации требует все большего напряжения.

По мере развития пластического течения увеличивается число дислокаций, покидающих металл. Они выходят на поверхность, формируют там ступеньки, изменяют тем самым форму металла, в общем создают то, что мы называем деформацией и измеряем при испытании

образцов (при прокатке или ковке металла). Но, как в сказке, на смену им приходят сотни других, действуют источники Франка — Рида, наполняется дислокациями весь объем деформируемого металла. Рост плотности дислокаций приводит к уменьшению расстояний между ними, они вступают во взаимодействие друг с другом, образуют сложные сплетения, запутанные клубки. В такой сильно развитой дислокационной структуре движение каждой следующей дислокации все более затрудняется.

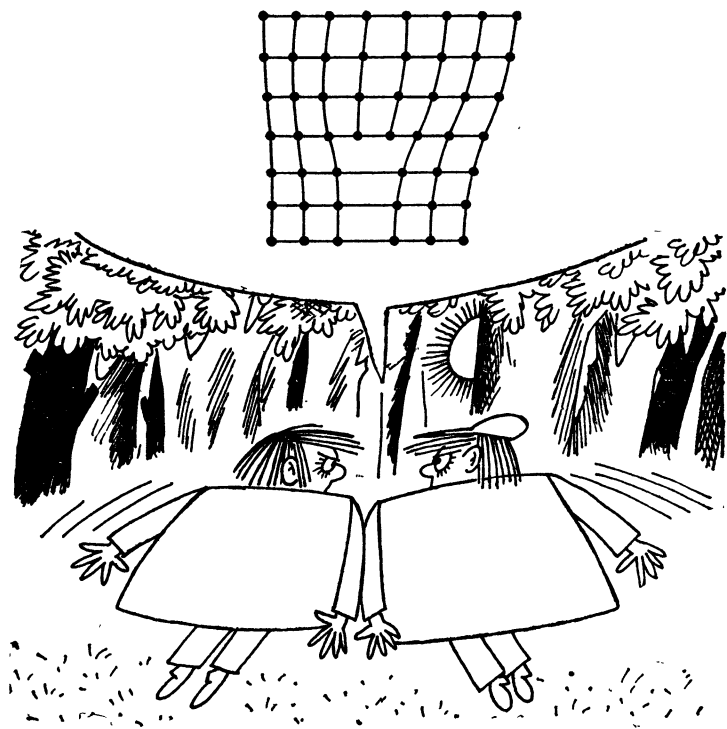


Рис. 46.

Легко понять, что если две одинаковые краевые дислокации сблизятся на межатомное расстояние, то это должно вызвать очень большие искажения решетки (рис. 46). Если первая из них встретила какую-либо преграду в своем движении (например, границу зерна) и была оста-

новлена ею, то она будет препятствовать приближению второй, отталкивать ее. Значит, на источник Франка — Риды кроме сил натяжения дислокации будет действовать встречное напряжение, и чтобы он продолжал работать, нужно увеличивать внешнее напряжение  $\tau$ .



Рис. 47.

Помимо той плоскости скольжения, которая начинает действовать первой, в процесс деформации постепенно вовлекаются и другие, ее пересекающие. Соответственно, каждая дислокация сталкивается на своем пути не только со своими прямыми сородичами, рожденными тем же источником (как на рис. 45), но и с другими, расположенными или двигающимися под разными углами к ее плоскости скольжения. Она как бы продирается через лес других дислокаций. Металлофизики так и говорят — «дислокационный лес». Словно как в сказке, чем дальше (по оси  $\varepsilon$  на рис. 13), тем гуще становится этот лес и тем труднее двигаться нашему герою.

В конце концов способность металла к пластической деформации исчерпывается и происходит его разрушение. Так проявляется двойственность той роли дислокаций, которую они играют в судьбе металла, подвергну-

того действию возрастающего напряжения. Вначале они помогают металлу изменять форму и тем самым сохранять свою целостность в борьбе с внешней силой, но при этом потихоньку «роют ему могилу», сами затрудняя свое движение и приближая момент разрушения.

С двумя дислокаций мы еще столкнемся и в дальнейшем. А сейчас можно подвести некоторые итоги, а задом уже с новых позиций вернуться к нескольким вопросам, которых мы коснулись в гл. 2.

Итак, что значит запретить пластическую деформацию (с. 28)? Это значит создать кристалл, в котором практически нет дислокаций. Такие кристаллы — усы уже находят применение в технике.

С другой стороны, сопротивление пластической деформации металла можно увеличить, подвергая его пластической деформации. Эта фраза, возможно, немного режет слух, но в ней выражена суть явления наклепа. Ведь нам не обязательно доводить процесс деформирования до разрушения. Если мы остановим его в точке  $A'$  диаграммы  $\sigma - \epsilon$  (рис. 13) и разгрузим образец, то при последующем нагружении пластическая деформация возобновится после того, как напряжение вновь достигнет значения, соответствующего этой же точке  $A'$ . Это означает, что материал, испытавший пластическую деформацию, равную  $\epsilon_{\text{ост}}$ , имеет более высокий предел упругости, чем исходный недеформированный материал. Вместе с тем пластичность деформированного материала меньше, чем исходного, потому что точка  $A'$  в шкале деформаций находится ближе к моменту разрушения, чем точка  $A$ .

Таким образом, под влиянием пластической деформации металлы становятся тверже, прочнее, но одновременно и более хрупкими. Это знает каждый, кто ломал руками металлическую проволоку: второй раз согнуть ее труднее, чем первый, третий перегиб требует еще больших усилий и т. д. Если снижение пластичности металла допустимо по условиям его последующей службы, то явление наклепа используется для его упрочнения. Особенно широко применяется в технике наклеп поверхности изделий, предназначенных для работы в условиях знакопеременных нагрузок, в условиях, вызывающих износ, и др.

Но и здесь есть другая сторона проблемы — технологическая. Если нам нужно получить методами пластиче-

ской деформации тонкую проволоку из толстого прутка, наклеп будет мешать нам сразу по двум причинам. Во-первых, металл упрочняется, и по мере его утонения будут требоваться все большие усилия. Во-вторых, уменьшается его пластичность, и где-то на промежуточных стадиях процесса проволока начнет рваться. В этом случае дислокации надо изгнать из металла, надо вернуть его структуру в исходное состояние, понизить прочность, увеличить пластичность. Это достигается путем нагрева деформированного металла, путем отжига при определенных температурах (обычно не ниже 0,4 — 0,5 от температуры плавления по абсолютной шкале). При таком отжиге плотность дислокаций снова уменьшается до  $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$ .

Процесс изгнания «лишних» дислокаций из металла называют рекристаллизацией. В тех участках структуры, где искажения, вызванные наклепом, особенно велики, зарождаются новые зерна с малой плотностью дислокаций. Далее они растут, их границы продвигаются все дальше, вбирая в себя или сметая на своем пути накопленные при наклепе дислокации. Когда эти новые зерна в своем росте сталкиваются друг с другом, мы получаем как бы новорожденную поликристаллическую структуру. Теперь можно снова деформировать металл до определенного предела и, если потребуется, повторить операцию отжига и т. д.

А что если пластически деформировать металл сразу при повышенной температуре, превышающей температуру рекристаллизации? «Какая смелая мысль!» — скажет иронически настроенный читатель. Ведь это и есть так называемая горячая деформация металлов, которую человек использует уже тысячи лет. При горячей деформации одновременно с наклепом идет рекристаллизация, и металл в руках кузнеца ведет себя, как тесто в руках повара. Кузнец, однако, должен быть проворным — по мере остывания металла последствия наклепа все настойчивей заявляют о себе.

Конечно, деформация при одной и той же температуре для одних металлов будет горячей, а для других холодной. Например, чистый свинец можно легко деформировать пальцами при комнатной температуре, и хотя наощупь он холодный, его деформация будет горячей ( $T_{пл} = 600 \text{ К}$ ;  $0,5 T_{пл} = 300 \text{ К} = 27^\circ \text{С}$ ). Вольфрам же нужно будет нагревать до температуры более  $1500^\circ \text{С}$

( $\sim 1800$  K), так как он плавится при температуре около 3700 K.

Есть много других случаев, когда дислокации желанны и когда, наоборот, нужно стараться от них избавиться. В частности, искажая атомное строение металла, они влияют на его электрические, магнитные и другие физические свойства. Увеличение плотности дислокаций приводит к улучшению некоторых из этих свойств и к ухудшению других.

Вернемся теперь к вопросу о релаксации и внутреннем трении в металлах. Мы уже говорили о том, что существуют более мощные источники рассеяния энергии, чем те, о которых шла речь в гл. 2. Это, конечно, и есть дислокации. Если напряжения достаточно велики, чтобы сдвинуть дислокации с места, то внутреннее трение резко возрастает, хотя деформация еще может оставаться упругой. Например, если действие источника Франка — Рида остановить на стадии 2 или 3 (рис. 45), то при разгрузке дислокация  $AB$  вернется в исходное положение и остаточной деформации не будет. Но кристаллическая решетка всегда оказывает сопротивление движению дислокации. При скольжении дислокации, т. е. при переходе ее из исходного положения в позицию 2 или 3, возникают силы «трения», которые и переводят часть энергии деформации в тепло. То же самое будет происходить, когда напряжение изменит знак, и дислокация будет выгибаться в другую сторону. В результате на диаграмме  $\sigma - \epsilon$  (рис. 23) появится широкая петля, площадь которой и есть мера внутреннего трения.

Чтобы уменьшить <sup>вн</sup>внутреннее трение, обусловленное обратимым движением дислокаций, нужно уменьшить их число или в максимальной степени ограничить их подвижность. Наоборот, когда требуется высокое демпфирование, когда нужно добиться быстрого затухания колебаний, мы стремимся к увеличению числа дислокаций и их подвижности.

Между прочим, наклеп и рекристаллизация — это не единственный способ регулирования количества дислокаций, а взаимодействие с другими дислокациями — не единственная причина изменения подвижности. В некоторых чистых металлах и во многих сплавах существуют другие рычаги управления дислокационной структурой, и мы скоро с ними познакомимся.



И наконец, о влиянии дислокаций на диффузию и вообще об их взаимоотношениях с атомами примесей или легирующих элементов в сплавах. Эта тема заслуживает краткого, но отдельного разговора.

## **§ 7. Дислокации — ловушки и дислокации — проводники**

На рис. 41 хорошо видно, как дислокация искажает кристаллическую решетку. Над плоскостью скольжения, в зоне, где есть один лишний атом, межатомные расстояния меньше, чем вдали от дислокации: это область сжатия в ядре дислокации. Под плоскостью скольжения расстояния между атомами наоборот значительно больше; это — зона растяжения.

Посмотрим теперь, как это отразится на поведении сплавов, т. е. что будет, если в решетке, кроме атомов основного компонента, есть еще и посторонние атомы.

Вообще при сплавлении разных металлов или металла с неметаллом и последующей кристаллизации расплава образуются твердые растворы двух основных типов — замещения и внедрения. В первом случае атомы второго компонента замещают в узлах решетки атомы растворителя, а во втором — когда радиус атомов растворенного элемента мал — они внедряются в межузлия решетки растворителя. Пример такого раствора (углерод в железе) мы уже рассматривали.

Атомы второго компонента в твердом растворе так же, как и дислокации, искажают кристаллическую решетку растворителя. Если они занимают позиции внедрения, т. е. располагаются в межузлиях решетки основного компонента, то являются центрами растяжения, раздвигают соседние атомы. В растворах замещения знак деформации решетки зависит от соотношения размеров атомов растворенного элемента и растворителя. Если первые крупнее, они будут растягивать решетку, а если наоборот, то сжимать ее.

Ясно, что посторонние атомы и дислокации не будут безразличны друг к другу. Ведь вблизи ядра дислокации есть уже готовые удобные места на все случаи жизни. Если атом второго компонента вызывает растяжение решетки, то он с готовностью займет позицию под краем лишней полуплоскости, где решетка уже растянута. Если же атом сжимает решетку, то его законное ме-

сто — с противоположной стороны от плоскости скольжения. В любом из этих случаев суммарная энергия искажений решетки, вызванных присутствием в ней дислокации и постороннего атома, уменьшится, а это значит, что между ними существует сила упругого взаимодействия, они испытывают взаимное притяжение.

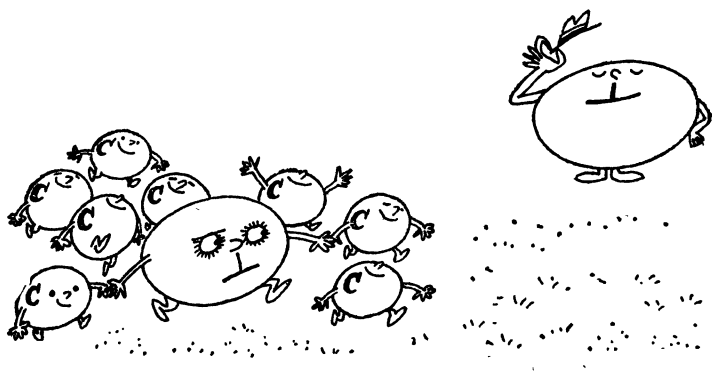


Рис. 48.

Дислокацию, конечно, труднее сдвинуть с места, чем примесный атом, поэтому в этой паре дислокация является горой, а атом — Магометом. «Если гора не идет к Магомету, то Магомет идет к горе» и занимает около нее отведенное ему место. Такой процесс диффузионного перемещения атомов второго компонента к дислокациям приводит в конечном счете к образованию так называемых атмосфер или облаков — скоплений этих атомов вдоль дислокационных линий. Когда все наиболее удобные (ближайшие к ядру) места вдоль дислокации оказываются занятыми, атмосферу считают насыщенной. Скорость насыщения определяется диффузионной подвижностью атомов, которая в свою очередь резко (по экспоненциальному закону) зависит от температуры. Атомы примесей внедрения могут образовывать атмосферы на дислокациях даже при комнатной температуре. Например, в  $\alpha$ -железе, содержащем углерод, этот процесс заканчивается примерно за одни сутки. В других растворах для образования атмосфер может потребоваться некоторый подогрев.

Образование облаков примесных атомов на дислокациях имеет важные последствия. Во-первых, это при-

водит к резко неоднородному распределению второго компонента в растворе. Во-вторых, — и это главное — изменяются свойства самих дислокаций, в частности, уменьшается их подвижность. Дислокация, окруженная атмосферой, может двигаться в решетке либо вместе со своей свитой, либо должна вырваться из невольного плена.

В первом случае облако примесных атомов резко уменьшает скорость дислокаций, поскольку подвижность атомов регулируется главным образом температурой и определяется величиной коэффициента диффузии, а скорость дислокаций зависит, в основном, от величины действующего напряжения. При достаточно высоких напряжениях скорость дислокаций может приближаться к скорости звука в металле — скорости распространения упругих волн. Даже при высоких температурах атмосфера не может угнаться за такой быстрой дислокацией, но и не хочет расставаться с ней. В итоге возникает сила притяжения между дислокацией и не поспевающей за ней атмосферой. Эта сила направлена против приложенной внешней силы.

Во втором случае, когда дислокация вынуждена порвать со своим окружением и уйти вперед, на это нужно затратить дополнительную работу, преодолеть силу ее взаимодействия с атмосферой. Как видно, в любом случае дислокации, «витающей в облаках», приходится не сладко — она находится в худшем положении по сравнению с дислокациями, не обремененными атмосферами или, как их называют, «свежими» дислокациями.

Теперь посмотрим на ситуацию с другой стороны — «глазами» примесных атомов. Допустим, что какая-либо сила (обычно она возникает, когда в кристалле есть области с большим и меньшим содержанием данной примеси) заставляет их двигаться, диффундировать по решетке в определенном направлении (в сторону области с меньшей концентрацией). Если в этом своем движении атомы встретят на пути дислокацию, то она будет играть роль ловушки. Она будет захватывать движущиеся атомы, стремясь включить их в свою атмосферу. Даже если у нее не хватит сил пленить странствующий атом, она по крайней мере может притормозить его движение. В диффузионных терминах это звучит так: увеличивается время оседлой жизни атома, вблизи дислокации уменьшается частота его скачков в нужном ему направлении. Дисло-

кация как бы приглашает путника зайти в гости и хоть немного отдохнуть в удобной позе.

Возможен и другой вариант, когда встретившаяся атому дислокация ориентирована так, что ее ось совпадает с направлением диффузионного потока. В этом случае атом, наоборот, имеет удобный канал для своего движения, так как в ядре дислокации есть области, где промежутки между атомами основного компонента расширены. Эту область облегченной диффузии называют «дислокационной трубкой», по которой атом проскакивает, как говорится, «со свистом». Коэффициент диффузии по дислокационным трубкам составляет  $\sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с (такой же порядок имеет коэффициент диффузии атомов в жидком металле), т. е. он в миллиарды раз превышает коэффициент диффузии в нормальной, неискаженной решетке при не очень высоких температурах.

Этот эффект сильно напоминает другую интересную задачу, к решению которой причастен знаменитый лорд Кельвин: почему следы на мокром гессе в первый момент сухие? Причина этого на первый взгляд странного явления в том, что ступая на мокрый песок, мы нарушаем предельно плотную упаковку песчинок, которая образовалась в естественных условиях. При этом увеличивается объем пор, которые могут быть заполнены водой. Вода уходит с поверхности песка и след оказывается сухим. Так и диффундирующие атомы легко просачиваются по каналу с нарушенным порядком укладки атомов основы.

## § 8. Сверхпластичность

Разобравшись в дислокационном механизме пластической деформации металлов, мы должны теперь вернуться к самому понятию «пластичность». Будем считать пластичным материал, который выдерживает большую относительную деформацию без разрушения. При растяжении, например, мерой пластичности материала будет величина относительного удлинения к моменту разрушения,  $\epsilon_{\text{разр}}$ . Обычные технические металлы и сплавы обладают значительной пластичностью. Весьма пластичными считают такие металлы, у которых  $\epsilon_{\text{разр}}$  приближается к 50 %. Это значит, что растягиваемый образец из такого металла может увеличить свою длину в 1,5 раза и лишь затем разрывается на 2 части.

Сверим приведенную цифру с нашим житейским опытом. Относительное удлинение наружных слоев материала при изгибе  $\epsilon = B/2\rho$ , где  $B$  — толщина пластины или диаметр проволоки, а  $\rho$  — радиус дуги, в которую мы хотим превратить эту пластину или проволоку (этим соотношением мы уже пользовались в гл. 2). Простой расчет покажет, что пластину из материала, имеющего  $\epsilon_{\text{разр}} = 50\%$ , можно изогнуть до соприкосновения сторон (рис. 49) и она при этом не сломается. Про такой материал каждый из нас скажет: «Да, он очень пластичен».



Рис. 49.

Обратимся вновь к диаграмме деформации (рис. 13), вокруг которой развиваются главные события в нашей книге. Ясно, что пластичность материала — это протяженность линии диаграммы  $\sigma - \epsilon$  по горизонтальной оси (за вычетом малой величины  $\epsilon_{\text{упр}}$ , которой здесь можно пренебречь). На участке между  $\sigma_{\text{упр}}$  и  $\sigma_{\text{в}}$  пластическая деформация развивается равномерно по длине образца, все его диаметры при удлинении уменьшаются примерно в одинаковой степени. Способность материала к такой равномерной деформации связана с его наклепом.

Суть явления наклепа мы уже рассмотрели в § 6. Помните, «чем дальше в лес...»? По мере накопления пластической деформации  $\epsilon$  (или  $\gamma$ ) увеличивается плотность дислокаций  $\rho$  ( $\epsilon \sim \rho$ ), и нужно все более высокое напряжение, чтобы испускаемые источниками дислокации могли «продираться через лес», который становится все более дремучим. Среднее расстояние между дислока-

циями равно  $1/\sqrt{\rho}$ . Если принять, что напряжение, необходимое для движения дислокаций, обратно пропорционально среднему расстоянию между дислокациями — «густоте леса» ( $\sigma \sim \sqrt{\rho}$ ), то получится соотношение между напряжением и пластической деформацией ( $\sigma \sim \sqrt{\epsilon}$ ), которое приближенно описывает ход диаграммы на интересующем нас участке.

Однако диаграмма характеризует поведение материала, так сказать, в макромасштабе. В микромасштабе картина несколько сложнее. В силу неоднородности процесса деформации («работают» лишь определенные плоскости скольжения, а между ними остаются прослойки слабодеформированного материала), в силу природной неоднородности структуры самого материала и в силу действия других случайных обстоятельств диаметры образца в разных его участках могут несколько различаться. Допустим, что в ходе пластической деформации какой-либо участок длины образца уменьшил площадь своего сечения в большей степени, чем соседний. С давних пор такое местное утонение материала ученые ласково называют «шейкой», хотя на наш взгляд, здесь более уместным был бы столь же научный термин «талиа».

Поскольку внешняя нагрузка одинакова для всех поперечных сечений образца, напряжение в шейке больше, чем в соседнем участке, и, казалось бы, здесь процесс пластической деформации должен развиваться быстрее, и именно здесь в конце концов произойдет разрыв образца. Но раз сечение в шейке уменьшилось сильнее, чем в соседней части, значит в этом месте материал испытал большую деформацию, плотность дислокаций возросла на большую величину, продолжение деформации требует больших напряжений. Участок с шейкой более «наклепан», чем соседний, который может деформироваться при меньшем внешнем напряжении. Поэтому процесс деформации в области шейки приостанавливается, а при дальнейшем растяжении площади сечения в разных участках выравниваются. Таким образом, наклеп обеспечивает устойчивость процесса «пластического течения» материала.

К сожалению, способность материала к наклепу, к упрочнению в ходе пластической деформации, как мы уже знаем, постепенно исчерпывается. На это указывает и сам вид зависимости  $\sigma \sim \sqrt{\epsilon}$ . Каждая новая

«порция» деформации требует все меньшего прироста напряжения, угол наклона линии диаграммы к оси  $\sigma$  становится все меньше и меньше. Это означает уменьшение пластичности материала — приближается момент его разрушения. Действительно, если теперь в каком-то участке образца появится шейка, то материалу уже нечем компенсировать рост напряжения, обусловленный уменьшением площади этого сечения. Процесс равномерного удлинения образца прекращается, и он деформируется теперь только в области шейки. Образец еще некоторое время удлинится (линия диаграммы продолжится за точку  $B$ ), но это удлинение происходит лишь за счет того, что диаметр шейки быстро уменьшается. Вскоре образец разделяется на 2 части.

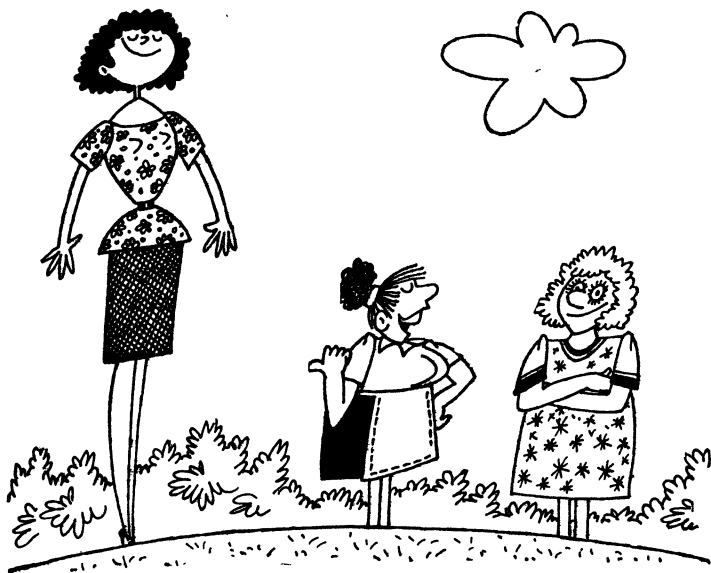


Рис. 50.

Итак, мы снова, кажется, в безвыходном положении. Устойчивость «течения» материала обусловлена его способностью к наклепу, но в кристаллических телах (металлах) плотность дислокаций вблизи точки  $B$  диаграммы деформации приближается к предельным значениям  $\rho = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Мы уже знаем, что при такой плотности

дислокаций среднее расстояние между ними всего в 10 раз больше межатомного расстояния в решетке. Поскольку область сильных искажений кристаллической решетки около линии дислокации простирается на несколько межатомных расстояний, начинают перекрываться ядра соседних дислокаций. Здесь уже теряет смысл само понятие кристаллической решетки — все атомы довольно сильно смещены относительно своих нормальных положений: дислокации в таком «кристалле» размножаться и двигаться уже не могут. Правильный порядок во взаимном расположении атомов настолько нарушен, что наш «перенаклепанный» материал теперь больше похож на аморфное тело. С другой стороны, тесное сближение дислокаций способствует образованию разрывов, трещин (рис. 46), т. е. очагов разрушения.

Но минутку внимания! Слова «аморфное тело» навоят на некоторые размышления. Вспомним, как легко превратить в длинную тонкую нить кусочек смолы, какие тонкостенные сосуды можно выдувать из разогретого стекла. Аморфные вещества способны к огромным равномерным деформациям, процесс их течения очень устойчив, а никакого наклепа при этом нет. Почему же в этом случае появление первой же шейки не вызывает прекращения деформации в остальных участках растягиваемого образца и его быстрое разрушение?

При взаимном смещении слоев газа или жидкости возникает сила сопротивления, обусловленная вязкостью этих веществ и пропорциональная скорости смещения слоев. Сопротивление деформации аморфных твердых тел и обычных кристаллических металлов тоже зависит от скорости деформации. Эта зависимость описывается формулой:

$$\sigma = K \left( \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \right)^m.$$

Здесь  $\sigma$  — это внешнее напряжение, которое вызывает течение тела,  $K$  — константа, коэффициент пропорциональности,  $\Delta \varepsilon$  — приращение относительной деформации за промежуток времени  $\Delta t$ , т. е. выражение в скобках — это скорость деформации. Показатель степени  $m$  называют показателем скоростной чувствительности. Он является мерой чувствительности сопротивления деформации к изменению скорости деформации.



Разница в поведении аморфных и кристаллических веществ при деформации связана с величиной показателя  $m$ . Обычно у металлов этот показатель гораздо меньше единицы, т. е. напряжение, вызывающее их течение, почти не зависит от скорости деформации. А вот у смолы или нагретого стекла он близок или равен единице.

Как же зависит характер процесса пластического течения материала от величины показателя  $m$ ?

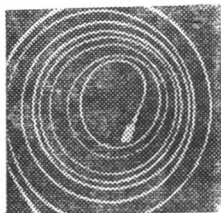
Отметим, что этот процесс в большинстве случаев развивается при постоянной скорости деформирования. Например, при растяжении образца в испытательной машине ее подвижный захват (рис. 12) обычно перемещается равномерно \*) с помощью электродвигателя. При появлении шейки напряжение в этом участке образца увеличивается, а остальные участки перестают деформироваться. Это значит, что обязанность увеличивать длину образца (в соответствии с неумолимо растущим расстоянием между захватами машины) берут на себя не все его участки, которые до этого дружно работали, а только небольшой, «брошенный в беде» участок в области шейки. Скорость деформации в этом объеме образца значительно возрастает, так как изменение расстояния между захватами  $\Delta l$  достигается за счет удлинения малого участка длины. Рост скорости деформации в соответствии с приведенной выше формулой ведет к увеличению напряжения, необходимого для продолжения течения. Чем выше показатель  $m$ , тем больше требуемый прирост  $\sigma$ , и при достаточно высоких значениях  $m$  уже становится легче вовлечь в процесс течения другие участки с большей площадью сечения, чем продолжать деформировать тонкую, но «упрямую» шейку. Так шейка переходит на соседний участок длины образца, где ситуация повторяется и т. д. Получается, что шейка «бегает» вдоль оси образца, как бы выискивая слабые места.

---

\*) Вообще говоря, здесь требуется некоторое уточнение. При постоянной скорости движения захвата скорость деформации  $\Delta \epsilon / \Delta t$  в ходе растяжения постепенно уменьшается. Если разбить процесс накопления относительного удлинения  $\epsilon = \Delta l / l_0$  на ряд этапов, то одинаковый прирост длины  $\Delta l$  в каждом следующем этапе надо будет относить к все большей исходной (для данного этапа) длине  $l_0$ . В связи с этим либо приходится мириться с некоторым непостоянством скорости деформирования в обычных испытаниях на растяжение, либо применять специальные приемы для поддержания ее строго постоянной.

Но если показатель  $m$  имеет достаточную величину (опыт показал, что он должен быть не меньше 0,3), шейка нигде не может найти окончательного пристанища. Бегающая шейка «выглаживает» образец по всей его длине, процесс течения в макромасштабе остается равномерным.

Теперь дело за малым. Остается найти такие металлы или сплавы и такие условия их обработки, чтобы они обладали высокой скоростной чувствительностью сопротивления деформации, имели высокие значения  $m$ . Ведь в обычных условиях деформации металлов величина  $m$  имеет порядок  $10^{-2}$ , и рассмотренный выше механизм не действует.



Как это часто случается, люди сначала сталкиваются с каким-либо явлением, затем разбираются в его причинах, а уже потом (в книжках) описывают все это в обратном хронологическом порядке. Не будем нарушать эту традицию.

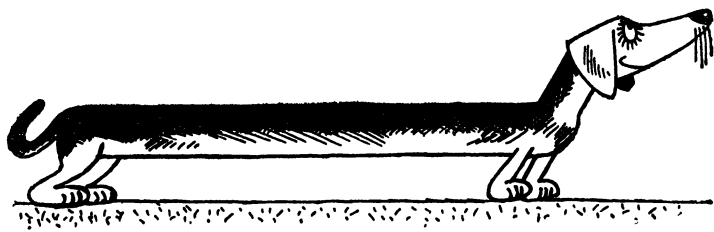


Рис. 51.

В 1934 г. преподаватель металлургии английского Армстронг-колледжа С. Пирсон опубликовал статью с отчетом о результатах испытаний образцов из сплавов свинца с оловом и висмута с оловом. Он обнаружил аномально высокую пластичность этих сплавов (рис. 51). Образцы при растяжении можно было удлинить в 20 раз! На это сообщение не последовало никакой реакции, и работа С. Пирсона вскоре была забыта.

Второе рождение сверхпластичности относится к 1945 г., когда советские ученые А. А. Бочвар и З. А. Сви-дерская обнаружили необычное поведение сплавов цинка

с алюминием. При небольшом подогреве эти сплавы становились чрезвычайно мягкими и давали огромные остаточные деформации. Академик А. А. Бочвар первым предложил сам термин «сверхпластичность», который в дальнейшем стал общепринятым, и указал на существенные черты явления. В частности, в его определении понятия сверхпластичности подчеркивается не только способность сплавов к большим деформациям, но и то, что сопротивление деформации сплава в этом состоянии очень мало. Твердость сплава цинка с алюминием была в несколько раз ниже твердости самого мягкого из компонентов.

В последующие годы исследования в области сверхпластичности получили бурное развитие. Были найдены многие десятки сплавов, которые можно деформировать на сотни и тысячи процентов (!) при ничтожно малых напряжениях порядка 1 — 10 МПа (!). Далее выяснилось, что сверхпластичность не является привилегией каких-то особых сплавов, а практически любой металл или сплав может быть переведен в сверхпластичное состояние. Для этого, конечно, необходимо соблюдение целого ряда условий.

Во-первых, металл или сплав должен иметь мелкие зерна — не более 10 мкм в поперечнике и чем мельче, тем лучше. Во-вторых, температура деформации должна быть достаточно высокой — обычно не ниже  $0,5 T_{пл}$ . В-третьих, скорость деформации должна находиться в определенных пределах — обычно  $10^{-6} \div 10^{-3}$  процентов в секунду.

Рассмотрим смысл этих требований в связи с известными в настоящее время особенностями механизма сверхпластической деформации металлов. В этом процессе важная роль, несомненно, принадлежит так называемому зернограничному скольжению. При сверхпластическом течении, в отличие от обычной пластической деформации (рис. 38), зерна не вытягиваются в направлении действия напряжения, а остаются круглыми. Но при этом они могут менять своих соседей, так что в конечном счете число зерен (а не их размер) в поперечном сечении образца уменьшается, а в направлении оси — увеличивается. Они как бы перекатываются друг по другу наподобие песчинок или гальки, хотя ситуация в металле, конечно, гораздо сложнее. Ясно, однако, что чем более развита межзеренная поверхность, т. е. чем

мельче зерна, тем легче реализуется этот своеобразный механизм деформации.

У каждого зерна в поликристалле более десятка соседей, а форма зерен далека от правильной шарообразной, хотя мы и называли их круглыми. Шарами, как мы помним, даже при самой плотной их упаковке можно занять лишь 74 % объема. Зерна на самом деле имеют форму многогранников и при их взаимных перемещениях и поворотах около границ должны образовываться зазоры.

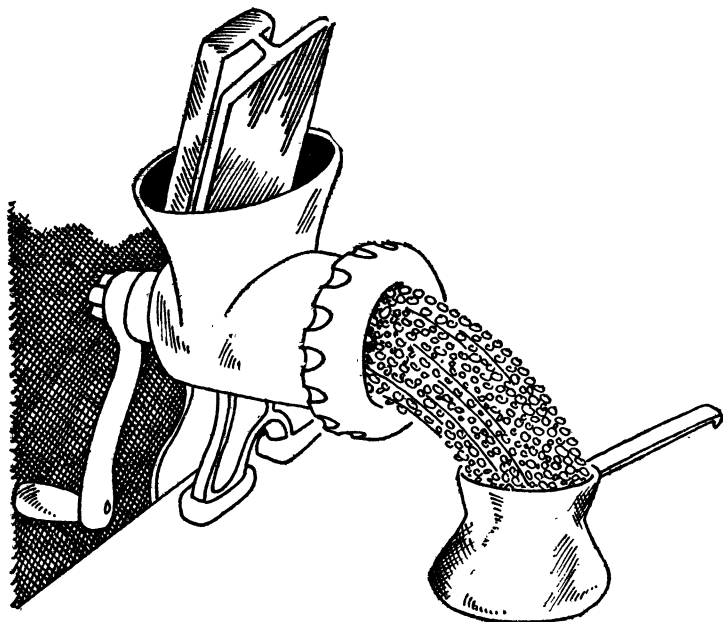


Рис. 52.

Эти поры являются очагами разрушения, из них вырастают трещины, которые могут разорвать образец. Но этого не происходит, и процесс течения спокойно развивается. Значит, одновременно с зернограницным скольжением должны срабатывать и какие-либо механизмы «залечивания» очагов разрушения, что впервые было отмечено А. А. Бочваром еще в 1945 г. Залечивание, или «взаимное приспособление», зерен может быть обеспечено и обычной дислокационной деформацией, и так называемым диффузионным массопереносом. Последние два

процесса выполняют не только вспомогательные функции (залечивание пустот), но могут служить и самостоятельными механизмами деформации металла в состоянии сверхпластичности.

О том, как движение дислокаций приводит к деформации кристалла, мы уже говорили. Поэтому здесь обсудим в общих чертах только диффузионный массоперенос. В этом процессе участвуют вакансии — незанятые узлы решетки. В соответствии с принципом Ле Шателье в растянутых участках решетки вакансии образуются легче, чем в неискаженной решетке. Дело в том, что появление вакансии приводит к сближению атомов, окружающих

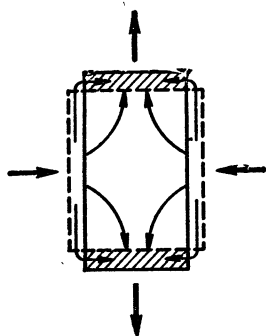


Рис. 53.

незанятый узел, т. е. как бы снимает локальное напряжение в растянутой решетке. Таким образом металл сопротивляется внешнему воздействию. В сжатых областях образование вакантных мест, наоборот, невыгодно. Таким образом, в областях растяжения концентрация вакансий будет выше нормы, а в сжатых участках — ниже. Возникающий вследствие этого поток вакансий, направленный на выравнивание их концентрации, соответствует встречному потоку атомов: в местах, откуда

уходят вакансии, увеличивается число атомов и наоборот (стрелками показано направление движения атомов от сжатых участков к растянутым — рис. 53). Как видно, этот механизм сам по себе работает в нужном нам направлении. Он же может обеспечивать (самостоятельно или вместе с дислокационным скольжением) ликвидацию зазоров у границ (рис. 54). На этом же рисунке видно, как зерна меняют своих соседей — зерна 1 и 3 вошли в соприкосновение, а зерна 2 и 4, наоборот, теперь не имеют общей границы. Видно также, что число зерен в направлении растяжения в результате такого процесса будет увеличиваться, а в поперечных направлениях — уменьшаться. Поскольку и скольжение дислокаций и образование вакансий облегчаются с ростом температуры, становится понятным смысл второго условия ( $T_{\text{деф}} \geq 0,5T_{\text{пл}}$ ). Мы уже знаем, что понятие низкой или

высокой температуры для данного металла обычно имеют смысл в сопоставлении с его температурой плавления. Именно поэтому легкоплавкие сплавы С. Пирсона проявляли сверхпластичность при комнатной температуре, которая была для них достаточно высокой, А. А. Бочвару потребовалось подогревать свои сплавы до 150—200 °С, а для перевода в сверхпластичное состояние, скажем, титановых сплавов, нужны температуры около 1000 °С.

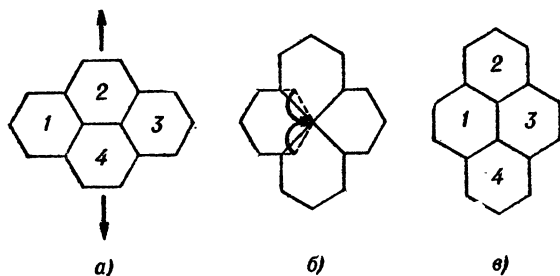


Рис. 54.

Что касается третьего условия проявления сверхпластичности, то нам поможет самый общий, по существу даже формальный, подход к явлению. Если деформация развивается с постоянной скоростью при низком и практически постоянном напряжении, то мы можем представить себе это как результат равновесия процессов упрочнения и разупрочнения материала. Упрочнение увеличивает напряжение, необходимое для продолжения течения, а разупрочнение снижает его, и в итоге оно остается постоянным. Упрочнение связано с необходимостью обеспечить взаимные повороты и перемещение зерен, действие дислокационных источников, образование вакансий и т. д. Разупрочнение — с исчезновением дислокаций на границах зерен, с движением диффузионных потоков, выравнивающих концентрацию вакансий и тем самым снимающих перенапряжение в различных объемах материала. Для реализации всех этих процессов требуется определенное время (кстати, тем меньшее, чем меньше расстояния между границами зерен).

При очень малых скоростях деформации для протекания разупрочняющих процессов времени всегда достаточно, а при слишком высоких — наоборот, всегда не

хватает. Равновесие возможно в некотором промежуточном интервале скоростей деформации, но его довольно легко нарушить. Стоит увеличить скорости, как упрочнение начинает преобладать над разупрочнением, и требуемое для дальнейшей деформации напряжение резко возрастает. Именно в этом интервале скоростей материал обнаруживает высокую скоростную чувствительность течения. Значение  $m$  становится выше 0,3 (иногда  $m$  достигает 0,8—0,85), что и является признаком перехода материала в сверхпластичное состояние.

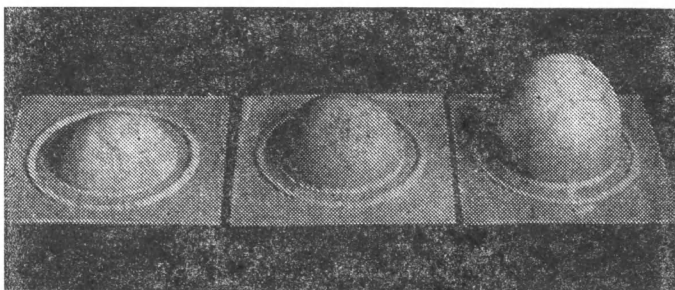


Рис. 55.

Таким образом, выяснилось, что показатель скоростной чувствительности сам зависит от скорости деформации и достигает максимума в указанном выше интервале скоростей.

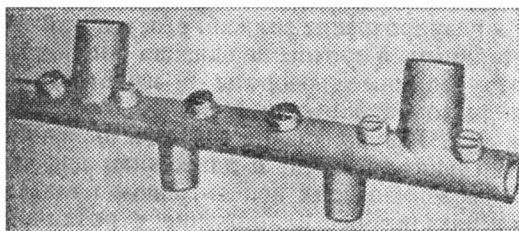


Рис. 56.

К сожалению, все три условия сверхпластичности затрудняют практическое использование этого замечательного явления. Не всегда легко получить достаточно мел-

козернистую структуру материала. Для поддержания заданной температуры процесса требуется подогреваемый деформирующий инструмент, так как в силу третьего условия сам процесс занимает значительное время.



Рис. 57.

Даже самая высокая скорость деформации, при которой еще реализуется сверхпластичность ( $10^{-3}$  процентов в секунду), гораздо ниже обычных скоростей, используемых в практике деформации металлов. Однако и вопросы производительности, и другие технические вопросы, связанные с использованием сверхпластичности, в принципе разрешимы, а преимущества здесь очевидны: из металла за одну операцию можно «выдувать» такие же ажурные изделия, как из стекла или пластмасс. Рис. 55 иллюстрирует возможности металла в сверхпластичном состоянии. Лист из «бочваровского» сплава толщиной 0,03 мм под действием давления газа выдувается в полную сферу диаметром чуть более 100 мм. Не правда ли — неплохой «мыльный пузырь». На рис. 56 показана деталь оборудования кабины самолета «Конкорд», изготовленная за один прием из того же сплава. Ранее такие детали делали из пластмасс, но требования противопожарной безопасности заставили инженеров вновь обратиться к металлу, который оказывается способен и на такое.

А это изделие (рис. 57) получено в Московском институте стали и сплавов. Снимок, вероятно, в комментариях не нуждается.



не хватает длины печей (если сплав необходимо нагревать), не хватает расстояния между стенами комнаты или потолком и полом. А металл мог бы течь и дальше!

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ МЕТАЛЛОВ

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 аналогию с уже известными проявлениями жизнедеятельности человека. Это стремление отражается и на научной терминологии. Такие термины, как «время жизни» или даже «время оседлой жизни» (применительно к частицам), как «живучесть», «усталость» (применительно к конструкционным материалам) — считаются вполне строгими и стали общепринятыми, наряду с сотнями других, им подобных в этом смысле. Открытое сравнительно недавно новое свойство металлических сплавов в силу этих же причин получило название «память формы». Могут ли металлы вспоминать, помнить, забывать?

## § 1. Металл запоминает форму

Мы уже прибегали к этим терминам, когда обсуждали обычные процессы упругой и пластической деформации. Речь идет о запоминании металлом той исходной формы, которую он имел до деформации. Если величина деформации не выходит за пределы упругой зоны ( $\epsilon_{\text{упр}}^{\text{макс}}$  на рис. 13), то после разгрузки размеры тела возвращаются к исходным, а его форма восстанавливается (изогнутое лезвие распрямляется). Именно в этом смысле было сказано, что металл помнит исходную форму, находясь под любым напряжением, не превышающим предела упругости. Такая память металла имеет два важных недостатка.

Во-первых, ее «объем» мал: она хорошо работает только при небольших отклонениях от первоначальной формы, когда деформации измеряются долями процента.

Наши же читатели легко вспомнят (а если нет — вернутся к с. 30), что при деформации около 10 % поведение металла уже характеризуется практически полной забывчивостью (рис. 17).

Значение даже такой «куцей» памяти металлов чрезвычайно велико. Достаточно сказать, что не будь ее, не работала бы ни одна пружина. Кроме того, есть способ увеличить объем памяти. Такую возможность дают сплавы, обладающие сверхупругостью, с которой мы познакомились в гл. 2.

Второй недостаток свойствен и «упругой» и даже «сверхупругой» памяти — он заложен в самой их природе. Чтобы понять его суть, можно снова обратиться к человеческой памяти. Ученые, которые занимаются ее исследованием, определяют память как сложный процесс, включающий фазы запечатления, хранения и извлечения информации. Если проводить условную аналогию между памятью человека и металла, то надо считать, что фаза хранения у последнего реализуется только под нагрузкой. Стоит устранить внешнюю силу, как немедленно и неотвратно наступит фаза извлечения информации» о первоначальной форме тела. Как мы скоро убедимся, технически это очень неудобно. Гораздо интереснее иметь дело с металлом, обладающим полноценной памятью, когда фазы хранения и извлечения независимы и когда хранение не связано с участием посторонних сил.

Здесь мы можем немного забежать вперед и обрадовать читателя сообщением о том, что удалось получить сплавы, имеющие именно такую замечательную память. Они могут хранить исходную форму в своей памяти очень долго, а вспоминают ее при нагреве, так что в наших силах «взывать к памяти» металла в тот момент и в той обстановке, когда это нам потребуется.

Мы рассмотрим вначале внешние проявления эффекта запоминания формы, поговорим немного об истории вопроса и обсудим те удивительные возможности, которые открывает практическое использование этого необычного свойства.

Анализу механизма памяти будет посвящен отдельный параграф, в котором мы выясним заодно и причины сверхупругости, поскольку память формы и сверхупругость — это две стороны одного и того же явления. Поэтому и предельный объем памяти, т. е. величина

деформации, которая исчезает при нагреве, достигает тех же значений ( $\epsilon = 10 - 15 \%$ ), что и в случае сверхупругости.

## § 2. Удивительный бараний рог

Вспомним пример с пластиной толщиной 2 мм, изогнутой по радиусу 10 мм (с. 30). Деформация ее наружных слоев составляет 10 %. Это уже довольно большая деформация, при которой обычный металл почти не помнит исходную форму: упругая часть деформации почти в 20 раз меньше пластической, и концы полукольца лишь чуть-чуть расходятся в стороны при разгрузке.

Когда говорят: «согнуть в бараний рог», имеют в виду именно такие большие деформации, при которых упругой составляющей уже можно пренебречь из-за ее малости. 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. Значит, нужно новое силовое воздействие на металл, надо создать в нем напряжение обратного знака — разгибать рог силой. Если же нагревать пластически деформированный металл, то форма его остается прежней — нет никаких причин для уменьшения или роста величины остаточной деформации.

Теперь сделаем все то же самое с материалом, обладающим способностью запоминать форму. При нагреве такого материала мы становимся свидетелями маленького чуда: пластина (или рог) распрямляется и точно воспроизводит свою прежнюю форму.

Посмотрим, как выглядит эта картина на «языке диаграммы деформации» (рис. 59), к которой добавим третью переменную — температуру. При нагреве растянутого образца обычного металла остаточная деформация не меняется, и соответствующая линия на горизонтальной плоскости диаграммы идет параллельно оси температур. Такой же образец из сплава, запоминающего форму, при температуре  $T_1$  начинает укорачиваться, а при  $T_2$  остаточная деформация уменьшается до нуля.

Интервал температур  $T_1 - T_2$ , в котором происходит «вспоминание» исходной формы, составляет всего не-

сколько десятков градусов (иногда он даже уже и измеряется единицами градусов), а его положение на температурной шкале можно регулировать. Так можно создать условия, когда мы изменяем форму сплава при комнатной температуре, а возвращение его к первоначальной форме происходит в чуть подогретой воде. В результате опыт становится очень наглядным, и на человека, не знакомого с особыми свойствами таких сплавов, он всегда производит ошеломляющее впечатление. Зрителю ведь

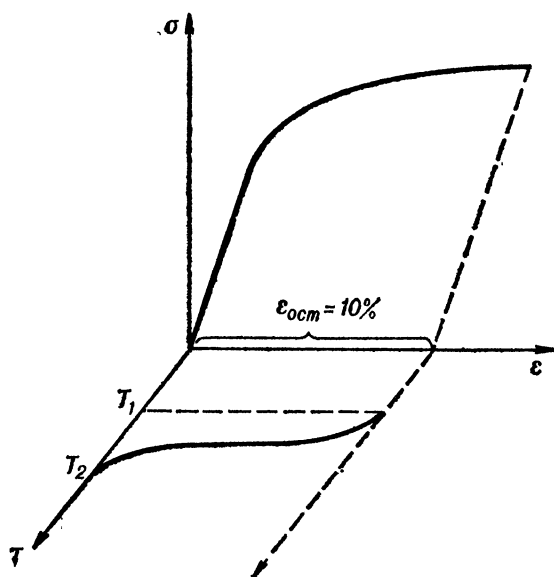


Рис. 59.

неизвестно, какую форму имела прежде, скажем, выпрямленная тонкая проволочка, какую «информацию хранит» она в своей памяти. Можно представить себе его удивление, когда в блюде с теплой водой она вдруг начинает шевелиться, как живое существо, причудливо изгибается и в конце концов воспроизводит, например, контуры его собственного профиля, или очертания его собственной подписи, или какой-либо рисунок (рис. 60).

Эффект запоминания формы, который мы далее будем сокращенно именовать ЭЗФ, конечно, позволяет не

только показывать подобные фокусы. Его не используют и в более серьезных делах, и даже в очень серьезных. Но посмотрим, каковы предельные возможности ЭЗФ.

Мы не случайно сказали: «тонкая проволочка», и на рис. 60 видно, что она действительно тонкая. Почему это важно? Дело в том, что восстановление формы будет полным только тогда, когда при ее изменении не превышена некоторая определенная величина деформаций. Для разных сплавов эта максимально допустимая дефор-

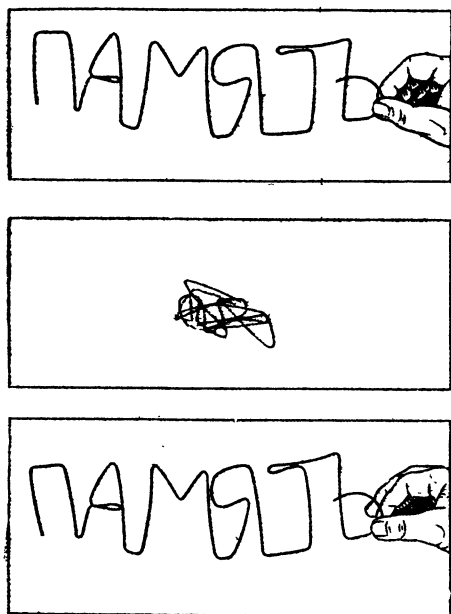


Рис. 60.

мация (объем памяти) имеет разную величину, но обычно она не превышает 10 %. Деформировать сплав, проявляющий ЭЗФ, более чем на 10 % — это значит перегрузить даже его могучую память. В этом случае при нагреве он не полностью вернется к исходной форме. Появятся остаточные изменения размеров тела, приблизительно соответствующие избыточной (сверх 10 %) деформации.

Теперь читатель должен перевести свою собственную память в режим «извлечения информации» о деформиро-

вании изгибом проволок или пластин разной толщины. Если величина относительной деформации задана, то более тонкая проволока допускает изгибы по меньшему радиусу и, в приведенных пределах, может хорошо запомнить более причудливую форму.

### § 3. Самоуправство или хитрость?

Вспомним и еще одну деталь, касающуюся деформации изгибом, а именно то, что при этом одни слои материала растянуты, а другие сжаты. Здесь мы подошли к следующей, обещанной в гл. 2, неожиданности. Изогнутая проволока при нагреве распрямляется или, наоборот, выпрямленная изгибается. Сейчас нам неважно, какую форму мы заложили в ее память, а важно, что в любом случае в процессе «вспоминания» происходит изгибная деформация. Значит, растянутые ранее слои проволоки при нагреве сжимаются, а сжатые — растягиваются. Внимание! Вслушаемся в первую часть фразы: «слои... при нагреве сжимаются». Металлический сплав может сжиматься при нагреве!!! А как же быть с весьма универсальным правилом «тела при нагревании расширяются»?

Слов нет, способность запоминать форму — это удивительное свойство, но совсем не подчиняться общим законам природы было бы явным самоуправством даже со стороны таких уникальных сплавов. Они, конечно, не отменяют термическое расширение, но заставляют более внимательно отнестись к этому явлению. Действительно, термическое расширение обусловлено увеличением расстояний между атомами, что вызывает рост объема тела при повышении температуры. Мы просто привыкли к тому, что этот рост объема тела складывается из увеличения всех трех его размеров, что удлинение при нагреве обычно происходит в равной степени по всем трем осям \*). Именно поэтому в справочниках приводятся коэффициенты «линейного» термического расширения, выражающие относительное удлинение по любой из осей на каждый градус повышения температуры. Для металлов они имеют порядок  $10^{-5} — 10^{-6} \text{K}^{-1}$ . Это зна-

---

\*) Это относится во всяком случае к так называемым изотропным телам, у которых свойства одинаковы по всем направлениям. Примером изотропного тела может служить любой поликристаллический металл, состоящий из множества зерен (монокристаллов), случайным образом ориентированных друг относительно друга.

чит, что при увеличении температуры, например, на 10 градусов относительное удлинение металлического тела в любом направлении составляет  $10^{-4}$  —  $10^{-5}$  или  $10^{-2}$  —  $10^{-3}$  %.

Сплавы, обладающие памятью, как и все другие, испытывают термическое расширение, т. е. увеличивают объем \*) при нагреве. Однако в температурном интервале «вспоминания» формы изменения линейных размеров в разных направлениях могут различаться и величиной и знаком. Если мы растягивали образец, то он удлинялся в осевом направлении, но сжимался в двух других. Вспоминая при нагреве исходную форму, он будет сжиматься вдоль оси, а диаметр его увеличится, причем в относительном выражении деформация растяжения будет чуть больше, так что объем образца в целом возрастет именно на ту величину, которая соответствует изменению его температуры. Сами же изменения линейных размеров при этом достигают 10 %, т. е. примерно на 3—4 порядка (!) превышают те, на которые способен обычный металл при таком же изменении температуры (на те же 10 градусов).

Если мы сжимаем цилиндрический образец вдоль оси, то в двух других измерениях он увеличивается в размерах, а при «вспоминании» все изменения пойдут в обратном порядке. Теперь уже материал, обладающий памятью, будет сжиматься при нагреве в двух направлениях, а в третьем, конечно, растягиваться.

И только в главном вопросе природа не позволяет себя перехитрить: даже сплавы, проявляющие ЭЗФ, не могут при нагреве сжиматься сразу по всем трем осям, так как это привело бы к уменьшению объема. Но уже то, что эти сплавы могут сжиматься при нагреве в одном и даже в двух направлениях имеет неоценимое практическое значение.

#### § 4. Сплав способен на самоубийство?!

Раз уж мы черпаем научные термины из органического мира, то, призвав на помощь воображение, можем назвать убийством металлического образца его испытание, доведенное до разрушения. Вспомним хотя

---

\*) Здесь имеется в виду чисто термическое увеличение объема и не рассматривается изменение объема сплава за счет того внутреннего превращения, которое ответственно за ЭЗФ.



бы злобного Прокруста. А теперь посмотрим, что произойдет, если мы будем мешать деформированному сплаву восстанавливать при нагреве его первоначальную форму. Понятно, что в нем возникнут напряжения, он будет стараться устранить препятствие, мешающее ему вернуться к прежним размерам.

Как-то в порядке шутки мы предложили своему недоверчивому приятелю надеть на палец колечко, свернутое из тонкой пластинки (пластинка была изготовлена из

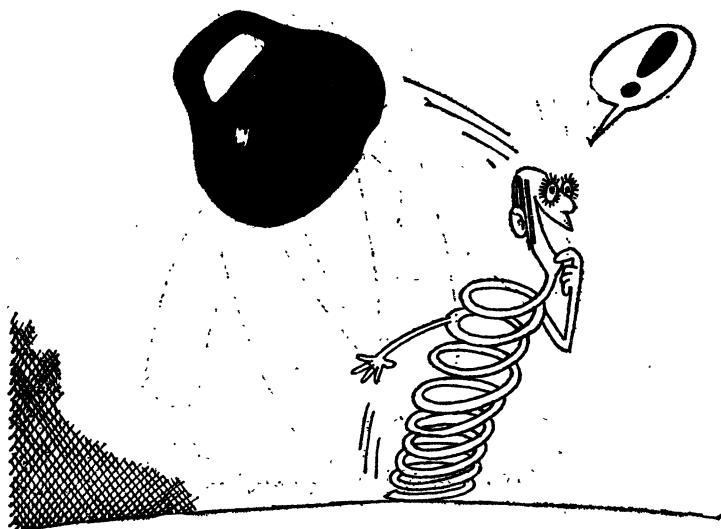


Рис. 61.

сплава, запоминающего форму). Колечко предварительно расширили, а в исходном состоянии оно также имело форму кольца, но несколько меньшего диаметра. Сплав был подобран так, чтобы температура начала «вспоминания» была около  $30^{\circ}\text{C}$ , так что при комнатной температуре его память находилась в фазе «хранения информации». Сначала поведение нашего приятеля было обычным, но кольцо постепенно нагревалось теплом его тела, и вскоре он стал заметно нервничать, все чаще поглядывая на свою руку. В конце концов он запросил пощады, и способ спасти его быстро нашелся: надо было просто подставить палец под струю холодной воды. После этого

давление кольца ослабло и его можно было снять с пальца. А уж потом мы объяснили ему, что процесс восстановления формы еще только начинался, и в интервале от 30 до 37 °С была реализована лишь часть возможного усилия.

Напряжения, которые развивает сплав, если ему мешают вспоминать исходную форму, могут достигать 1000 МПа, что равносильно давлению в 10 000 атм.



Рис. 62.

Поэтому сплав, запоминающий форму, может не только причинять боль, но и совершать полезную работу при нагреве. Простейшая схема двигателя — стержень из такого сплава, жестко закрепленный одним концом (рис. 63). Изогнув его (в пределах допустимой деформации), подвешиваем груз и нагреваем деформированный участок стержня. Возвращаясь к исходной прямолинейной форме, стержень поднимает груз. Заметим, что в этом двигателе нет обычного для тепловой машины газообразного «рабочего тела».

Масса груза, который может поднять стержень из нашего сплава, конечно, ограничена: как и обычные «забывчивые» металлы, сплав имеет предел упругости

и предел прочности, т. е. при определенных напряжениях он будет пластически деформироваться и далее разрушаться. Сплав в этом смысле безразлично, нагружаем ли мы его в разрывной машине или так, как на рисунке, хотя в этом случае мы можем условно принять, что стержень нагружает себя сам (если отвлечься от того, что мы все же участвуем в этом, подводя к деформированному участку тепло).

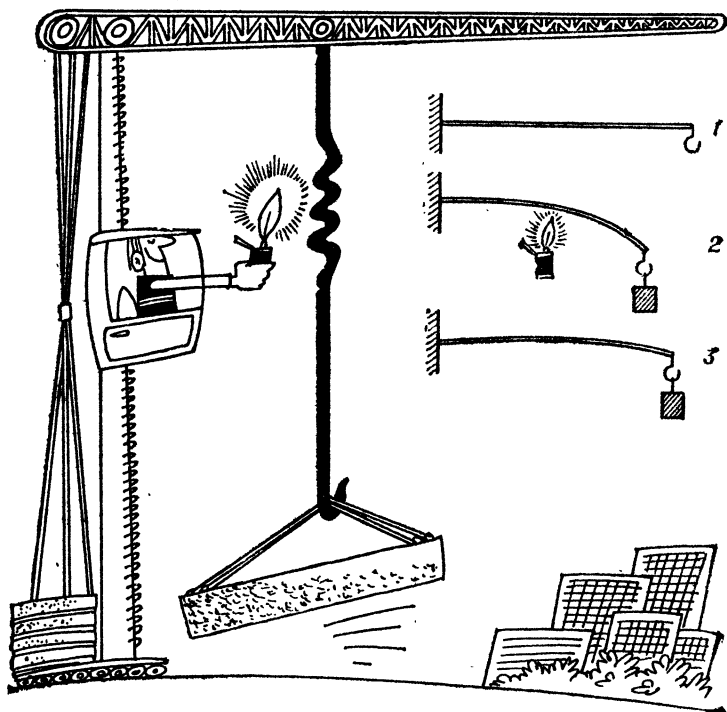


Рис. 63.

Если масса груза такова, что необходимое для его подъема напряжение не превышает предела упругости сплава, то стержень распрямится полностью. В положении 3 мы зафиксируем лишь небольшой упругий прогиб стержня, величину которого легко рассчитать по закону Гука.

Нарастивая груз, мы как бы требуем, чтобы сплав развивал все более и более высокое напряжение. Наступает момент, когда он уже не в силах поднимать гирию,

а это значит, что под действием возникающих в стержне напряжений происходит обычная «дислокационная» пластическая деформация. Вся та деформация, которая могла бы исчезнуть при возвращении к прежней форме, превращается в остаточную. Стержень забывает исходную прямолинейную форму и принимает новую — изогнутую. Именно она отпечатывается теперь в его памяти, и если после охлаждения мы снимем груз и распрямим стержень, то при последующем нагреве он будет возвращаться к своей новой форме 2.

Нередки случаи, когда в силу определенных причин (см. гл. 5) резко ограничивается способность металлов к пластической деформации, они становятся хрупкими. Хрупкий металл разрушается без заметной остаточной деформации при напряжениях, не превышающих предела упругости. Если привести в такое состояние сплав, из которого изготовлен стержень, то, начав поднимать груз, он в какой-то момент развалится на куски. Как мы уже договорились, сплав сам нагружал себя (мы только подвели тепло), поэтому этот его поступок можно считать самоубийством. Стержень покончил с собой, мучительно вспоминая свою прежнюю форму и пытаясь поднять непосильный груз.

## § 5. Пророки древние и современные

Американский ученый, доктор Симон, занимающийся применением сплавов с памятью формы в медицине, считает, что это свойство было известно еще в библейские времена. Согласно библейской легенде Господь однажды приказал пророку Моисею бросить на землю жезл, который тот держал в руке, и жезл тут же превратился в змея. Господь велел Моисею схватить змея за хвост, и змей снова превратился в жезл в его руке. Не будем относиться к этой истории серьезно, но внешне эволюция формы жезла действительно очень сходна с тем, что происходит с запоминающими сплавами.

Современная история вопроса начинается, пожалуй, с 1932 г., когда известный металлофизик Оландер на собрании Шведского металлургического общества сообщил о «резиноподобном поведении» сплава золота с кадмием. Он впервые столкнулся с необычным явлением,

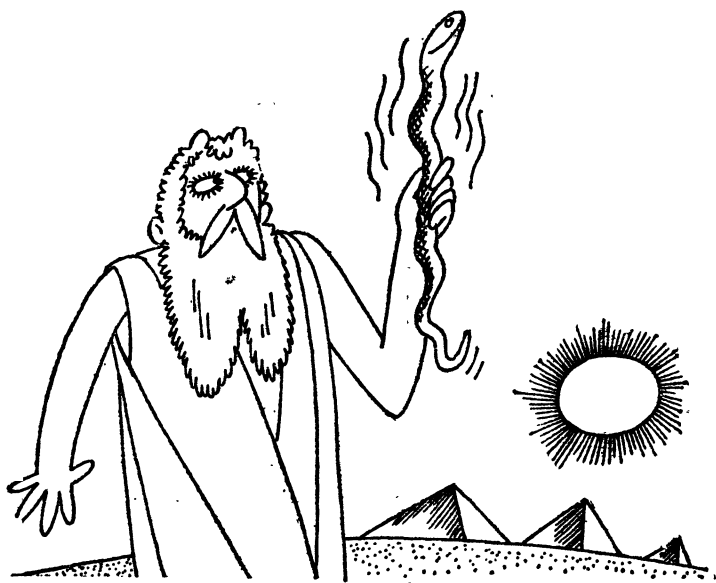


Рис. 64

которое мы теперь называем сверхупругостью, но причины его еще долгое время оставались неясными.

В 1948 г. один из крупнейших советских металлофизиков академик Г. В. Курдюмов предсказал, а уже в следующем году вместе со своим сотрудником Л. Г. Хандросом экспериментально обнаружил новый тип внутренних превращений в сплавах. Нам придется разобраться, в чем суть этих превращений, поскольку, как выяснилось позже, именно они ответственны за проявление сверхупругости и ЭЗФ в сплавах, в которых эти эффекты выражены наиболее ярко. В 1980 г. это было признано открытием и его авторы получили соответствующий диплом, а само явление — название «эффект Курдюмова».

Всего через два года после опубликования работ Г. В. Курдюмова, в 1951 г., американские ученые Чэн и Рид обнаружили, что сплав золота с кадмием, который теперь называют сплавом Оландера, помимо сверхупругости способен проявлять и ЭЗФ. А в 1958 г. на Всемирной выставке в Брюсселе уже демонстрировался при-

митивный двигатель со стержнем из этого сплава, построенный именно по той схеме, которую мы рассмотрели (рис. 63).

Однако все эти изыскания до 1963 г. воспринимались многими как нечто экзотическое, не имеющее никакого прикладного значения; красивые фокусы и ничего более. 1963 год стал переломным, отношение к эффектам запоминания формы и сверхупругости резко изменилось. Сотрудники лаборатории военно-морской артиллерии США Бюлер и другие, ведя планомерный поиск сплавов, обладающих высокой стойкостью против коррозии, натолкнулись на сплав никеля с титаном с приблизительно равным содержанием этих двух компонентов. Каждый из двух металлов хорошо сопротивляется коррозии, и сплав получился в этом отношении отличным. Кроме того, оказалось, что он имеет высокую прочность и пластичность. Но вовсе неожиданным и замечательным было то, что он проявлял ярко выраженную способность к запоминанию формы, или сверхупругость, или и то и другое вместе. Величина аномальной деформации, которая исчезала при разгрузке (сверхупругость) или при нагреве (память), составила как раз около 10 %.

Это было редчайшей удачей. Никель и титан значительно дешевле и доступней, чем, например, сплав Оландера, в котором около половины — золото. Сочетание же свойств нового сплава было удивительно благоприятным. Его называли нитинол: «ни» и «ти» — символы компонентов сплава Ni и Ti, а «нол» — первые буквы названия лаборатории, где работали авторы. С тех пор и начался «нитиноловый бум», хотя практическое применение нашли и некоторые другие сплавы, проявляющие ЭЗФ.

#### **§ 6. Космические и земные профессии запоминающих сплавов**

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 (рис. 65). Свернутые или скру-

ченые в компактную форму и уложенные в небольших нишах космического корабля антенны 1 и 3, механизм стабилизации 2, солнечная батарея 4, распрямляются

или выдвигаются из ниши после запуска аппарата на орбиту от действия солнечного тепла. Не правда ли, антенна 1 напоминает самопроизвольно разгибающийся бараний рог? Это можно использовать для создания космического радиотелескопа — компактный моток из тонкой прово-

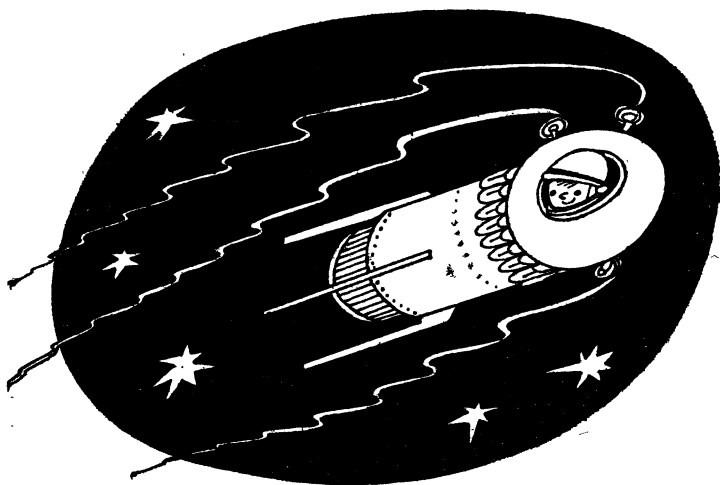
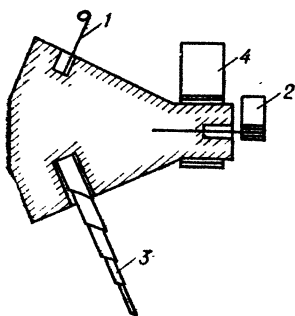


Рис. 65.

локи разворачивается при нагреве в круг диаметром около 2 км!

На рис. 66 показана схема простой конструкции для расстыковки блоков летательного аппарата. По команде на расстыковку включается нагрев спирали 2 и выпрямляется основная силовая деталь привода 1. Конструкция отличается простотой и надежностью: здесь не требуется никакого дополнительного двигателя и нет никаких промежуточных деталей, передающих усилие.

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

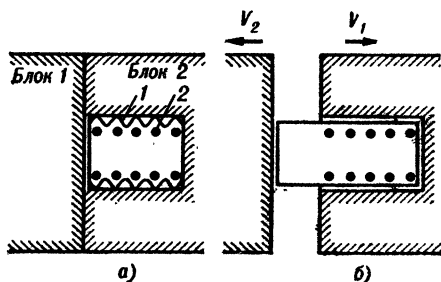


Рис. 66.

Свойство развивать напряжение в процессе «вспоминания» формы 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. 67, позиция 1). В жидком азоте ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) деформируем втулку методом раздачи, так что ее внутренний диаметр становится на 4 % больше наружного диаметра трубок — позиция 2. Теперь концы трубок мы можем ввести внутрь втулки, которая, отогреваясь до комнатной температуры, сжимается и сжимает концы трубок, обеспечивая прочное, герметичное соединение — позиция 3. Здесь используется та самая совершенно необычная с инженерной точки зрения особенность проявления памяти металла, когда мы заставляем его сжиматься при нагреве. Конечно, вдоль оси трубок втулка растягивается, но в данном случае это не мешает реше-



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

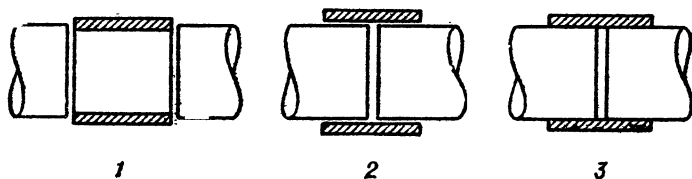


Рис. 67.

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 труд-

недоступных 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 и испол-

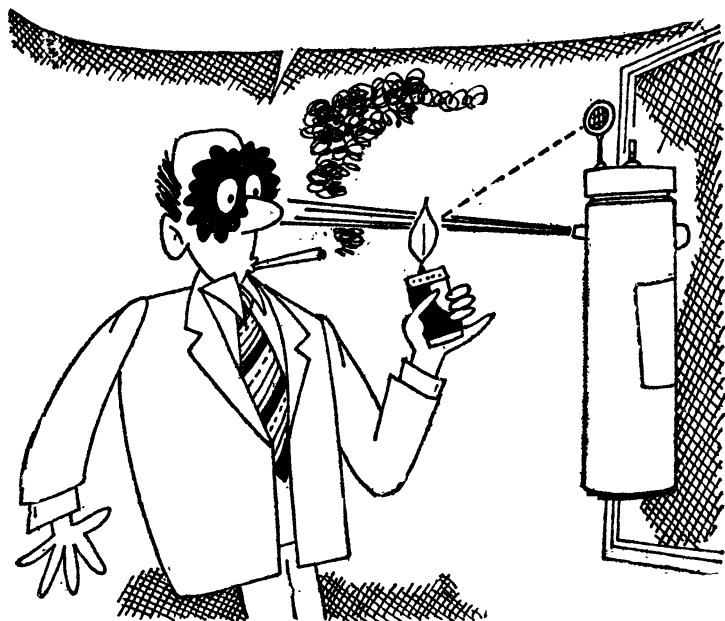
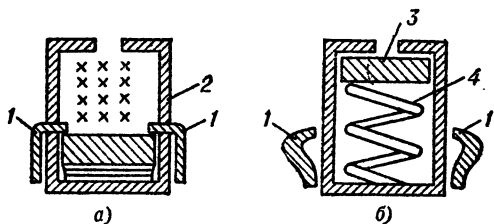


Рис. 68.

нительных механизмов, срабатывающих при небольшом повышении заранее заданного значения температуры. На рис. 68 показана схема автоматического устройства, которое можно использовать для пожаротушения. Элементы из запоминающего сплава 1 входят в отверстия кон-

тейнера 2, заполненного соответствующей смесью, и удерживают поршень 3 в нижнем положении. При повышении температуры они вспоминают заданную им ранее форму и освобождают поршень, который под действием пружины 4 движется вверх, прокалывает пробойником диафрагму в крышке контейнера и выбрасывает его содержимое наружу.

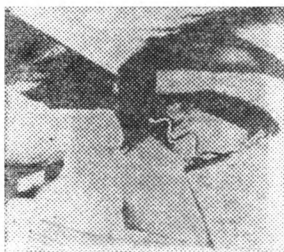


Рис. 69.

Интересны возможности использования этих сплавов в медицине. Их применяют при операциях, связанных со сращиванием костных переломов (рис. 69). Мы уже упоминали об этом (с. 57) и обещали вернуться к этому примеру, поскольку здесь используется чрезвычайно интересное сочетание двух эффектов — запоминания формы и сверхупругости. Скобку-пружинку заданной формы и размеров растягивают при пониженной

температуре и вставляют её концы в отверстия, просверленные по обе стороны перелома. Состав сплава подобран так, что при температуре тела скобка вспоминает прежнюю форму и одновременно переходит в сверх-

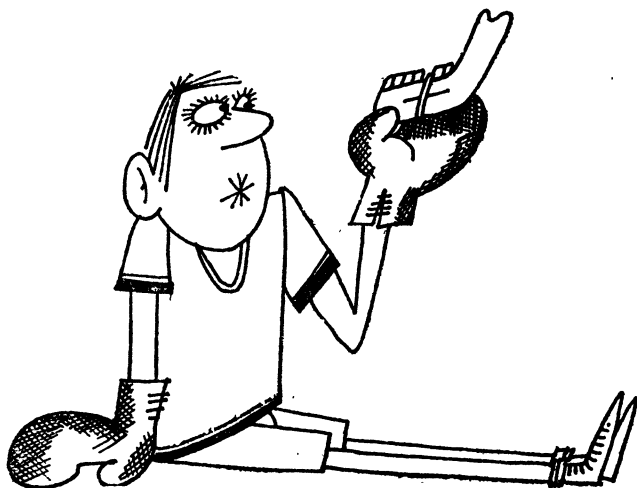


Рис. 70.

упругое состояние. Следовательно, она начинает сжиматься и приводит обломки кости в плотное соприкосновение, на что затрачивается, скажем, половина из отпущенных нам 10% деформации. После этого кость начинает сопротивляться дальнейшему сжатию, что, как мы уже знаем, приводит к росту напряжения в ней. Скобка как бы начинает нагружать сама себя, одновременно прижимая друг к другу и обломки кости. Но при нагружении сверхупругого материала диаграмма деформации имеет своеобразный вид (рис. 30); скобка запасает остальные 5% деформации и будет «выдавать» их постепенно по мере срастания обломков, поддерживая постоянное усилие прижатия.

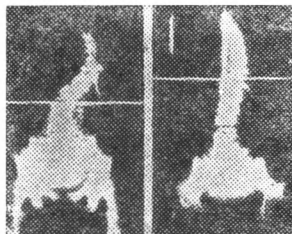


Рис. 71.

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 (рис. 71): Стержень помнит заранее заданную ему форму правильного позвоночника и начинает вспоминать ее при небольшом (не опасном и безболезненном для человека) превышении температуры над температурой тела. Врач может легко регулировать ход лечения.

Другой пример — фильтры для улавливания тромбов (сгустков крови) в сосудах. Слегка охлажденная прямая тонкая проволочка вводится в нужное место кровеносного сосуда, там, отогреваясь до температуры тела, принимает ранее заданную ей причудливо запутанную форму. Фильтр пропускает кровь, но задерживает тромб, который, добравшись до сердца или мозга, мог бы привести к смертельному исходу (рис. 73).

Еще одно очень интересное направление внутрисосудистой хирургии развивается во Всесоюзном научном центре хирургии под руководством профессора И. Х. Рабкина. Сотрудники этого центра и Московского института стали и сплавов уже провели успешные эксперименты на животных по вживлению в кровеносные сосуды нити-ноловых пружинок; укрепляющих изнутри стенки сосуда. Проволока вводится в сосуд через узкую трубочку

(катетор) и в нужном месте «вспоминает» форму пружины и как бы армирует ослабленный участок сосуда:

Начаты работы по созданию искусственного сердца с использованием тонких проволок из запоминающих



Рис. 72.

сплавов. В медицине, кроме памяти, используется еще и то обстоятельство, что нитинол имеет очень высокую коррозионную стойкость и показал отличную совместимость с тканями живых организмов.

Если вернуться к технике, то можно найти еще много ярких примеров эффективного решения сложнейших конструкторских задач с помощью нитинола или других запоминающих сплавов. Представим себе, что нам нужно выполнить сборку деталей в таком узле, доступ к кото-

рому возможен только с одной стороны. Все, вероятно, видели вблизи современный пассажирский самолет. Обшивка его корпуса и крыльев прикрепляется к несущим



Рис. 73.



Рис. 74.

конструкциям с помощью огромного количества заклепок. Этот способ соединения деталей вообще еще достаточно широко распространен, хотя его и «теснят» более производительные методы, такие, как сварка и пайка.

Так вот, бывают случаи, когда место будущего соединения, скажем, двух металлических листов открыто для сборщика только спереди, а с тыльной стороны к нему подобраться невозможно. Вставить заклепку в отверстие, заранее проделанное в обоих листах, нетрудно. Но ведь дальше надо ударить молотком по заклепке с противоположной стороны (придерживая ее спереди), чтобы образовать вторую «шляпку» и плотно соединить листы.

Привыкший к «нитиновым чудесам» читатель уже догадывается, как можно решить эту техническую задачу. Заклепка из запоминающего сплава будет иметь шляпку только с одной стороны, а ее стержень с другого конца нужно будет пропиливать вдоль оси на определенную длину и развести концы в стороны. В таком виде заклепку нужно «заневолить» и нагреть, т. е. вынудить ее принять и «запомнить» эту новую форму (с. 110). После этой операции мы уже при комнатной температуре снова сводим вместе концы заклепки так, что исходная форма ее стержня восстанавливается (если не считать узкого «пропила», который не мешает сборке). Но заклепка уже «заряжена». Остается вставить ее в отверстие и нагреть, например, горелкой ее шляпку. Постепенно нагреется весь стержень заклепки, и когда на его противоположной стороне будет достигнута нужная температура, сработает память металла, и концы разойдутся в стороны, плотно прижимая задний лист к переднему.

Нитинол не ржавеет, он легок 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 порадуют геологи и металлурги!

## § 7. Как закаливается сталь?

Казалось бы, что общего между закалкой стали и явлением запоминания формы? Однако, как это ни странно на первый взгляд, такая связь существует. Чтобы разобраться в причинах удивительной способности

сплавов запоминать форму, надо по крайней мере схематично представить себе, что происходит при закалке стали. Это будет соответствовать и исторической последовательности событий, которые привели к открытию памяти металлов. Таким образом, в течение нескольких минут читатель проделает путь, на который человечеству потребовалось много веков.

Еще в «Одиссее» Гомера мы находим упоминание о закалке стали: «Так расторопный ковач, изготовив топор или секиру, в воду металл (на огне раскаливши его, чтоб двойную крепость имел) погружает, и звонко шипит он в холодной влаге». Эта ассоциация возникла у Одиссея в момент, когда он вместе с двенадцатью надежными и отважными спутниками вонзил раскаленный кол в единственный глаз циклопа — людоеда Полифема. Поскольку в «Одиссее» описываются события времен Троянской войны (XII век до н. э.), ясно, что люди умеют закаливать сталь уже более трех тысяч лет. Приведем еще менее приятную цитату из летописи храма Балгала (Малая Азия, IX век до н. э.), в которой описан метод закалки булатного клинка: «Нагревать, пока он не засветится,

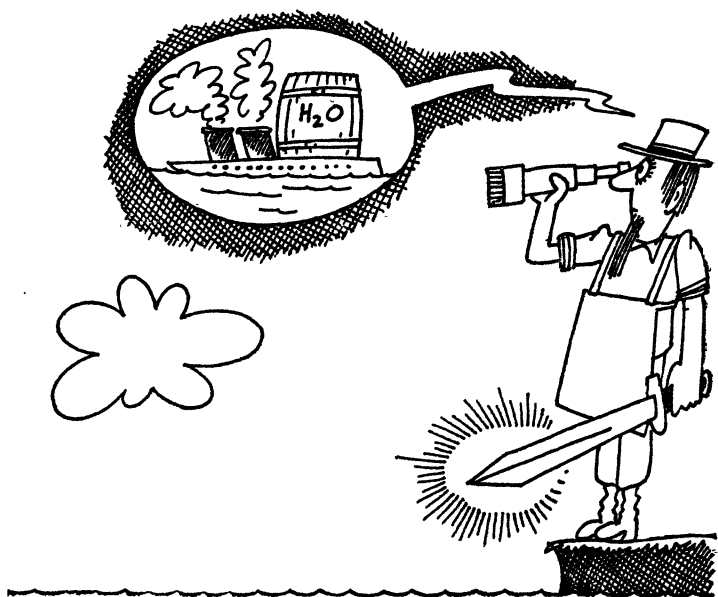


Рис. 75.



как восходящее в пустыне солнце, затем охладить его до цвета царского пурпура, погружая в тело мускулистого раба... Сила раба, переходя в кинжал, и придает металлу твердость».

В средние века считалось, что охлаждать раскаленную сталь необходимо в моче рыжего мальчика, а когда отказались и от этого рецепта, то появились новые, тоже довольно странные. Например, американцы в течение долгого времени танкерами возили воду для закалки стали из Англии, так как по их мнению хорошую закалку можно было сделать только в английской воде.

Очевидно, что эти нелепые, подчас дикие методы закалки стали и прочие рецепты и секреты — все это плоды незнания. Лишь в 20—30-х годах нашего столетия была выяснена природа процессов, протекающих при закалке стали и ответственных за резкое изменение ее свойств — повышение твердости, прочности и др. Оказалось, что возможность закаливать сталь базируется на полиморфизме железа.

Явление полиморфизма, которое свойственно некоторым металлам и сплавам, — это способность существовать в разных кристаллических модификациях (фазах).

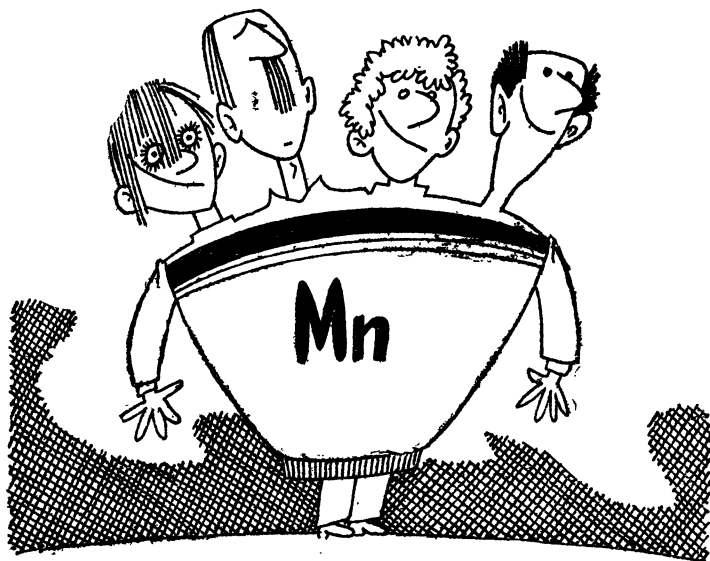


Рис. 76.

Сейчас особенности полиморфных превращений хорошо изучены. В ходе охлаждения при постоянном давлении, уже после затвердевания, при какой-то температуре происходит переупаковка атомов в решетку другого типа. При дальнейшем охлаждении может происходить новая перестройка атомов в решетку третьего типа или (в железе) снова в решетку первого типа. Например, марганец существует в четырех (!) кристаллических модификациях. При нагреве все перестройки решетки обычно идут в обратном порядке. Изменение решетки металлов и сплавов при охлаждении или нагреве — это пример фазового превращения.

Многие фазовые превращения нам знакомы с детства. Например, при таянии льда получается вода (жидкая фаза). При дальнейшем нагревании вода превращается в пар (газообразная фаза). Но при таких превращениях фазы резко различаются по величине межатомных расстояний и характеру теплового движения атомов, а в твердом состоянии фазы различаются лишь способом упаковки атомов, расстояния между которыми меняются незначительно. Механические свойства разных кристаллических модификаций одного и того же металла, конечно, не различаются столь сильно, как, скажем, свойства воды и льда. Однако различия физических (например, магнитных) свойств могут быть очень резкими.

В остальном имеется определенное сходство превращений жидкость  $\rightarrow$  кристалл и кристалл  $\rightarrow$  кристалл (с другой решеткой). В чистом металле полиморфное превращение идет при строго определенной температуре, зависящей от внешнего давления (как и плавление или кристаллизация). Только при этой температуре возможно мирное сосуществование двух фаз. Если превращение при нагреве требует затраты определенного количества тепловой энергии, то превращение, идущее при охлаждении, как и при кристаллизации, сопровождается выделением тепла.

Есть два основных механизма фазовых превращений в твердом теле. Если температура еще достаточно высока (скажем,  $0,5 T_{пл}$ ) и атомы сравнительно подвижны, они способны обмениваться местами с соседями и перемещаться на расстояния, превышающие межатомное. В этом случае атомы как бы покидают свои позиции в старой решетке и поодиночке или небольшими группами пристраиваются к новой.

Если же эта перестройка одной кристаллической решетки в другую идет при низких температурах, то характер атомных смещений изменяется. Здесь уже подвижность атомов низка, и 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 аналогична изображенной на рис. 32 и 33: 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 же самого участка с прежним порядком упаковки атомов, в котором она сама образовалась. 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.

Дело в том, что высокотемпературная модификация железа — аустенит — имеет гранецентрированную кубическую решетку с плотной упаковкой (с. 46), но сравнительно большим размером пор, в которых могут размещаться атомы углерода. Вследствие этого в аустените его может раствориться до 2 % (по массе). Таким образом, весь углерод, имеющийся в составе стали (а его обычно значительно меньше 2 %), при температурах 800—1000 °C находится в решетке аустенита, образует твердый раствор внедрения. Низкотемпературная  $\alpha$ -модификация железа — феррит — имеет объемноцентрированную кубическую решетку (см. с. 60) со значительно меньшим объемом пор и практически не растворяет углерод.

Если охлаждать аустенит медленно, то в ходе образования  $\alpha$ -фазы железа углерод будет выделяться из твер-

дого раствора, вступая в химическое соединение с железом. Тогда при низких температурах структура стали будет представлять собой смесь феррита, в котором почти нет углерода, и карбида железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , в котором углерода около 7 %.

Процесс образования карбида требует перемещения атомов углерода на значительные расстояния: они должны скапливаться в тех участках аустенита, где возникнет карбидная частица, и наоборот, освобождать от своего присутствия те объемы, в которых образуется феррит, не желающий растворять углерод. Но диффузионная подвижность атомов углерода, как мы помним, сильно зависит от температуры, и ниже 200—300 °C описанный процесс становится невозможным. Быстрое охлаждение при закалке как раз и нужно для того, чтобы привести аустенит в этот интервал температур, не допустив его распада на смесь феррита и карбида. Тогда и реализуется мартенситное превращение, в результате которого атомы углерода принудительно «загоняются» в решетку феррита, вопреки его нежеланию. Весь углерод, растворенный при нагреве в аустените, автоматически переходит в феррит, вызывая в его решетке сильнеешие искажения. Если в стали, скажем, 0,6 % углерода, то после закалки мы получаем 100-кратное пересыщение феррита, так как при комнатной температуре он растворяет добровольно лишь 0,006 % углерода. Как установил Г. В. Курдюмов, бездиффузионное превращение аустенита в сильно пересыщенный феррит (мартенсит) и вызывает резкое упрочнение стали. Теперь ее трудно пластически деформировать, поскольку дислокации в мартенсите двигаются с большим трудом. Движению дислокаций препятствуют те искаженные области решетки, в которых располагаются атомы углерода, а эти области отстоят друг от друга уже не на тысячи (как в феррите с 0,006 % углерода), а лишь на десятки межатомных расстояний.

### § 8. Оловянная чума и открытие Г. В. Курдюмова и Л. Г. Хандроса

Хотя мартенситное превращение связано со значительными сдвиговыми смещениями атомов, форма тела при закалке в целом не изменяется. Дело в том, что аустенит сопротивляется росту в его среде новой фазы,

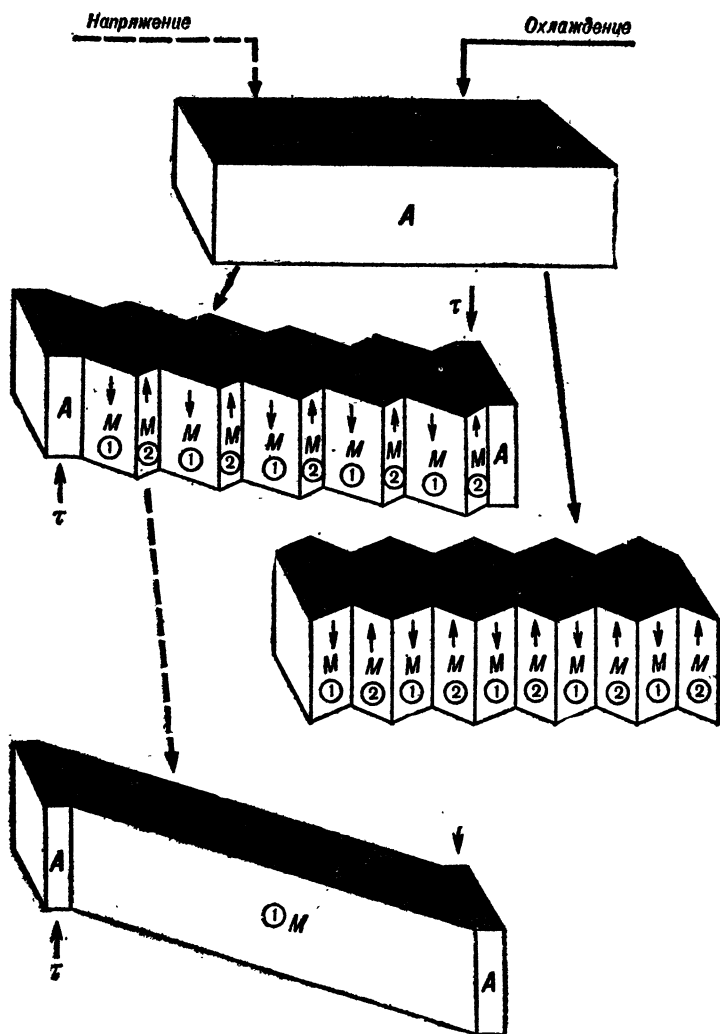


Рис. 77.

заставляя мартенситную фазу разбиваться на отдельные кристаллы, так чтобы направления сдвиговых смещений в соседних кристаллах были противоположны. Это снижает общий уровень напряжений, возникающих в ходе мартенситного превращения из-за сильных деформаций решетки и различия в удельных объемах двух участвующих в нем фаз. Упрощенно эта картина изображена на рис. 77. Форма тела в целом не изменилась, но первоначально плоские поверхности стали ребристыми. Появился рельеф — неперенный спутник мартенситного превращения.

В некоторых случаях превращение сопровождается огромным объемным эффектом, и это приводит подчас к трагическим последствиям. Яркий пример этого — превращение в олове, высокотемпературная модификация которого (белое олово) имеет удельный объем на 25 % меньший, чем низкотемпературная (серое олово). Переход белого олова в серое обычно происходит при низких температурах и тогда мягкий, пластичный металл внезапно превращается в серый порошок. Серое олово очень хрупко и не может выдержать напряжений, возникающих в ходе превращения.

Именно это превращение послужило одной из причин гибели антарктической экспедиции Р. Скотта, покорившей 18 января 1912 г. Южный полюс. Путешественники погибли на обратном пути из-за отсутствия топлива. Сосуды с горючим прохудились, так как белое олово, которым они были пропаяны, «не выдержало мороза» и рассыпалось.

В сущности это было непростительной небрежностью, поскольку о такой опасности в Европе знали уже двести лет назад. То, что происходило с оловом при сильных морозах, называли «оловянной чумой», которая в свое время оставила «трактиры без ложек и мисок, а солдат без пуговиц». Но превращение в олове — это одна крайность, а нас сейчас больше интересует другая.

Г. В. Курдюмов и Л. Г. Хандрос первыми экспериментально обнаружили новый тип мартенситного превращения в алюминиевой бронзе. Как и предсказывал Г. В. Курдюмов, при благоприятном сочетании определенных условий превращение аустенита (А) в мартенсит (М) приобретает особые черты. Оно становится, как выразился Г. В. Курдюмов, «термоупругим». Этот термин отражает необычные особенности такого мартенситного

превращения. Если прекратить охлаждение, то и превращение сразу прекращается на той стадии, на которой его застигла температурная остановка, а если начать нагревать образец, то оно вскоре начинает идти в обратную сторону. Это значит, что мартенсит снова превращается



Рис. 78.

в аустенит, все сдвиговые смещения атомов идут в обратном направлении, а сами атомы возвращаются точно в свои исходные позиции, соответствующие решетке аустенита.

В сплавах, испытывающих термоупругое превращение, приложением внешнего напряжения можно вызвать повышение температурного интервала мартенситного превращения, но главное в этих сплавах — наличие внешней нагрузки особенно резко меняет геометрическую картину превращения.

Если напряжение приложено так, как показано на рис. 77, 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 (рис. 32, 33), и мы получаем значительную общую деформацию образца, которая соответствует относительному удлинению 10 % и более.

Как мы уже знаем, по своей величине эта деформация намного превышает предельную упругую деформацию обычных металлов, но она накапливается не за счет необратимых сдвигов в аустените или мартенсите, а за счет направленного превращения  $A \rightarrow M$ . Внешнее напряжение упорядочивает смещения атомов при этом превращении. Если теперь вызвать обратное превращение  $M \rightarrow A$ , то вся эта огромная деформация исчезнет, так как атомы обязаны вернуться в исходные положения, которые они занимали в решетке аустенита.

В термоупругих сплавах обратное превращение  $M \rightarrow A$  можно вызвать двумя способами. В первом случае оно разбивается при уменьшении внешнего напряжения, которое стимулировало  $A \rightarrow M$ -переход и привело к изменению формы тела. Значит, первый способ — это просто разгрузить образец. Вся накопленная деформация при этом исчезает, т. е. мы имеем дело со сверхупругостью.

Во втором крайнем случае после разгрузки структура сплава остается мартенситной, следовательно, сохраняется и вся накопленная в ходе нагружения деформация. Обратное превращение  $M \rightarrow A$  протекает при нагреве в определенном интервале температур, и деформация исчезает — образец «вспоминает» исходную форму.

Можно получить, разумеется, и любое сочетание этих двух основных вариантов, любую комбинацию сверхупругости и запоминания формы. Сумма соответствующих деформаций при этом, конечно, не может превышать той предельной величины, которая соответствует каждому из двух эффектов в отдельности. Эта предельная величина целиком определяется соотношением параметров решеток аустенита и мартенсита и геометрией перестройки одной решетки в другую при  $A \rightarrow M \rightarrow A$ -превращении.

В настоящее время известны сотни сплавов, проявляющих эффект Курдюмова. Регулируя их состав или режим обработки, мы можем смещать интервал  $A \rightarrow M \rightarrow A$ -превращений по температурной шкале. Например,



сделаем так, чтобы точка  $M_n$  — температура начала  $A \rightarrow M$ -превращения при охлаждении 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 изменение формы тела, а при нагреве до температуры 50—100 °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. Варьируя интервал превращений, мы можем также при нужной температуре привести сплав в сверхупругое состояние или получить необходимое сочетание эффектов сверхупругости и запоминания формы.

### § 9. Двойная память и «вечный» двигатель

В заключение этой главы вернемся к вопросу о том, почему запоминающие сплавы при охлаждении легко «уходят» от заданной им формы, но, «вспоминая» ее при нагреве, проявляют удивительную настойчивость (вплоть до готовности к самоубийству). Теперь мы можем выразить это другими словами: почему образование мартенсита, ориентированного определенным образом, можно вызвать малыми напряжениями, а при образовании аустенита в ходе нагрева возникают напряжения, гораздо большие? Зная в общих чертах механизм термоупругого мартенситного превращения (§ 8), мы легко найдем ответ на этот вопрос.

Как уже было сказано, в термоупругих сплавах, прикладывая внешнее напряжение, можно повысить температурный интервал мартенситного превращения и получить нужную ориентировку мартенситных кристаллов. Ранее мы обсуждали в основном последний (геометрический) аспект этих явлений. Теперь обратимся к первому.

По мере охлаждения аустенита в его решетке развиваются процессы, подготавливающие ее перестройку в решетку мартенсита. Эти процессы, анализ которых представляет собой довольно сложную задачу, выражаются в снижении модуля упругости. Решетка аустенита как бы

теряет устойчивость по отношению к смещениям атомов в определенных направлениях. Это, понятно, и есть те направления, сдвиги вдоль которых переводят решетку аустенита в решетку мартенсита.

Чем ближе мы подходим к температуре начала мартенситного превращения  $M_n$ , тем больше «ослабляется» решетка, и, наконец, при температуре  $M_n$  начинается мартенситное превращение. Теперь рассмотрим положение, которое складывается вблизи температуры  $M_n$ , но несколько выше ее. Подготовительные процессы зашли достаточно далеко, у решетки аустенита уже «чемоданное настроение»: если еще немного охладить сплав, началась бы ее перестройка в решетку мартенсита. Достаточно легкого толчка, чтобы эта перестройка произошла, и этот толчок дает внешнее напряжение, которое как раз и стремится вызвать сдвиг атомов в ослабленных направлениях. Из этих рассуждений ясно, что чем ближе мы подходим к точке  $M_n$ , тем меньшее напряжение нужно, чтобы вызвать мартенситное превращение.

Можно несколько «переиначить» ситуацию. Когда сплав находится в аустенитном состоянии, при достаточно высокой температуре (вдали от  $M_n$ ), подвешиваем малый груз и начинаем охлаждение. Вначале небольшое напряжение (скажем, 100 МПа) от действия груза вызывает лишь соответствующую ему (по закону Гука) небольшую упругую деформацию решетки аустенита. При дальнейшем охлаждении (где-то недалеко от  $M_n$ ) наступит момент, когда этого же напряжения будет достаточно, чтобы вызвать мартенситное превращение.

Поскольку напряжение одновременно «сортирует» ориентировки мартенситных кристаллов, сплав будет деформирован, «заряжен на воспоминание» исходной формы при последующем нагреве. Этот нагрев вызовет обратное превращение, образование аустенита, решетка которого вначале будет ослаблена; по мере повышения температуры и удаления от  $M_n$  решетка аустенита «мужает и крепнет», так что сплав может поднимать большие грузы. Предел упругости высокотемпературной фазы нитинола приближается к 1000 МПа, поэтому и напряжение, которое развивается в сплаве, если мы мешаем ему «вспоминать» форму, имеет такую же величину. Если мы подвесим еще больший груз, то начнется уже пластическая деформация аустенита, и что будет дальше — уже известно (с. 109—110).

Как видно, здесь нет никакой мистики, все объясняется самым естественным образом. Нет, конечно, и никаких шансов построить вечный двигатель, так как надо расходовать тепло, чтобы обеспечить подъем тяжелого груза. Это тепло расходуется на нагрев сплава до температуры обратного превращения и на само это превращение, которое, как мы знаем, развивается с поглощением тепла. Чем тяжелее груз, который мы стремимся таким способом поднять, тем выше будет температура обратного превращения и тем больше надо будет израсходовать тепловой энергии. Если взять отношение произведенной при подъеме груза работы к поглощенной при нагреве тепловой энергии, то эта величина (к. п. д.) окажется в пределах от 5 до 20 %.

И все же способность запоминающих сплавов «заряжаться» под действием небольших напряжений дает еще один очень интересный эффект — так называемый обратимый ЭЗФ. Иначе это явление называют «двойной памятью». Суть его в следующем.

Если несколько раз нагреть и охладить нитиноловый стержень с подвешенным на конце небольшим грузом (например, по схеме рис. 63), то в нем будут повторяться уже знакомые нам процессы. При охлаждении стержень будет изгибаться, «заряжаясь» за счет мартенситного превращения, а при нагреве — выпрямляться, вспоминая прежнюю форму и легко поднимая подвешенный груз (легко — потому что он мог бы поднять и в 10 раз больший). Каждый раз при охлаждении образуются одни и те же кристаллы мартенсита, «избранные» внешним напряжением, и каждый кристалл всякий раз вырастает на одном и том же, «своем законном» месте. Дело в том, что в структуре аустенита всегда есть определенные неоднородности — границы зерен, дислокации, мелкие частички других фаз, создающие поля внутренних напряжений. Эти небольшие напряжения, вместе с напряжением, создаваемым внешней силой, способствуют росту таких кристаллов мартенсита, ориентировка которых лучше всего соответствует направлению равнодействующей всех сил, возникающих в данном участке образца. Конечно, главную роль играет внешнее напряжение, но мелкие геометрические детали перестройки решетки в каждом участке структуры — свои. При нагреве мартенситные кристаллы исчезнут, но при втором охлаждении под нагрузкой они вновь образуются в тех же ме-

стах, так как сработают те же тонкие особенности структуры.

Циклические переходы аустенита в мартенсит и обратно не проходят бесследно для структуры образца, хотя накопленная при охлаждении деформация практически полностью исчезает при нагреве. Сами эти циклы приводят к слабым изменениям в структуре аустенита, которая постепенно приспосабливается к тому, что мартенситные кристаллы появляются всегда в одних и тех же местах. Получается, что внешнее напряжение как бы «прорубает дорогу» мартенситным кристаллам нужной ориентировки. Когда оно сделает это несколько раз, собственное состояние структуры аустенита становится таким, что она уже «привыкает» к появлению именно этих кристаллов при охлаждении. Вырабатывается «вторая память» сплава — «память холодной формы». Теперь уже и без внешней нагрузки сплав деформируется при охлаждении в том же направлении, а при нагреве, как и прежде, восстанавливает исходную форму.

Конечно, ориентирующее действие внутренних полей напряжений, сформировавшихся в результате такого «приучения», не может быть таким мощным, как действие внешнего груза. Если охлаждением под нагрузкой можно получить, как мы уже знаем, приблизительно 10%-ную относительную деформацию, то «дрессированный» сплав дает деформацию всего 1—3 %. Значит, благоприятные варианты ориентировки мартенсита реализуются в этом случае лишь частично (схематично это соответствует, например, второй позиции на рис. 77).

Таким образом, мы получаем материал, который уже без всякого участия внешних сил самопроизвольно деформируется при охлаждении в одном направлении, а при нагреве — в противоположном, т. е. сплав «помнит» две формы — «холодную» и «теплую». В этом состоянии сплав можно использовать, например, для автоматических терморегуляторов, реагирующих на небольшие колебания температуры, скажем, в помещении. Такие терморегуляторы можно сделать и с использованием обычного однократного ЭЗФ, но тогда требуются «встречные» пружины для «зарядки» устройства при охлаждении. Здесь же потребность в этом отпадает, и конструкции существенно упрощаются. Интересно, что при нагреве развиваются примерно такие же напряжения, как и при внешней «зарядке» на полную величину деформации.

И наконец, мы расскажем о том, как обратимый ЭЗФ проявил себя при разработке моделей нитинолового двигателя. Одна из таких моделей построена 10 лет назад под руководством американского инженера Р. Бэнкса. Она представляет собой устройство, основным элементом которого является колесо диаметром 35 см со спицами. На спицах укреплены петли длиной 15 см из нитиноловой проволоки диаметром 1,2 мм. Колесо вращается в горизонтальной плоскости так, что петли, свисающие со спиц, попадают в ванну с холодной водой (24 °C), а на противоположной стороне круга — в ванну с подогретой водой (48 °C) и т. д.

Не будем подробно описывать конструкцию этого двигателя. Скажем лишь, что центры вращения спиц и колеса слегка смещены друг относительно друга, поэтому сила, возникающая при распрямлении петли и направленная вдоль спицы, имеет составляющую, которая вызывает вращение (по принципу коленчатого вала). Механизм отрегулирован так, что в «холодном» полуцикле концы петель принудительно сближаются и происходит их «зарядка», а в «теплом» полуцикле петли с силой распрямляются, заставляя колесо вращаться. Мы уже знаем, что для «зарядки» требуется меньшее напряжение, чем то, которое возникает в «теплом» полуцикле в процессе вспоминания формы. Эта разница напряжений и обеспечивает вращение колеса.

Двигатель Р. Бэнкса совершил десятки миллионов оборотов, и возможно, что он работает и сейчас. Для нагрева воды в «теплой» ванне используется солнечное тепло, а выходная мощность машины составляет ~0,2 Вт, т. е. он может обеспечить электроэнергией лишь маленькую лампочку. Но надо учесть, что это — всего-навсего модель, с помощью которой проверялась длительная работоспособность нитиноловых проволок и исследовались другие технические вопросы. В частности, уже после нескольких часов работы выяснилось, что в холодной воде петли самопроизвольно закрываются, т. е. вырабатывается «память холодной формы». Теперь уже не нужно затрачивать энергию на «зарядку» петель в «холодном» полуцикле, что приводит к росту выходной мощности двигателя.

Двигатель, о котором мы рассказали, конечно, никакого прямого практического применения не имеет. На нитиноловом принципе будут построены и более мощные,

и более компактные, и более экономичные машины. Но свою главную роль эта модель сыграла — она стала демонстрацией возможностей использования низкотемпературных источников тепла. Так что, хотя это и не вечный двигатель в физическом смысле, он вечный в такой же мере, в какой вечно Солнце. Пусть в этой фразе есть некоторое преувеличение, но если читатель полюбил нитинол и ему подобные сплавы, он поймет, что мы имеем в виду.

### РАЗРУШЕНИЕ, ПРОЧНОСТЬ И СВЕРХПРОЧНОСТЬ

В очередной раз мы просим читателя вернуться к диаграмме деформации, изображенной на рис. 13. Теперь речь пойдет о ее последнем участке, описывающем заключительную стадию взаимодействия материала с внешней силой, которая завершается его разрушением, разделением на части.

Во многих случаях мы стремимся вызвать разрушение, когда нам нужно просверлить отверстие, разрубить полено и т. д. Но часто разрушение — это беда, а иногда и трагедия; поэтому огромную роль в технике играет прочность — мера сопротивления материалов разрушению.

Есть два основных типа разрушения материалов — вязкое и хрупкое. Когда разрушение наступает после значительной пластической деформации, как на рис. 13, оно считается вязким. Вязкое разрушение наименее опасно, так как оно развивается сравнительно медленно, а главное — его приближение легко заметить по остаточным изменениям размеров изделия. Чаще всего уже сами эти изменения размеров делают деталь неработоспособной. В связи с этим в технике редко приходится сталкиваться с вязким разрушением, хотя в механизме этого процесса много интересного.

Мы уже говорили, что максимальное напряжение, которое может выдержать материал, соответствует верхней точке *В* диаграммы деформации и называется пределом прочности. Вплоть до этой точки процесс пластической деформации идет равномерно по всей длине стержня. Затем в каком-то месте возникает шейка. Диаметр стержня в шейке все более уменьшается, но процесс разрушения еще можно остановить. Для этого надо быстро разгрузить образец.

Если срезать лишний материал по плоскостям, параллельным оси стержня, то обнажится сквозная полость, в которую можно даже просунуть тонкую бумажку (рис. 79). Если бы мы не остановили испытание, то рост этой полости в направлении поверхности стержня привел бы к его разрушению. Таким образом, вязкое разрушение при растяжении — это тот редкий случай, когда рост трещины начинается из глубины металла и заканчивается на его поверхности. Гораздо чаще все происходит наоборот, но главное — «вязкая» трещина растет медленно и ее можно остановить.

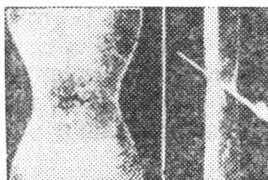


Рис. 79.



Рис. 80.

Совсем по-другому происходит хрупкое разрушение, с которым до сих пор, к сожалению, приходится сталкиваться чаще.

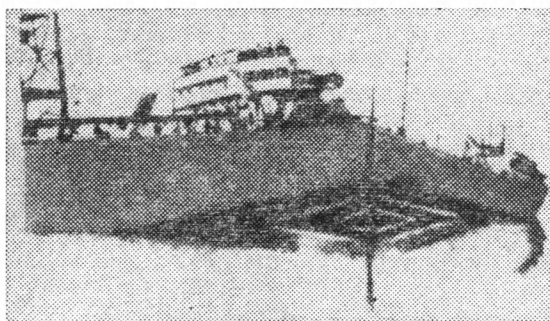


## § 1. Трещина — жилище змея

И над вершинами Кавказа  
Изгнаник рая пролетал:  
Под ним Казбек, как грань алмаза,  
Снегами вечными сиял,  
И, глубоко вкису чернея,  
Как трещина, жилище змея...

*М. Ю. Лермонтов. «Демон»*

В этой строфе великий русский поэт затро-  
нул два вопроса, которые нам предстоит выяснить, а  
именно: почему сияет грань алмаза и что за «змей» живет  
в трещине. Для характеристики этого «змея» приведем  
лишь несколько примеров.



Далее 21



Рис. 82.

Во время второй мировой войны в США была построена серия судов «Либерти», и с конца 1942 г. одно за другим начали поступать сообщения о внезапных разрушениях их корпусов. Всего было зарегистрировано более

1000 связанных с этим аварий, часть которых имела катастрофические последствия. На рис. 81 показана фотография танкера, который разломился пополам в порту в безветренную погоду. Трещина моментально проскочила через палубу и по обоим бортам до самого киля. Хрупкие разрушения судов случались и в других странах. Кроме того, нередко случаи неожиданных разрушений сварных мостов, турбогенераторов, резервуаров для хранения жидкостей и газов, самолетов (английские «Кометы»), ракет (американские «Полярисы»). Довольно страшную картину являют случаи хрупкого разрушения магистральных газопроводов (рис. 82). Трещина мчится вдоль трубопровода со скоростью реактивного самолета, пробегая без остановки до десятка километров. Ясно, что все эти проделки «змея» приносят колоссальный ущерб и часто приводят к человеческим жертвам.

## § 2. Теоретическая прочность

Расчет теоретической прочности кристаллических материалов на разрыв в принципе не отличается от того расчета теоретического сопротивления сдвигу, который был впервые выполнен Я. И. Френкелем. Если принять, что разрушение наступает в результате одновременного разрыва всех межатомных связей перпендикулярно какой-либо атомной плоскости кристалла, то для этого потребуется напряжение того же порядка, что модуль Юнга  $E$  (аналогично касательное напряжение, вызывающее сдвиг в модели одновременного смещения атомов, — одного порядка с модулем сдвига  $G$ ). Действительно, различные оценки дают значения теоретической прочности  $E/5 \div E/10$ . Напомним, что железо — «фундамент цивилизации» — и сталь имеют модуль Юнга  $\sim 2 \cdot 10^5$  МПа, а значит их прочность должна была бы достигать нескольких десятков тысяч мегапаскалей. Увы, реальная прочность оказывается на 2—3 порядка меньше этой величины.

Как и при анализе причин низкого сопротивления металлов пластической деформации, мы вынуждены признать несостоятельность модели одновременного разрыва межатомных связей и искать механизм последовательного развития разрушения вдоль будущей поверхности излома. Тут и приходит «на помощь» трещина, точнее — ее способность концентрировать напряжение у своей вершины.

### § 3. Концентрация напряжений

Пусть пластину из какого-либо материала растягивает сила, вызывающая равномерно распределенные напряжения  $\sigma$  (рис. 83).

Если просверлить в пластине отверстие, то вблизи него произойдет перераспределение напряжений. Дейст-

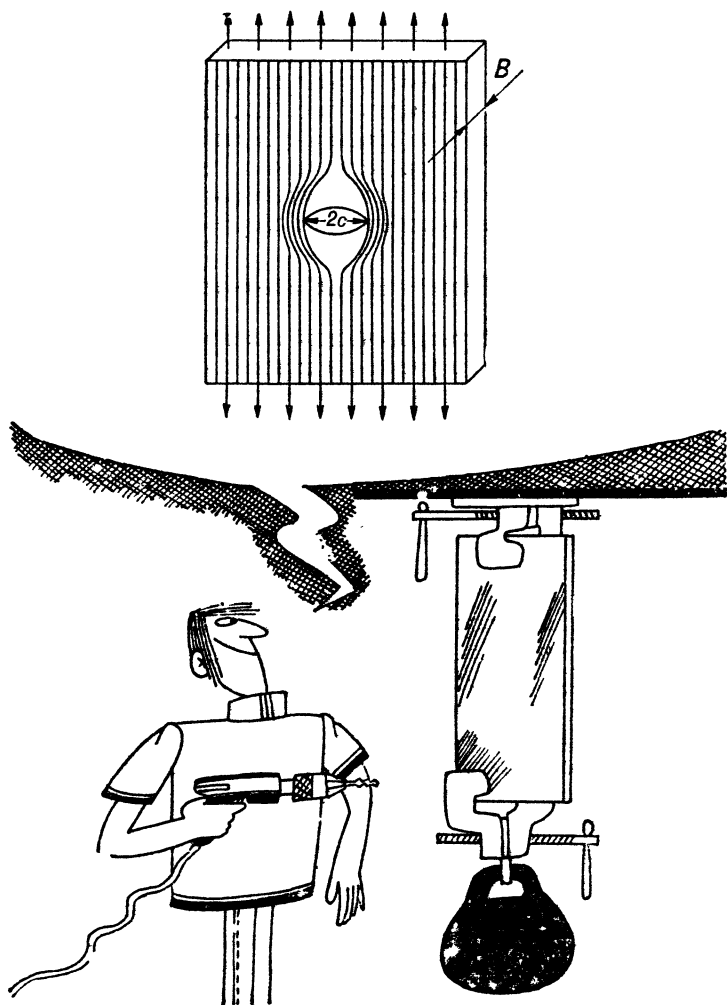


Рис. 83.

вительно, ведь пустота не может нести нагрузку, напряжение внутри отверстия равно нулю. Зато участки материала около краев отверстия будут перегружены, напряжения в них будут больше  $\sigma$  (среднее напряжение в сечении не должно меняться, так как иначе нарушится равновесие). Такие отверстия, пустоты, уменьшающие площадь сечения, называют концентраторами напряжения.

Математический аппарат для расчета концентрации напряжений был разработан еще в начале XX века. Оказалось, что величина «концентрированного» напряжения определяется формой концентратора, а также его размерами и радиусом кривизны его краев. Например, для эллиптического отверстия длиной  $2c$  \*), имеющего радиус кривизны у края  $\rho$ , коэффициент концентрации напряжений составляет

$$\alpha = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}}.$$

Это значит, что у острых краев такого концентратора напряжение возрастает до величины

$$\sigma_{\text{конц}} = \alpha \sigma,$$

где  $\sigma$  — напряжение, создаваемое внешней силой вдали от отверстия. Картину напряженного состояния можно представить наглядно с помощью «силовых» линий, густота которых пропорциональна напряженности материала. Эти линии обходят концентратор и сгущаются у его краев (рис. 83). Видно также, что не только само отверстие не участвует в работе материала, но отлынивает от работы и некоторая область выше и ниже отверстия. Она как бы перекладывает свои обязанности на те участки пластины, которые расположены левее и правее отверстия.

Если роль концентратора напряжения играет трещина, то положение резко обостряется, поскольку радиус кривизны вершины трещины очень мал и может быть в принципе равен межатомному расстоянию, т. е.  $(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$  мкм. Значит, такой трещины длиной всего 1 мкм уже достаточно, чтобы понизить прочность тела во много десятков раз. Другими словами «концентрированное» на-

\*) Коэффициент 2 здесь и в дальнейшем введен просто для удобства вычислений, поскольку в расчетные формулы входит половина длины трещины.

пряжение у вершины трещины может достигать теоретической прочности на разрыв при такой ее длине, когда ее трудно обнаружить даже с помощью самого сильного оптического микроскопа.

Разрыв межатомных связей у вершины трещины вызовет увеличение ее длины, следовательно, в приведенной выше формуле будет возрастать  $c$ , а значит и  $\sigma_{\text{конц}}$  (если величина приложенного напряжения  $\sigma$  не меняется). Это еще более усугубляет ситуацию и т. д.

Таким образом, трещины в теории хрупкого разрушения являются таким же инструментом, как дислокации в теории пластической деформации. Они обеспечивают последовательное нарушение межатомных связей при таких значениях приложенного напряжения, которые в сотни раз меньше «теоретической» прочности. Интересно, что представление о присутствии в твердом теле трещин, сильно снижающих его сопротивление разрыву, было сформулировано английским инженером и ученым А. Гриффитсом еще в 1920 г., т. е. до опубликования расчета Я. И. Френкеля и задолго до зарождения теории дислокаций.

#### § 4. Трещина Гриффитса

В те годы А. Гриффитс (1893—1963) работал инженером в одном из авиационных исследовательских центров и занимался исследованиями прочности стекла. Стекло не использовалось в авиастроении в качестве конструкционного материала и служило Гриффитсу моделью, на которой можно было получить идеально хрупкое разрушение. Руководители центра не одобряли «увлечения» Гриффитса и, когда горелка, на которой он плавил стекло, стала причиной пожара в лаборатории, его опыты были запрещены, а сам он переведен на другую работу. Но все же Гриффитс успел получить результаты, на которых базируется вся современная физическая теория хрупкого разрушения.

Анализ Гриффитса был удивительно простым и ясным. Убедившись в том, что без трещин ему не обойтись, он составил уравнение баланса энергии в нагруженной пластине, в которой возникает и растет трещина. Чтобы повторить его расчет, мы можем воспользоваться рис. 83. Итак, если пластина находится под действием напряжения  $\sigma$ , не превышающего предела упругости, то соответ-

ствующую упругую деформацию мы можем определить из закона Гука:

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

Упругая энергия, которая запасена в единице объема пластины, как мы знаем, равна

$$a = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E}.$$

Когда в пластине возникает трещина длиной  $2c$  (рис. 83), то некоторый объем материала «разгружается» (помните, отлынивает от работы), а другие оказываются перегруженными. Но баланс упругой энергии в целом изменяется в сторону ее уменьшения \*). Таким образом, мы можем считать, что полное изменение упругой энергии пластины вызвано разгрузкой некоторого (эффективного) объема материала, размеры которого сопоставимы с длиной трещины. Гриффитс принял, что этот объем ограничен эллипсом с полуосями  $c$  и  $2c$ . Площадь этого эллипса равна  $2\pi c^2$ , а интересующий нас объем  $2\pi c^2 B$ , где  $B$  — толщина пластины. Значит, образование трещины вызвало выделение упругой энергии

$$\frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \cdot 2\pi c^2 B = \frac{\pi \sigma^2 c^2 B}{E}.$$

Немного фантазии — и мы можем считать, что вся эта энергия «поселилась внутри» трещины. Вот мы и установили, что за «змей» живет в трещине.

Куда расходуется эта энергия? Гриффитс резонно предположил, что она идет на образование двух новых поверхностей — «берегов» трещины. Ведь поверхность всегда обладает повышенной энергией; это знает каждый, кто имел дело с мыльными пузырями. Для того чтобы раздуть пузырь, надо совершить работу против сил поверхностного натяжения. Следовательно, поверхность обладает избыточной энергией, только у металлов поверхностная энергия, которая приходится на единицу площади, в 10—20 раз больше, чем у мыльной пленки. Эту удельную поверхностную энергию обозначим  $\gamma_s$ . Поскольку при возникновении трещины образовались

---

\*) Это легко понять, если мы учтем, что когда трещина разорвет пластину пополам, обе половины вообще будут разгружены, их упругая деформация исчезнет.

две новые поверхности, каждая площадью  $2cB$  (кривизной берегов трещины пренебрегаем), нужно затратить энергию  $4cB\gamma_s$ . В итоге появление трещины изменило энергию пластины на величину

$$A = 4cB\gamma_s - \frac{\pi\sigma^2 c^3 B}{E}.$$

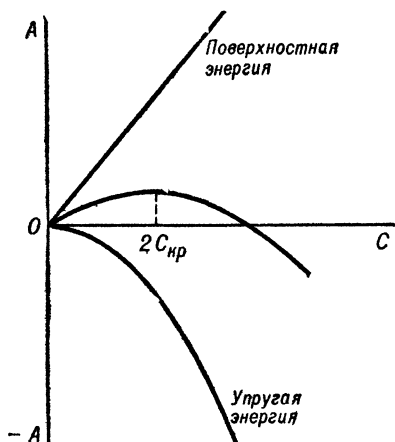


Рис. 84.

Изменение этой величины описывает средняя (результатирующая) кривая на рис. 84. Как видно из графика, образование мелких трещин энергетически не выгодно. Но если в материале уже есть готовые трещины, то их дальнейший рост может стать выгодным.

Критический размер трещины  $2c_{кр}$  определяется из условия обращения в нуль первой производной  $dA/dc$ . В этой точке изменение энергии переваливает через максимум и дальше начинает уменьшаться:

$$\frac{dA}{dc} = 4B\gamma_s - \frac{2\pi\sigma^2 c B}{E} = 0; \quad \sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi c}} \approx \sqrt{\frac{E\gamma_s}{c}}.$$

Полученное Гриффитсом соотношение описывает критическую ситуацию. При заданном внешнем напряжении  $\sigma$  трещины длиной равной или меньше  $2c_{кр} = 2E\gamma_s/\sigma^2$  расти не будут. Трещины большей длины при этом же напряжении будут расти, причем из формулы Гриффитса следует, что при увеличении  $c$  можно уменьшать  $\sigma$ . Это фактически означает, что внешняя нагрузка уже не нужна: для завершения процесса разрушения достаточно той упругой энергии, которая была запасена в пластине к моменту достижения критической длины трещины.

К аналогичным соотношениям между приложенным напряжением и критической длиной трещины приводит анализ перенапряжений у ее вершины. Однако такой подход гораздо более сложен. Гриффитсу же удалось полу-

чить столь фундаментальный результат, вообще не рассматривая напряженного состояния материала у вершины трещины и не привлекая представлений о разрыве межатомных связей.

Теория Гриффитса объяснила катастрофический характер хрупкого разрушения, огромные ускорения при движении трещин, невозможность остановить процесс роста трещины, если он уже прошел критическую точку. Она дала положительный ответ на важнейший вопрос: «может ли работать материал с трещинами?». Она указала те предельные размеры трещин, с которыми еще может работать материал при заданном напряжении  $\sigma$ .

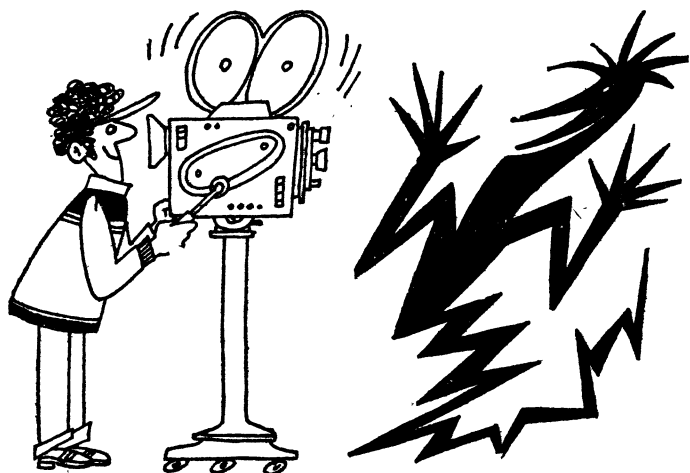


Рис. 85.

Гриффитсовская формула позволяет решить и обратную задачу, которая чаще возникает в инженерной практике. Допустим, что технология получения или обработки какого-либо материала, который будет рекомендован конструктору, не гарантирует отсутствия трещин в изделии. Например, при сборке частей конструкции будет применяться сварка, которая часто вызывает образование трещин из-за резких перепадов температуры и по другим причинам (не случайно большая часть тех аварий, о которых мы рассказали, произошла со сварными конструкциями). В распоряжении технолога есть способы дефектоскопического контроля, которые позволяют отбраковать детали с трещинами, не допустить их



эксплуатацию в изделиях ответственного назначения. Но каждый метод дефектоскопии имеет некоторый порог чувствительности, поэтому можно с уверенностью утверждать лишь то, что в изделии не будет трещин длиннее определенного размера. Тогда это пороговое значение длины трещины и нужно будет подставить в формулу Гриффитса, чтобы найти напряжение  $\sigma_{кр}$ , при котором пропущенные дефектоскопом трещины еще не будут опасными. Конструктор обязан выбрать форму и размеры изделия так, чтобы при известной рабочей нагрузке напряжение в любом сечении было меньше найденного значения  $\sigma_{кр}$ .

Конечно, это лишь принцип расчета допустимого напряжения в конструкции. Здесь опущены многие вычислительные подробности, которые в реальном конструировании очень важны. Но несомненно, что сама возможность такого подхода базируется на теории Гриффитса.

Собственные эксперименты Гриффитса со стеклянными образцами (колбами), на которые он наносил острые надрезы, имитирующие трещины, дали великолепные результаты. Из теории вытекает, что произведение разрушающего напряжения  $\sigma_{кр}$  на  $\sqrt{c_{кр}}$  должно быть постоянным, поскольку  $\gamma_s$  и  $E$  — это константы, характеризующие материал. Кроме того, поверхностное натяжение и модуль Юнга можно легко найти из независимых экспериментов и численно сопоставить величины  $\sigma_{кр}\sqrt{c_{кр}}$  и  $\sqrt{E\gamma_s}$ . Совпадение и здесь оказалось хорошим.

Однако при переходе к металлам формула Гриффитса давала результаты, которые далеко не соответствовали реальности. Возникло сомнение в возможности использования этой теории применительно к металлическим материалам, хотя их поведение при хрупком разрушении качественно не отличалось от поведения стекла. Так же, как и стеклянные, металлические изделия в определенных условиях разрушались без заметной остаточной деформации при напряжении, не превышающем предела упругости. Так же разрушение становилось неуправляемым, «лавинным» процессом после достижения трещиной определенной длины. При понижении температуры многие металлы и сплавы, как и стекло, становились все более хрупкими. Трещины двигались в этих условиях примерно с такими же огромными скоростями и ускорениями.

Конечно, когда мы говорим о скорости и ускорении трещин, не следует забывать об условности этих понятий. Трещина ведь не является материальным телом, а речь идет о движении ее вершины.

Когда появилась возможность измерять очень высокие скорости движения трещин (например, методами скоростной киносъемки), были получены впечатляющие количественные результаты. Известный советский специалист в области разрушения В. М. Финкель приводит такие цифры. В хрупком металле трещина на докритической стадии процесса разрушения движется со скоростью порядка 1 мм/ч. После достижения критического размера за одну тысячную долю секунды скорость распространения трещины увеличивается до значений порядка 10000 км/ч! Следовательно, ускорение на этапе разгона — порядка  $10^8$  м/с<sup>2</sup>. Если бы пилотируемая космическая ракета развивала такое ускорение, космонавт испытывал бы десятимиллионную перегрузку! Даже беспилотным ракетам далеко до таких ускорений, а современным реактивным лайнерам далеко до таких скоростей. Что касается результатов столь оперативной работы трещин, то мы с ними уже знакомы по рис. 81 и 82. Отметим также, что подобные события значительно чаще случаются в холодное время года.

Итак, в чем же дело? Склонные к переходу в хрупкое состояние, как их называют, хладноломкие металлы разламываются как стекло, а классическая формула Гриффитса не работает. Испытания металлических образцов с трещинами показали, что в критический момент разрушения (момент, за которым следует быстрый рост трещины) напряжение в сотни раз больше, чем предсказывает гриффитсовская формула. Или наоборот, при данном разрушающем напряжении трещина должна была бы иметь такую длину, которая намного превышает размеры самого образца. И вместе с тем, сам этот критический момент существует, и все остальные следствия теории качественно выполняются.

Первым нашел причину этого несоответствия венгерский физик Орован, один из основоположников теории дислокаций. Он понял, что упругая энергия, которая высвобождается при росте трещины, расходуется не только на образование новых поверхностей, что при хрупком разрушении металла есть еще один потребитель энергии «змея», а сам «змей» должен быть, следовательно,

более мощным, причем значительно. Этот потребитель энергии — пластическая деформация.

Действительно, стекло является аморфным материалом, и его способность давать остаточные деформации под действием напряжения определяется вязкостью. Вязкость аморфных тел резко увеличивается при понижении температуры. Например, снижение температуры всего на 20 градусов (от  $+80$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ) увеличивает вязкость стекла в 10 000 раз. Значит, стекло всегда можно «заморозить» настолько, что его «течение» вообще станет невозможным. Уже комнатной температуры для этого достаточно. Стекло может реагировать на приложение внешней нагрузки либо изменением расстояний между атомами в пределах упругой деформации, либо (если в нем есть трещина, а напряжение достаточно велико, чтобы выполнялось условие Гриффитса) путем хрупкого разрушения. Металлы — тела кристаллические, и механизм их пластического течения иной. Пластическое течение, как мы знаем, связано с движением дислокаций. Сопротивление кристаллической решетки металлов движению дислокаций возрастает с понижением температуры, однако, далеко не столь резко, как вязкость аморфных тел. Вблизи абсолютного нуля предел упругости металла всего в несколько раз выше, чем при комнатной температуре.

Таким образом, раз около вершины трещины концентрируется огромное напряжение, некоторый объем металла всегда будет пластически деформирован. При распространении трещины по кристаллу в зону высоких напряжений у ее вершины будут попадать все новые источники дислокаций, которые трещина заставит работать, что приведет к увеличению плотности дислокаций. Короче говоря, когда трещина разорвет металл, поверхность излома будет пластически деформирована, и мы уже не сможем собрать и склеить осколки, восстановив исходную деталь с той же высокой точностью, как в случае стекла.

При хрупком разрушении металлов пластически деформированный слой, прилегающий к поверхности излома, существует всегда; речь может идти не о его наличии или отсутствии, а только о его толщине. В зависимости от условий работы металла (температуры, скорости приложения нагрузки, габаритов изделия, которые определяют полный запас упругой энергии, питающей про-

песс разрушения) его толщина может меняться от долей микрометра до многих десятков микрометров. Поскольку на пластическую деформацию затрачивается определенная работа, толщина слоя будет влиять на общие энергозатраты, связанные с разрушением. Чем быстрее бежит трещина, тем тоньше деформированный слой и тем в меньшей степени он деформирован, так как требуется некоторое время на приведение в действие дислокационных источников — они обладают определенной инерцией.

Все это не противоречит концепции Гриффитса, идее баланса энергий. Просто в его формуле к величине  $\gamma_s$  нужно добавить еще одно слагаемое  $\gamma_p$  — энергию, затрачиваемую на пластическую деформацию слоя материала, прилегающего к новой поверхности:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{E(\gamma_s + \gamma_p)}{c}}.$$

Теперь все становится на свои места, потому что слагаемое  $\gamma_p$  обычно на 2—3 порядка больше, чем  $\gamma_s$ , которую Орован назвал истинной поверхностной энергией, чтобы отличить ее от  $\gamma_p$  — эффективной поверхностной энергии. Первым слагаемым можно пренебречь ввиду его малости. И действительно, формулу Гриффитса — Орована часто записывают в виде

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{E\gamma_p}{c}}.$$

Важно, что величина  $\gamma_p$  не остается постоянной в течение всего процесса роста трещины. По мере разгона трещины, как уже было сказано, она уменьшается. Однако даже в самых неблагоприятных условиях она остается значительно выше  $\gamma_s$ . В. М. Финкель подсчитал, что эффективная поверхностная энергия стала бы равна истинной при скорости трещины 24 км/с. Трещина с такой скоростью двигаться не может; ее предельная теоретическая скорость составляет определенную долю (около половины) от скорости звука в металле, т. е. 2,5—3 км/с. Значит, на  $\gamma_p$  всегда приходится большая часть энергии «змея».

Однако, как ни «мал золотник»  $\gamma_s$ , а совсем пренебречь собой он не позволяет. Его роль проявляется в том, что при хрупком разрушении монокристаллов поверхность излома всегда «придерживается» определенной

кристаллографической плоскости в решетке. Эти плоскости называют «плоскостями скола». Например, кристаллы с ОЦК решеткой раскалываются по плоскости грани куба, и расчеты показали, что именно эта плоскость обладает наименьшей истинной поверхностной энергией. Таким образом,  $\gamma$ , как бы «направляет» процесс хрупкого разрушения, ориентирует трещину в кристаллической решетке, а  $\gamma_p$ , хотя и берет на себя львиную долю энергии, но «действует» только в рамках уже заданной ориентировки трещины.

Значит, есть плоскости в кристалле, по которым он раскалывается сравнительно легко, если привести его в хрупкое состояние, например, охладив до низкой температуры. В предельном случае при хрупком разрушении кристалла в изломе обнажится определенная атомная плоскость — плоскость скола — и мы получим совершенно идеальное зеркало.

В металлах, даже самых хрупких, вид излома далек от этого идеала по уже известной нам причине — поверхность разрушения «испорчена» пластической деформацией. В сильный микроскоп мы увидим на ней ступеньки, впадины, бугорки и т. п. Рельеф поверхности излома может быть достаточно пологим, но это все же не идеальная атомная плоскость. Конечно, такой излом блестит, но зеркало это — «мутноватое». Излом, полученный в результате вязкого разрушения металла вообще не блестит; он матовый, хорошо рассеивает свет, так как поверхность его неизмеримо рельефнее, гораздо сильнее «испорчена» деформацией. Что касается стекла, то, как мы знаем, его легко «заморозить» и получить идеально хрупкое разрушение. Именно поэтому его так любил Гриффитс. Но стекло — аморфный материал: оно не имеет кристаллической решетки, его атомы не образуют таких правильных построений, как атомы кристаллов. Следовательно, само понятие «атомная плоскость» здесь неприменимо. Поверхность хрупкого разрушения стекла, конечно, блестит, но далеко не так, как блестят бриллианты.

Вот мы и подошли ко второму вопросу, который поставили в начале этой главы. Почему сияет грань алмаза? Это, конечно, определяется его оптическими свойствами. Но здесь важно и еще одно обстоятельство. Алмаз — вещество кристаллическое, но гораздо более хрупкое, чем самый хрупкий металл. Дело в том, что ковалентная

связь, объединяющая атомы в решетке алмаза имеет строгую направленность, она далеко не так гибка, как в других веществах. Если мы вспомним механизм перемещения дислокаций в кристаллической решетке (рис. 42), то будет видно, что он требует значительных угловых смещений атомов относительно соседнего атомного слоя (хотя все это и происходит в малом объеме — вблизи края лишней полуплоскости). Ковалентная связь в алмазе не может выдержать таких деформаций, поэтому движение дислокаций в решетке алмаза практически исключено. Вот почему алмаз тверже всех металлов и всех существующих на Земле минералов, вот почему алмаз может резать все, что угодно, а его ничем разрезать или даже поцарапать нельзя.



Рис. 86.

Однако, если нельзя разрезать, то можно расколоть, так как чем тверже материал, тем он обычно более хрупок. Задача ювелира — правильно найти плоскость скола и точно нанести удар. И тогда обнажившаяся грань алмаза будет сиять, как вечные снега Кавказа, поверхность которых, отшлифованная ветром времени, хорошо отражает солнечные лучи.

## § 5. Сверхпрочность

Теперь, когда читатель знает, в чем причина низкой реальной прочности металлов, у него может возникнуть вопрос о возможности ее резкого увеличения. Действительно, известно, чем обычно ограничена величина предельной упругой или пластической деформации, но ведь есть сверхупругость и сверхпластичность. Почему бы не быть сверхпрочности?

Разговор об этом уже был и сейчас нам предстоит его продолжить. Вначале наметим пути получения сверхпрочных материалов и вернемся для этого к опытам А. Гриффитса. До своего «изгнания» из лаборатории (а позже Гриффитс стал известным конструктором авиационных двигателей) он успел установить интересную закономерность: чем тоньше стеклянные волокна, тем

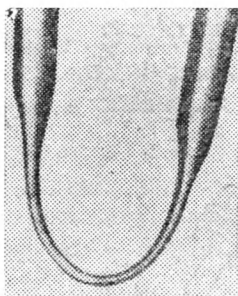


Рис. 87.

выше их прочность на разрыв, т. е. напряжение (конечно, не нагрузка), которое они могут выдержать. Гриффитс утонял волокна, нагревая их той самой злополучной горелкой и оттягивая их концы. В результате ему удалось получить образцы диаметром 2,5 мкм, и их прочность составила 3500 МПа, тогда как прочность обычного стекла («оконной толщины») — около 100 МПа. Поскольку довольно строго соблюдалась обратно пропорциональная зависимость между прочностью и диаметром образцов, Гриффитс посчитал, что он вправе экстраполировать эту зависимость в область очень малых диаметров волокон. Получилось, что такая «паутина» должна была бы иметь прочность более  $10^4$  МПа. Эта экспериментальная оценка хорошо совпадает с теоретической, так как модуль Юнга стекла  $7 \cdot 10^4$  МПа.

В дальнейшем удалось получить волокна диаметром 1 мкм и менее, и значения их прочности хорошо укладывались на продолжение экспериментальной кривой Гриффитса. Пример показан на рис. 87. Взяв циркуль и линейку, можно легко убедиться в том, что деформация наружных слоев этой стеклянной нити превышает 7 %, причем эта деформация упругая. Нить полностью рас-

прямляется, если отпустить ее концы. Тогда, пользуясь законом Гука, можно оценить, что напряжение на поверхности нити более  $5 \cdot 10^3$  МПа. Дж. Гордон (автор замечательной книжки «Почему мы не проваливаемся сквозь пол?») сообщает, что позже были получены стеклянные нити с прочностью более  $10^4$  МПа, так что прогноз Гриффитса снова подтвердился.

Анализируя свои результаты, Гриффитс понял, что с уменьшением диаметра волокон снижается вероятность появления в них дефектов опасного размера. В дальнейшем это положение получило строгое обоснование.



Рис. 88.

Итак, первый путь к сверхпрочности — это уменьшение площади сечения материала. Не будем, однако, забывать, что в конечном счете нам важна обычно не прочность материала, а нагрузка, которую он может выдерживать. Значит, мы можем резко усилить конструкцию указанным путем, если сохраним площадь ее поперечного сечения. Канат, сделанный из тонких проволочек,



мог бы в принципе выдерживать значительно большую нагрузку, чем монолитный стержень такого же диаметра, как наш канат.

Другой путь связан с улучшением состояния поверхности материала, поскольку на поверхности всегда есть неровности, царапины и другие дефекты, вызывающие концентрацию напряжений. К чему ведет концентрация напряжений, нам уже известно. На важнейшую роль поверхности в разрушении прямо указал своим классическим экспериментом один из основателей советской школы физиков академик А. Ф. Иоффе. В 1924 г. он обнаружил эффект резкого увеличения прочности кристалла

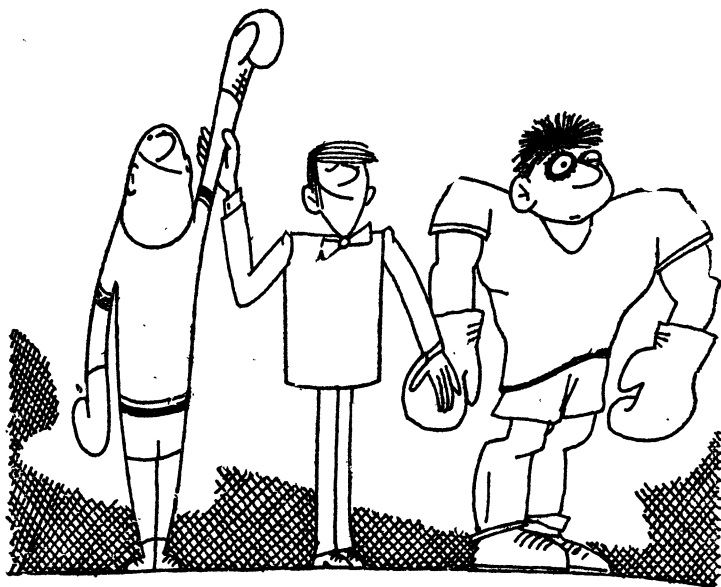


Рис. 89.

каменной соли при испытании его под водой. Этот эффект так и называют — эффект Иоффе. Если в воду погружали часть кристалла, то она, естественно, становилась тоньше из-за растворения, но при нагружении кристалл разрушался по толстой (сухой) части, хотя ее сечение могло быть больше в десятки и даже сотни раз. Мокрая часть кристалла обнаруживала прочность, близкую к теоретической.

Причина этого эффекта, вызвавшего в то время огромный интерес физиков и инженеров, состоит в том, что вода растворяет даже малейшие неровности на поверхности кристалла, делая ее идеально гладкой. Одного этого оказалось достаточно, чтобы приблизиться к предельным значениям прочности на разрыв.

Но вернемся от стекла и каменной соли к металлам. Ведь про каменную соль можно сказать примерно то же, что и про алмаз. Хотя ионная связь, объединяющая ионы натрия и хлора в кристаллической решетке соли не имеет такой строгой направленности, как ковалентная, но она далеко не так гибка, как металлическая. Дислокационный механизм пластической деформации в ионных кристаллах реализуется с большим трудом, и многие из них почти так же хрупки, как ковалентные.



Рис. 90.

В металлических кристаллах дислокации подвижны, и в этом причина высокой пластичности металлов. Движение дислокаций можно затруднить, но металл все равно не будет таким хрупким, как алмаз или соль, потому что полностью заблокировать дислокации не удастся. С другой стороны, дислокации могут сами порождать трещины, что видно, например, из рис. 46. Когда две дислокации одного знака соединяются вместе, то под краем двух лишних полуплоскостей есть уже маленькая трещинка. Третья дислокация увеличит размер этой полости и т. д.

Напрашивается вывод: приблизиться к теоретической прочности металлических кристаллов можно только в том случае, если в них совсем или почти совсем не будет ди-

словаций. Как это сделать? Здесь на помощь человеку пришла сама природа. Именно в естественных условиях образовались очень тонкие кристаллики различных веществ, которые давно уже встречались людям в минералах, на стенах пещер и пр. Интерес к этим кристаллам усилился, когда они начали приносить вред, вызывая замыкания в разного рода радио- и электроаппаратуре. Оказалось, что нитевидные металлические кристаллы — их называли усами — могут медленно расти на поверхности гальванических покрытий, достигая иногда нескольких сантиметров в длину. Диаметр их обычно составляет 1—2 мкм (рис. 90). И лишь 30 лет назад выяснилось, что металлические усы способны выдерживать небывалую по величине упругую деформацию — несколько процентов, а прочность их близка к теоретической.

Пришлось учиться выращивать усы в лабораториях, учиться управлять процессом их роста, ускорять его, поскольку в естественных условиях он длится месяцы и годы. Нужно было создавать и особые испытательные микромашины для исследования механических свойств объектов такого малого размера. Но усилия ученых были



Рис. 91.

вознаграждены. В настоящее время получены усы многих металлов, металлоидов и различных соединений, выяснена причина их необычайно высокой прочности и уже начато их практическое использование в технике.

Что касается металлических усов, то их высочайшая прочность (например,  $1,4 \cdot 10^4$  МПа для железа) обусловлена одновременным действием всех трех рассмотренных нами факторов: они имеют очень малое сечение (порядка 1 мкм<sup>2</sup>), они имеют чрезвычайно гладкую поверхность (шероховатость часто не обнаруживается при увеличении в десятки тысяч раз) и, наконец, они практически не содержат дислокаций и поэтому не способны к пластической деформации.

## § 6. Усталость и живучесть металлов

Мы уже упоминали эти термины, почерпнутые, как и многие другие, из обыденной жизни человека. Если металл напрягается, течет, забывает, вспоминает, поет, молчит и т. д., то он может, конечно, и устать. Коротко рассмотрим это явление — усталость металлов — и заодно поговорим о том, как их живучесть помогает хотя бы отчасти преодолевать усталость.

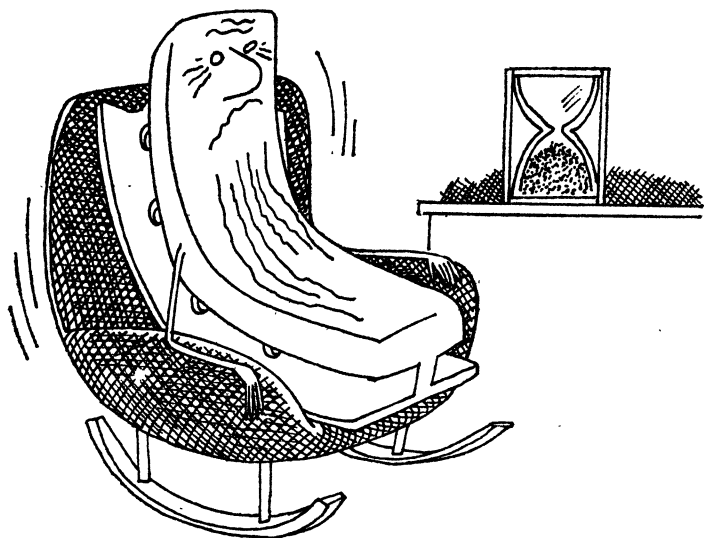


Рис. 92.

Еще в эпоху гужевого транспорта люди замечали, что на осях почтовых карет после длительного пробега появлялись мелкие трещины, которые, постепенно разрастаясь, приводили к их разрушению. С появлением же-

лезных дорог это явление превратилось в важнейшую техническую проблему и получило свое современное наименование — усталость. Оно заключается в постепенном накоплении повреждений и росте трещин под действием циклически изменяющейся нагрузки. Если какая-либо деталь испытывает постоянную изгибающую нагрузку и при этом вращается, то напряжение на ее поверхности за время одного полного оборота успевает дважды изменить знак. В нижней точке изогнутого вала (рис. 93) напряжение в данный момент растягивающее, но вскоре эта точка окажется наверху и попадет в зону сжимающих напряжений и т. д. Таких деталей вокруг нас — миллионы. К ним относится и упомянутый в начале книги коленчатый вал двигателя, железнодорожные оси, нагруженные весом вагона, рельсы, по которым едут вагоны, и многие-многие другие.

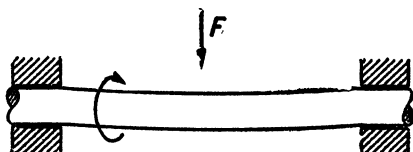


Рис. 93.

Мы не случайно ведем речь о железнодорожном транспорте — примеры, которые мы рассмотрим, близки каждому читателю, потому что все мы в большей или меньшей степени пассажиры и каждому хочется добраться до станции назначения живым и невредимым. Эти примеры подсказал нам один знакомый железнодорожник — крупный специалист в области рельсовых сталей, повидавший и расследовавший много аварий на железной дороге.

Особая опасность явления усталости в том, что заключительный этап разрушения обычно подкрадывается незаметно: не возникает ни значительных остаточных деформаций, ни каких-либо других внешних признаков приближающейся агонии материала. При этом сам уровень напряжений, вызывающих усталость металлов, очень невысок; разрушение может наступить после определенного числа циклов воздействия такого напряжения, которое в 3—4 раза меньше обычного предела прочности (т. е. разрушающего напряжения, определенного при однократном нагружении материала).

Появление усталостных трещин обусловлено движением и постепенным накоплением дислокаций вблизи поверхности изделий. Этот процесс пластической деформации охватывает не весь объем материала (для этого нужно, чтобы напряжение превосходило предел упругости), а сосредоточен в самых слабых точках детали — там, где есть острые углы, отверстия или другие концентраторы напряжения. С появлением трещины она сама становится эффективным концентратором напряжения и растет с увеличивающейся скоростью, так как чем она длиннее, тем выше концентрированное напряжение  $\sigma_{\text{конц}}$  у ее вершины. Постепенный рост трещины приводит к тому, что рано или поздно начинает выполняться уже известное нам гриффитсовское соотношение. За этим критическим моментом наступает быстрое окончательное разрушение, которое происходит за один или несколько последующих циклов — рельс «лопается».

Полный срок службы изделия можно разделить на две части: время до появления трещины такого размера, которую уже можно обнаружить каким-либо методом, и время от этого момента до окончательного разрушения. К счастью, второе слагаемое часто бывает достаточно большим. Соотношение между этими двумя составляющими полной долговечности изделия зависит от свойств самого материала и от многих внешних факторов, но чаще всего второй период растягивается на десятки и сотни тысяч циклов.

Способность материала работать при наличии растущей в нем трещины называется живучестью. Конечно, точная продолжительность периода живучести определяется чувствительностью того метода, который мы будем применять при обнаружении трещин, поэтому этот вопрос обычно переходит в практическую плоскость.

Приведем наглядный пример, показывающий, что живучесть имеет решающее значение для характеристики надежности таких изделий, которые можно периодически подвергать дефектоскопическому контролю и изымать из эксплуатации при обнаружении в них трещин (рис. 94). На рисунке показана зависимость длины усталостной трещины в трех разных материалах от числа циклов нагружения (или от времени, если известна частота изменения нагрузки). Штриховые вертикальные линии на диаграмме характеризуют периодичность контроля, горизонтальная линия  $l_0$  — разрешающую способность дан-

ного метода дефектоскопии. Положение этих линий на диаграмме часто не просто зависит от нашего желания, а определяется требованиями жизни,

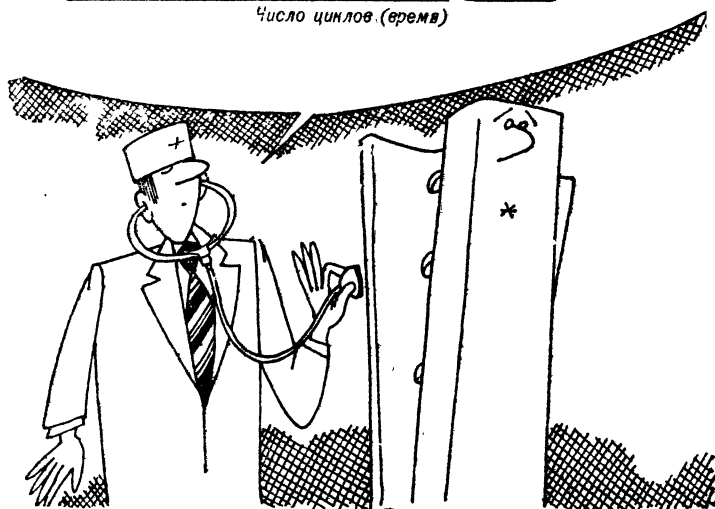
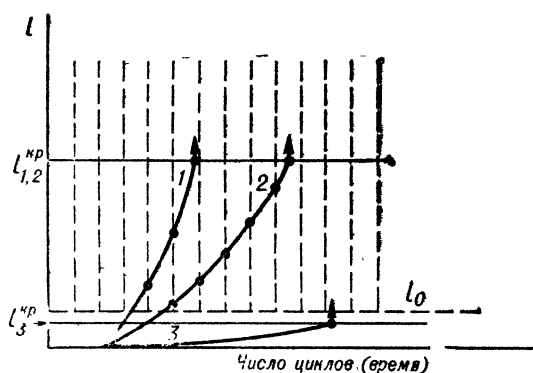


Рис. 94.

На железной дороге конкретное воплощение этой ситуации каждый пассажир может наблюдать из окна своего купе. Многие, вероятно, видели стоящие на путях вагоны-дефектоскопы, но пока еще контроль рельсов в основном осуществляется вручную. Если вы много путешествуете по железной дороге, то, возможно, видели и такую картину: вдоль пути движется рабочий в наушниках, толкая перед собой тележку на колесах, везущую

ультразвуковой дефектоскоп. Он обходит свой участок дороги 1 раз в 10 дней, и если ему попадется трещина в рельсе размером больше копеечной монеты, в наушниках прозвучит предостерегающий сигнал. Рельс будет заменен новым — и угроза катастрофы миновала. Повышение чувствительности дефектоскопа — задача технически разрешимая, но это привело бы к замедлению процесса контроля или сделало бы аппаратуру более громоздкой, так что обходчик уже не смог бы действовать в одиночку. Можно и чаще делать проверки, но ведь надо когда-то пропускать и сами поезда и, кроме того, возможное число обходчиков не беспрельдно. Чтобы можно было представить себе масштабы всей этой работы, назовем некоторые цифры. Протяженность железных дорог в СССР 140 тысяч километров, причем она растет с каждым годом. Каждая дорога состоит, как минимум, из двух линий рельсов. Длина одного участка рельса 25 м, а масса одного метра в среднем 65 кг. Ежегодно надо около 40 раз проконтролировать каждую точку каждого рельса. И ежегодно, ради нашей безопасности, изымаются из эксплуатации примерно 240 тысяч рельсов, т. е. около полумиллиона тонн стали.

Теперь вернемся к нашим трем материалам, из которых первые два, предположим, имеют одинаковую критическую длину трещины  $l_{к.р.}$ . При достижении этой длины и при заданном рабочем напряжении будет выполнено соотношение Гриффитса, и произойдет катастрофически быстрое разрушение, которое уже нельзя будет предотвратить. В материалах с одинаковой  $l_{к.р.}$ , т. е. с одинаковой склонностью к хрупкому разрушению, усталостные трещины могут расти с существенно разными скоростями. Так и в нашем случае материал 2 имеет значительно большую живучесть, чем материал 1. Из рис. 94 видно, что в первом материале трещина может быть обнаружена при двух проверках, а во втором — при пяти.

Ясно, какой из этих двух материалов будет более надежным. Ведь обходчик — это живой человек, который может быть в плохой форме или отвлечься в неподходящий момент и т. д. Даже если предположить самое худшее, дефектный рельс из второго материала будет заменен, прежде чем трещина достигнет критического размера (примерно — с металлический рубль) и произойдет непоправимое. То, что наверняка можно сделать с пятой попытки, не всегда делается со второй!



Что касается материала 3, то если бы мы могли повысить чувствительность дефектоскопа, оказалось бы, что он обладает великолепной живучестью. Но пока это невозможно, этот материал должен быть безжалостно забракован. Хотя трещина усталости в нем растет очень медленно, она достигнет критической длины и разорвет рельс, даже не предупредив дефектоскописта о своем присутствии.

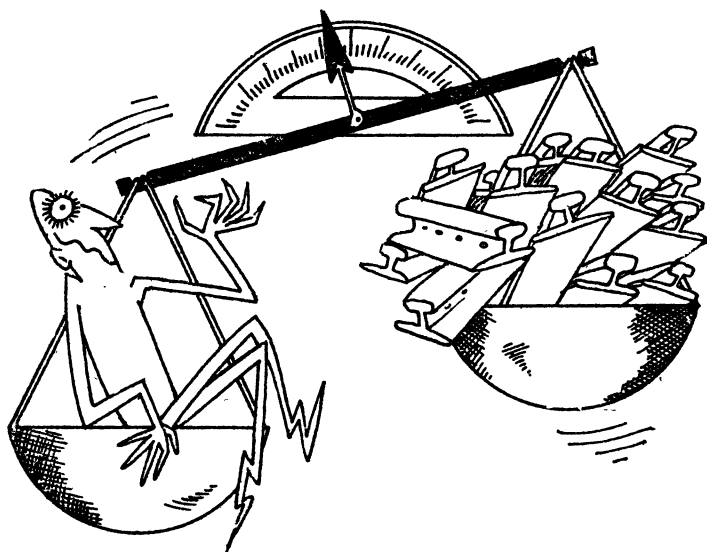


Рис. 95.

Все неприятности, связанные с рассмотренной ситуацией, на этом, к сожалению, не кончаются. Если разрушение рельса привело к аварии, то обязательно проводится экспертиза. Эксперты, которые анализируют строение излома, структуру и свойства материала разрушенного рельса, должны вынести свое авторитетное заключение: мог или не мог обходчик обнаружить трещину, т. е. могла ли она за 10 дней увеличить длину от  $l$  до  $l^{кр}$ . Если да, то виноват технолог, выпустивший рельс с негодной живучестью. Если нет, то виноват обходчик, пропустивший трещину из-за своей невнимательности. Так иногда переплетаются юридические и физические законы.

## МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

В самом начале этой книги мы выяснили, что при обычных условиях затвердевания жидкого металла его атомы образуют кристаллическую решетку того или иного типа. Строгую периодичность системы ионов называют «дальним порядком». Например, при многократном повторении в пространстве той комбинации ионов, которая изображена на рис. 26, в, воспроизводится объемно-центрированная кубическая решетка. При наличии дальнего порядка мы можем точно указать координаты любого иона, если знаем его порядковый номер по отношению к произвольно выбранному исходному иону. Все позиции ионов, все межатомные расстояния четко определены; все — как в солдатском строю.

Не следует думать, что «солдаты» стоят по стойке «смирно». Атомы совершают колебательные движения около положений равновесия с тем большей амплитудой, чем выше окружающая температура. Они могут даже обмениваться местами, если в «строю» появляется вакантное (незаполненное) место, но при температурах, далеких от температуры плавления, такие события чрезвычайно редки.

В жидком металле картина другая. Здесь больше подходит сравнение с большой толпой штатских людей. В толпе можно легко потерять приятеля — это сразу наводит на мысль о том, что люди в толпе обмениваются местами. Более того, если вы потеряли своего товарища из виду, то очень скоро вы вообще не сможете указать его координаты; известно точно только одно — он находится где-то в толпе.

Все же и в этой суматохе внимательный глаз может обнаружить некоторый порядок. В частности, вы заметите, что ваши ближайшие соседи периодически меняются, но их число почти всегда остается неизменным — один спереди, один сзади и двое по бокам. (Это число относится к толпе «средней» плотности; вас могут сдвинуть и

так, что в ближайшем окружении окажется большее число людей.)

Возвращаясь к системе атомов, мы назовем такую ситуацию «ближним порядком». Можно довольно точно указать координаты и количество атомов, окружающих данный атом, но более далеких прогнозов делать уже нельзя.

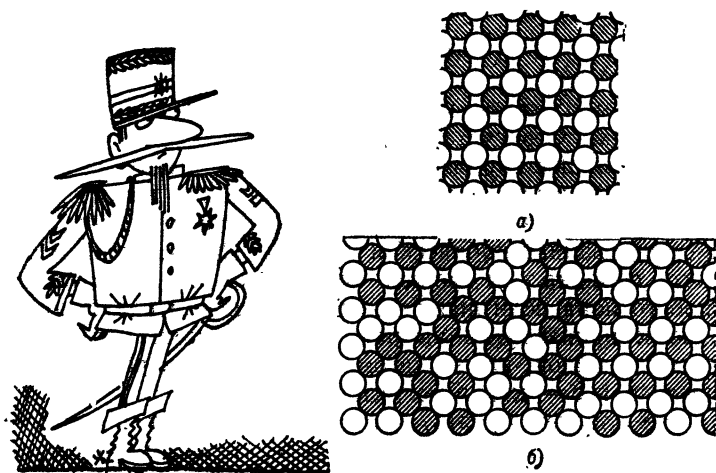


Рис. 96.

В сплавах ближний порядок может проявляться еще и в стремлении атомов одного сорта окружать себя, например, атомами другого компонента сплава. Если атомы двух компонентов резко различаются по размерам, то маленькие атомы будут стараться расположиться в пустотах между большими атомами, так как там больше места, чем в пустотах между такими же маленькими. Значит, в ближайшем окружении крупных атомов будут преобладать маленькие и наоборот. Но поскольку правильной периодичности в расположении тех и других атомов нет, точно определить положения более отдаленных соседей мы не сможем. В идеальном случае получается строгое чередование больших и малых атомов в решетке — дальний порядок. На рис. 96 показаны типичные примеры дальнего (а) и ближнего (б) порядка в сплавах, в которых количество атомов двух разных сортов

одинаково. Видно, что в случае ближнего порядка уже не у всех атомов одного сорта все четыре ближайших соседа являются атомами другого сорта. Но все же в ближайшем окружении большей части заштрихованных атомов преобладают незаштрихованные и наоборот.

При охлаждении с умеренной скоростью атомы металлов и других кристаллических веществ имеют достаточно времени, чтобы выстроиться в строгом геометрическом порядке. В момент достижения температуры кристаллизации они действуют, как бы следуя армейской команде «становись!». У таких веществ вязкость в расплавленном состоянии вблизи температуры затвердевания довольно низкая, иначе атомам трудно было бы пробраться на свои законные места в правильной решетке, создать дальний порядок.

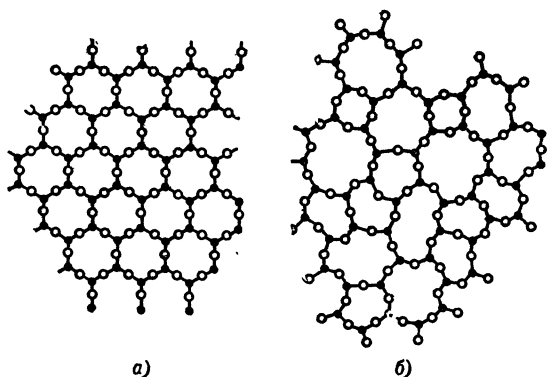


Рис. 97.

Но в природе существует и другая категория веществ, которые называются аморфными. При охлаждении, когда энергия тепловых колебаний атомов становится столь низкой, что они уже не могут свободно путешествовать, эти вещества сохраняют структуру жидкости. Здесь может идти речь только о ближнем порядке в расположении атомов. Движение «толпы» как бы постепенно затихает, люди все менее энергично толкают друг друга и, наконец, застывают на своих случайных местах, слегка покачиваясь из стороны в сторону. На рис. 97 хорошо видна разница в строении кварца, который является веществом кристаллическим (а) и кварцевого стекла, которое аморфно. Черными круж-

ками изображены атомы кремния, а белыми — кислорода. При одном и том же химическом составе ( $\text{SiO}_2$ ) и одинаковом ближайшем окружении каждого атома особенно отчетливо проявляется различие между дальним и ближним порядком.

Обычное стекло, смола, парафин, асфальт — это примеры природно аморфных материалов, не имеющих правильного кристаллического строения. Такие материалы при нагревании и охлаждении лишь изменяют свою вязкость, но никаких принципиальных изменений во взаимном расположении составляющих их атомов не происходит.

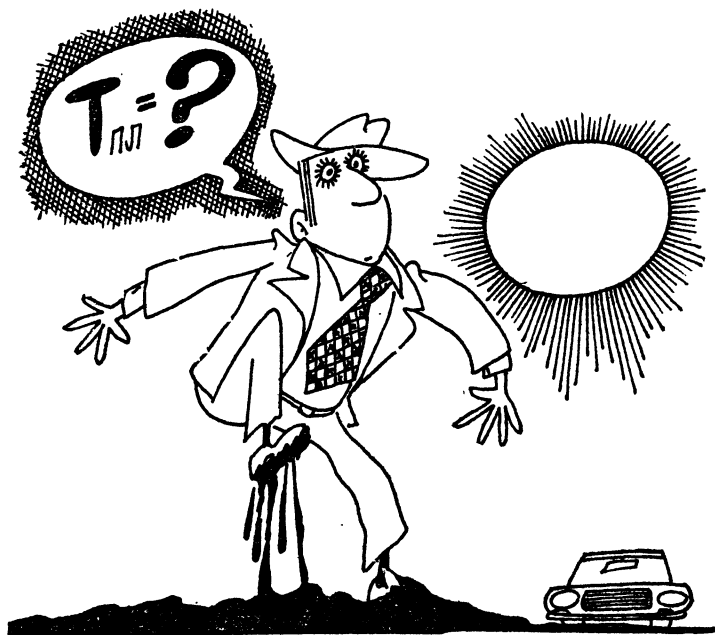


Рис. 98.

Типичный вопрос «на засыпку»: «При какой температуре плавится асфальт?» — часто задается в различных конкурсах знатоков. Правильный ответ — асфальт не имеет температуры плавления, потому что плавление есть разрушение кристаллической решетки, фазовый переход от кристаллического состояния к жидкому.

Впрочем температурные изменения вязкости при нагреве аморфных тел могут быть столь сильными, что внешне картина мало отличается от плавления. Мы уже говорили о том, что, например, при изменении температуры стекла всего на 20 градусов вязкость его уменьшается на 4 порядка. При дальнейшем повышении температуры вязкость падает еще быстрее, и вот уже из первоначально очень хрупкого стекла можно выдувать ажурные изделия, а еще подогреть — и оно течет, как вода.

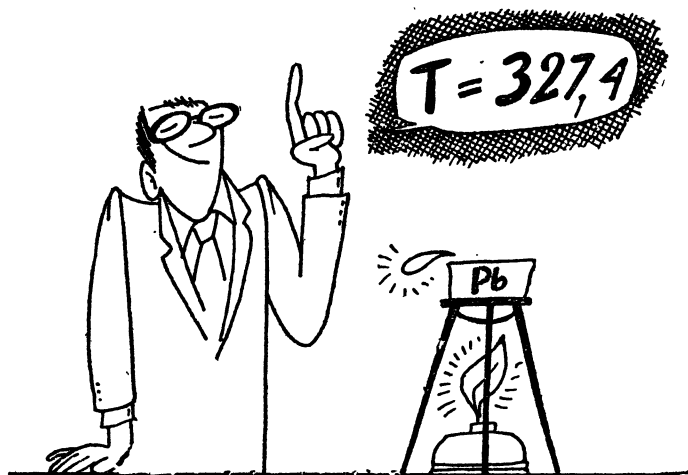


Рис. 99.

У кристаллических тел подобные изменения свойств при нагреве происходят гораздо более резко, а само плавление — у чистых металлов — идет при строго определенной температуре, так что температура плавления металла является одной из его фундаментальных физических характеристик (констант). Если не меняется внешнее давление и металл хорошо очищен от примесей, то по появлению первой капли при нагреве можно определить температуру с точностью до десятых долей градуса. Это обстоятельство с успехом используется при градуировке различных приборов, измеряющих температуру.

Возникает вопрос — нельзя ли и в металлическом сплаве «заморозить» ту атомную структуру, которая характерна для жидкости, нельзя ли лишить металл

дальнего порядка в твердом состоянии. Ведь тогда можно ожидать значительного изменения всех тех его свойств, которые определяются правильным строением кристаллов. Например, если у металла нет кристаллической решетки, то в нем не может быть и дислокаций в обычном понимании этого слова, потому что дислокация — это вполне определенное локальное нарушение правильной решетки. В аморфном металле нет и границ зерен, так как границы — это места сопряжения кристаллов, имеющих разную ориентировку решетки в пространстве.

В принципе способ, с помощью которого можно решить такую задачу, ясен — надо пытаться резко увеличить скорость охлаждения жидкого металла, чтобы быстро спуститься в ту область температур, где атомы уже не могут менять своих соседей. Расчеты и эксперименты показали, что подавить процесс кристаллизации действительно удастся, но для этого нужны скорости охлаждения порядка миллионов градусов в секунду. Необходимость обеспечить такие громадные скорости охлаждения расплавленного металла создает известные технические трудности. Один из разработанных способов заключается в разбрызгивании мелких капель жидкого металла на хорошо отполированную поверхность быстро вращающегося холодного медного диска. Капля на поверхности диска «размазывается» очень тонким слоем (несколько микрометров), а хорошая теплопроводность меди обеспечивает высокую скорость теплоотвода.

Другие варианты — прокатка тонкой струи расплава между двумя массивными медными валками, расплющивание капли жидкого металла при резком сближении двух отполированных медных пластин и т. п. (рис. 100). По-видимому, первым получил аморфный металл советский ученый Е. С. Бушуев в 1945—1946 гг. Ему удалось реализовать метод «расплющивания» и с помощью рентгеновских лучей доказать, что он получил металлическое стекло. Однако результаты Е. С. Бушуева в то время вызвали сомнения и не были опубликованы, так что сейчас об этом имеются лишь устные сообщения.

«Массовое» получение аморфных металлических сплавов в научных лабораториях началось в 60-х годах, а в настоящее время уже налажен промышленный выпуск десятков сплавов в аморфном состоянии. Оказалось, что легче всего аморфизуются сплавы переходных и благородных металлов с металлоидами (неметаллами — угле-

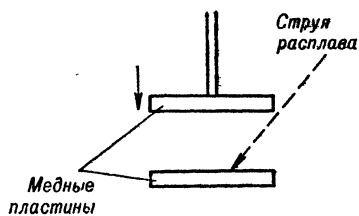
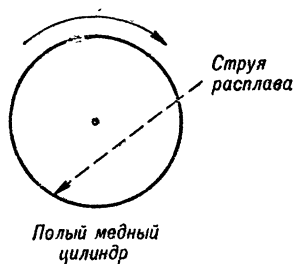
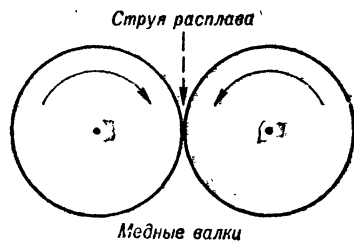
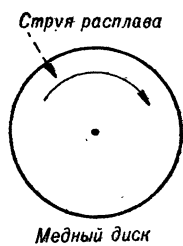


Рис. 100.



родом, бором, фосфором и др.), причем есть сплавы, в которых удается подавить кристаллизацию при скорости охлаждения порядка тысяч и даже сотен градусов в секунду. Предельная толщина металлических стекол из таких сплавов приближается к 1 мм. Чистые металлы, наоборот, очень трудно «заморозить». Пока лишь только никель удалось получить в аморфном состоянии, для чего потребовалась скорость охлаждения порядка  $10^{10}$  градусов в секунду. Естественно, что чем выше критическая скорость охлаждения, необходимая для аморфизации, тем меньше предельная толщина металлического стекла. Ведь мы можем организовать быстрый отвод тепла только с поверхности остывающей пленки, а скорость охлаждения ее внутренних слоев регулируется уже теплопроводностью самого металла. Поэтому наиболее «ходовая» толщина металлических стекол — единицы или десятки микрометров.

Аморфное состояние металла в принципе неустойчиво, поскольку при наличии дальнего порядка суммарная энергия системы атомов меньше. Плотность металлических стекол всегда несколько меньше, так как средние межатомные расстояния больше, чем у соответствующих кристаллов. Аморфный сплав может реализовать свое стремление к кристаллизации при нагреве до температур, при которых подвижность атомов достаточна для их перестройки с образованием дальнего порядка. Здесь привычная последовательность событий меняется на обратную. Металл кристаллизуется не при охлаждении, а при нагреве, причем тем быстрее, чем выше температура. Если зависимость времени, необходимого для начала кристаллизации, от температуры экстраполировать к  $+20^{\circ}\text{C}$ , то получится, что при комнатной температуре самое неустойчивое металлическое стекло может «жить» 200 тысяч лет. Таким образом, аморфные сплавы «боятся» нагревов, но вдали от опасного района температур могут нести службу практически неограниченное время.

Какие же свойства аморфных сплавов особо ценны для техники? Как и ожидалось, аморфные металлы во многих отношениях отличаются от своих кристаллических собратьев. Хотя модули упругости при аморфизации снижаются в среднем на 30 % (силы межатомной связи уменьшаются), но прочность и твердость резко возрастают. Отсутствие дислокаций приводит к тому, что металлические стекла по прочности превосходят самые

лучшие легированные стали ( $\sim 3000$  МПа). Высокая твердость определяет их великолепную износостойкость. Правда, пластичность аморфных сплавов низка, что тоже можно было ожидать, так как «носителями» пластичности являются дислокации. Все же металлические стекла не так хрупки, как обычное стекло. Их можно, например, прокатывать при комнатной температуре.

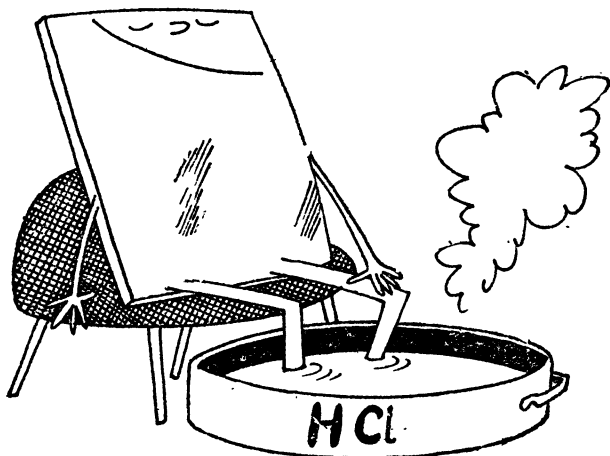


Рис. 101.

Другое важнейшее преимущество аморфных металлических сплавов — их исключительно высокая коррозионная стойкость. Во многих весьма агрессивных средах (морской воде, кислотах) металлические стекла вообще не корродируют. Например, скорость коррозии аморфного сплава, содержащего железо, никель и хром, в растворе соляной кислоты практически равна нулю. Для сравнения можно сказать, что скорость коррозии «классического» коррозионностойкого сплава железа с никелем и хромом (знаменитая нержавеющая сталь, которую так и называют — «нержавейка») в той же среде превышает 10 мм/год. Основная причина такой высокой коррозионной стойкости аморфных сплавов, по-видимому, состоит в том, что не имея кристаллической решетки, они лишены и характерных «дефектов» кристаллов — дислокаций и, главное, границ между зёрнами. Высокая плотность упаковки атомов в кристалле вблизи этих «дефек-

тов» уменьшается столь резко, что вдоль них легко проникают в металл «вражеские агенты». Важно, что бездефектная структура аморфного сплава передается той тонкой окисной пленке, которая образуется на его поверхности на начальных стадиях коррозионного процесса и в дальнейшем защищает металл от прямого контакта с «агрессором».

Весьма интересным оказалось и сочетание некоторых физических свойств аморфных сплавов, в частности, магнитных и электрических. Выяснилось, что сплавы на основе ферромагнитных металлов (железа, никеля) в аморфном состоянии также ферромагнитны.

В плане практического использования ферромагнитных металлов важно их деление на «магнитомягкие» и «магнитожесткие». Первые применяют, например, для сердечников трансформаторов — здесь нужно, чтобы материал легко перемагничивался (менял направление намагничивания) при изменении направления тока, которое происходит 50 раз в секунду. Вторые трудно намагнитить, но зато их трудно и размагнитить. Поэтому после намагничивания они сами надолго остаются источниками сильного магнитного поля (постоянные магниты).

Магнитные свойства материалов необходимо определенным образом сочетать с их электрическими свойствами. В частности, электросопротивление сердечников трансформаторов должно быть возможно более высоким, потому что индуцируемые при перемагничивании «паразитные» вихревые токи нагревают сердечник и пускают на ветер значительную часть преобразуемой электроэнергии. Требования низкого магнитного и высокого электрического сопротивления в обычных кристаллических ферромагнетиках очень трудно совместить.

Но если магнитные свойства аморфных и кристаллических сплавов различаются мало, то в «электрическом отношении» аморфизация приводит к качественно новой ситуации.

В обычных кристаллических металлах даже вблизи температуры плавления средний пробег электронов проводимости между двумя столкновениями с решеткой может составлять несколько десятков межатомных расстояний. Такая большая длина пробега обусловлена правильной периодичностью в расположении ионов. Аморфизация устраняет дальний порядок и средняя длина свободного пробега электрона сразу уменьшается до

нескольких ангстрем, т. е. становится соизмеримой с межатомным расстоянием. Представьте себе, как легко пройти сквозь строй солдат, если расстояние между шеренгами достаточно велико и они не слишком раскачиваются, и как трудно протиснуться в нашей «застывшей» толпе людей.

Итог ясен — электросопротивление аморфных сплавов гораздо выше, чем кристаллических (обычно в 2—3 раза). С увеличением температуры обычных кристаллических металлов и сплавов их электросопротивление увеличивается, так как рост амплитуды тепловых колебаний решетки уменьшает длину свободного пробега электронов. Величину относительного прироста сопротивления при повышении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  называют температурным



Рис. 102.

коэффициентом электросопротивления. У аморфных сплавов этот коэффициент значительно меньше, чем у кристаллических. Более того, он может быть даже отрицательным, так как при увеличении температуры происходит некоторая релаксация атомной структуры металлического стекла (некоторая «утряска» атомов). При этом небольшое увеличение степени порядка в расположении атомов перекрывает действие другого фактора — роста амплитуды их тепловых колебаний и в результате при

повышении температуры электросопротивление уменьшается.

Если вернуться к сердечникам трансформаторов, то будет видно, что замена обычной трансформаторной стали аморфным сплавом даст огромную экономию энергии. В США подсчитано, что потери на вихревые токи уменьшаются при этом в 4 раза, а экономия только на одном из видов силовых трансформаторов составляет 200 млн. долларов в год. Необычное сочетание магнитных и электрических свойств металлических стекол позволяет с большим эффектом использовать их и для других преобразователей тока, датчиков, сердечников разного рода реле. Успешным оказался опыт применения аморфных металлов для головок магнитной записи, так как здесь немалую роль играет их высокая износостойкость. Сочетание износостойкости с коррозионной стойкостью позволяет получить долговечные и качественные лезвия для бритвы и другие подобные изделия.

Перспективы практического использования аморфного состояния металлов выглядят очень внушительно еще и потому, что сейчас уже созданы методы аморфизации тонких поверхностных слоев массивных изделий. При воздействии на поверхность изделия мощного лазерного или электронного луча удастся в короткое время расплавить очень тонкий наружный слой, который после прекращения воздействия остывает с огромной скоростью за счет отвода тепла в толщу холодного металла. Таким образом, обычный кристаллический металл, вероятно, можно будет надежно защитить от износа и коррозии.

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ — МАТЕРИАЛЫ БУДУЩЕГО

В этой небольшой главе, заключающей нашу книгу о металлах, речь пойдет об особом классе материалов, в котором металлы часто играют далеко не первые роли. Иногда металлы вообще не используются при создании таких материалов, т. е. они могут выступать в качестве конкурентов материалам металлическим. Это — так называемые композиционные материалы. Основную идею, используемую в этой области, один из первых «композиторов» американский ученый А. Дитц выразил следующим образом: «...Совместная работа разнородных материалов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого и количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих».



Рис. 103.

Читатель, вероятно, уже почувствовал, что в мире материалов множество запретов, часть из которых вообще невозможно преодолеть. Например, нельзя превысить теоретическую прочность, нельзя заставить металл нести

нагрузку при температурах, превышающих температуру его плавления. Это, так сказать, безусловные «нельзя».

Нельзя получить больших упругих деформаций, так как вступают в действие механизмы пластичности, нельзя получить больших пластических деформаций, потому что срабатывают механизмы разрушения, нельзя устранить остаточную деформацию без нового деформационного воздействия, поскольку она необратима по своей природе. Это уже такие «нельзя», с которыми мы в силах бороться методом «если очень хочется, то можно».

Трудно совместить требования высокой прочности и высокой пластичности, так как в одном случае нужно, чтобы дислокаций не было или чтобы они были неподвижны, а в другом — чтобы они были подвижными и легко размножались. С подобными трудностями можно бороться методом компромисса, хотя это и не радикальное решение проблемы.

Есть много трудностей и чисто инженерного характера. Одна из них особенно много забот вызывает у создателей авиационной и космической техники. Это — проблема соотношения прочности и плотности материалов, проблема экономии веса, которая имеет важное значение и на Земле.

## § 1. Очередное самоубийство

В фантастических романах можно встретить множество проектов, связанных с пробуриванием Земли насквозь или строительством лестниц, достающих до Луны. Есть близкие по смыслу примеры и в реальной жизни. Рассмотрим один из них.

При добыче нефти издавна используется метод откачки: насос опускают в скважину, а привод его («качалка», которую каждый видел хотя бы в фильмах о нефтепромыслах) находится на поверхности. Движение качалки передается насосу через колонну штанг — длинных стальных стержней, соединенных между собой муфтами. Чем длиннее колонна, тем большая нагрузка приходится на верхнюю штангу, так как вес колонны пропорционален ее длине. Но верхняя штанга может выдержать лишь такое напряжение, которое не превышает предела прочности стали, используемой для изготовления штанг.

Человек в поисках нефти «зарывается» все глубже и глубже в землю. Колонна штанг должна удлиняться, нагрузка на верхнюю штангу растет. Попробуем заказать металлургам штанги из более прочной стали. «Нет, — отвечают металлурги, — резервы прочности стали исчерпаны; если ваше изделие не выдерживает заданной нагрузки, мы можем изготовить для вас штанги большего диаметра». Что же, и на том спасибо. Площадь поперечного сечения значительно возрастет, так как она пропорциональна квадрату диаметра и при той же прочности верхняя штанга выдержит вес более длинной колонны.

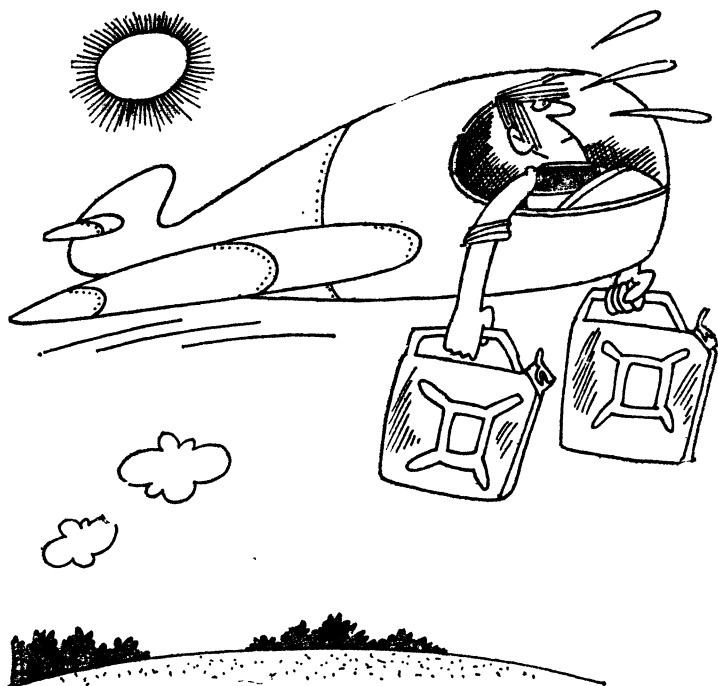


Рис. 104.

Но стоп! Ведь возрастет сечение и всех остальных штанг их вес и вес всей колонны увеличится точно в той же пропорции, в какой увеличится площадь сечения. Значит, таким образом решить проблему не удастся: 10—15 км — вот предел длины колонны из обычных сталей.



Конечно, можно искать выход в уменьшении сечения колонны по мере удаления в глубь Земли, но на этом пути немало технических трудностей, а главное — штанги должны выдерживать не только свой вес, но и передавать усилие от качалки насосу. Здесь уже начнутся обрывы по принципу «где тонко, там и рвется», тонкие штанги не выдержат рабочего напряжения.

Этот пример показывает важность такой характеристики материала, как отношение прочности к удельному весу. Чем выше это отношение, тем с больших глубин мы сможем откачивать нефть. В авиации и ракетостроении эта проблема стоит не менее остро. Если не хватает прочности материала, чтобы он мог выдержать расчетную нагрузку, приходится увеличивать площадь сечения деталей, а значит и их вес. Чтобы оторвать от Земли более тяжелый корабль, нужен более мощный двигатель, который, естественно, сам будет иметь большие габариты и больший вес. Для его работы потребуется больший запас топлива, которое тоже имеет вес и т. д. Одно осложнение вызывает другое, получается замкнутый круг, из которого только один выход — нужны материалы с большей удельной прочностью, с большей прочностью на единицу веса.

## § 2. Упругость и прочность измеряются в километрах!

Если разделить прочность  $\sigma_B$  материала на его удельный вес  $d$ , то полученная величина будет иметь размерность длины:

$$\left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] : \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}^3} \right] = \text{м}.$$

Самыми удобными единицами измерения величины  $\sigma_B/d$  оказались километры. Легко сообразить, что  $\sigma_B/d$  характеризует как раз ту предельную длину нашей колонны, при которой она еще не разрывается под действием собственного веса. Это мера склонности материала к очередному виду «самоубийства».

Во многих случаях для конструкторов важна и другая удельная характеристика — отношение модуля упругости к удельному весу. Если прочность материала очень высока, то он сможет выдержать значительную упругую деформацию, величина которой при заданном расчетном

напряжении определяется модулем упругости. Например, усы или тонкие стеклянные нити, как мы знаем, выдерживают относительную упругую деформацию 5—7 %. Но большие упругие деформации в конструкциях часто недопустимы по принципиальным соображениям.

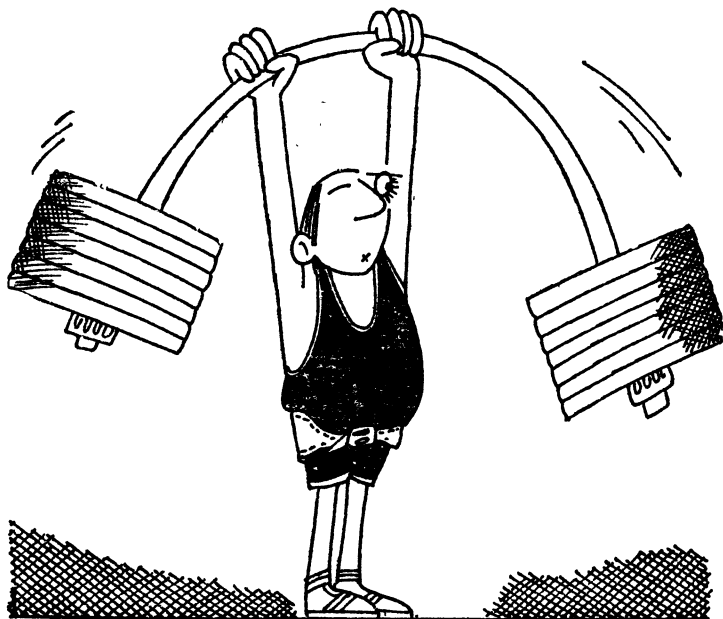


Рис. 105.

Конструкция теряет жесткость. Это хорошо видно из рис. 105: такую штангу трудно поднять даже очень сильному атлету.

### § 3. Предпосылки для композитора

Моцарт:

он же гений.

Как ты да я. А гений и злодейство —

Две вещи несовместные. Не правда ль?

*А. С. Пушкин, «Моцарт и Сальери»*

Чем же может руководствоваться композитор, сочиняющий свои произведения в области материалов? Поле деятельности здесь огромно. Взяв любой справочник по материалам, мы убедимся, что все вместе

они охватывают колоссальный диапазон свойств. Среди металлов, захвативших более 2/3 таблицы Менделеева, есть такие, которые плавятся при температурах ниже  $0^{\circ}\text{C}$  и выше  $3000^{\circ}\text{C}$ , которые имеют модуль упругости около  $5 \cdot 10^3$  и более  $5 \cdot 10^5$  МПа и, соответственно, на 2 порядка различающуюся теоретическую прочность. Еще богаче разнообразие свойств в оставшейся трети системы элементов. А какое множество химических соединений существует в природе или может быть получено в искусственных условиях. И каждое из них со своим диапазоном свойств.



Рис. 106.

Так что выбор материалов для композиций очень богат. Задача лишь в том, чтобы совместить несовместимое, чтобы заставить работать вместе «гений и злодейство», «лед и пламень» — материалы с резко различающимися свойствами.

Распространенный пример композиционного материала — железобетон. Известно, что бетон плохо рабо-

тает на растяжение (он хрупок), а при сжатии может выдерживать большие напряжения. Если сделать из бетона фундамент, то все будет в порядке. Но строительные конструкции часто несут изгибающие нагрузки; при этом внешние слои деталей растягиваются. Если при изготовлении железобетона предварительно растянуть стальные армирующие стержни, то после застывания и снятия внешней силы бетон будет препятствовать упругому сжатию арматуры.

В результате в стальной части композиции будут действовать растягивающие остаточные напряжения, а в бетонной части — сжимающие. Эти остаточные напряжения действуют совместно с напряжениями от рабочих нагрузок при эксплуатации материала. Значит, теперь балка сможет выдержать большую изгибающую нагрузку. Ее можно спокойно увеличивать до тех пор, пока растягивающее напряжение во внешних слоях не превысит остаточного сжимающего напряжения в бетоне. Стали же дополнительные растягивающие напряжения не страшны.

Чаще при создании композиционных материалов используется другой принцип. Обычно композиционные материалы представляют собой мягкую пластичную матрицу, в которой размещены волокна или слои прочного и, чаще всего, более хрупкого материала. Эксперименты показывают, что прочность пучка параллельных волокон обычно ниже средней прочности отдельного волокна. Причина этого — в неоднородности распределения напряжений в пучке. Небольшое различие в длине волокон сразу вызовет разлад в их совместной работе. Более короткие выйдут из строя первыми, когда напряжение в более длинных будет еще довольно низким. Когда придет черед длинных, часть волокон уже будет разорвана, значит, им нужно будет принимать на себя большие напряжения.

Если же поместить волокна в пластичной матрице, то она будет играть роль посредника, равномерно распределяя нагрузку между прочными волокнами. Здесь, конечно, важны соотношения модулей и пределов упругости матрицы и волокон, прочность их связи, объемная доля волокон в композиции.

Интересно в частности, что прочность композиционного материала немонотонно изменяется с ростом доли сечения, занятой прочными волокнами (рис. 107). Когда мы начинаем вводить волокна в матрицу, то ее прочность

вначале снижается. При малой доле волокон они настолько разобщены, что вообще не принимают участия в деформации материала, работает только матрица. Вместе с тем присутствие волокон ослабляет сечение образца — это как бы пустые места, отверстия, не несущие

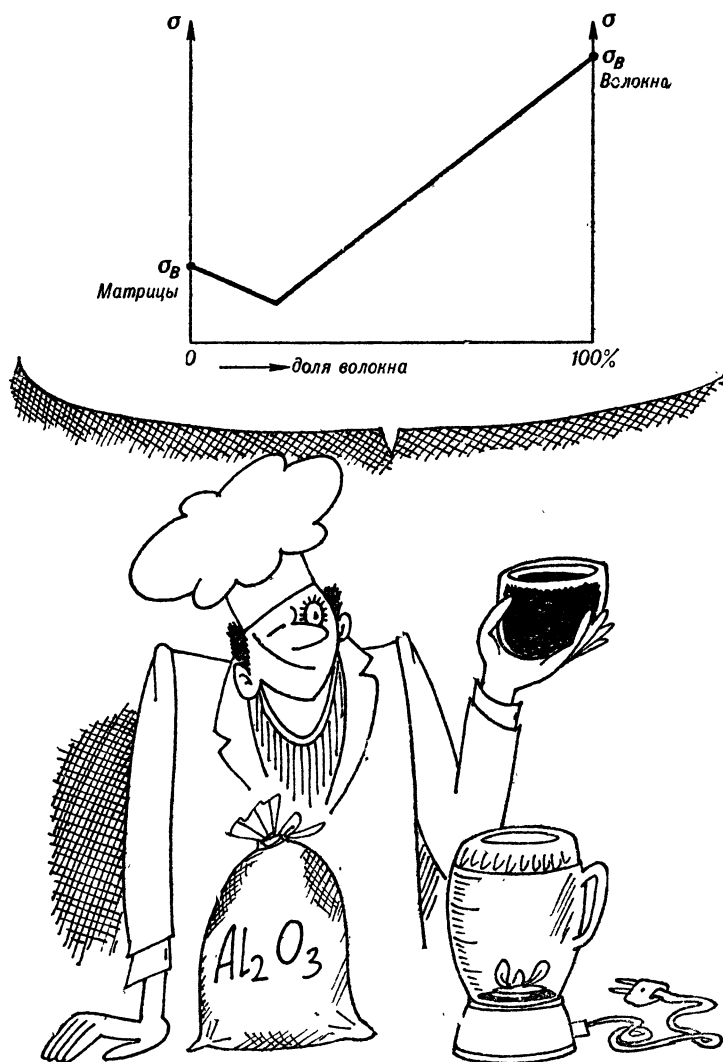


Рис. 107.

нагрузки. И только, начиная с определенного критического содержания волокон в композиции, они принимают на себя роль прочного скелета, а матрица лишь передает напряжения от одного волокна к другому.

Волокна не обязательно должны быть непрерывными. Существует понятие критической длины волокон. Если она не меньше определенной величины, то композиционный материал лишь незначительно уступает по прочности композиции с непрерывными волокнами.

При создании композиционных материалов возникает много других проблем чисто научного характера, но главная трудность — технологическая. Мы не будем сейчас обсуждать вопросы стоимости композиционных материалов, производительности агрегатов, выращивающих «усы» и тонкие волокна для армирования, сложности при их соединении с матрицей и т. д. Скажем лишь, что хотя некоторые виды композиций уже давно используются в технике, и применение этих материалов постоянно расширяется, все же их следует считать пока материалами будущего. По прогнозам специалистов композиционные материалы составят серьезную конкуренцию сталям и другим металлическим сплавам в различных областях машиностроения лишь к концу нашего столетия.

Закончим этот раздел и всю книгу двумя таблицами, иллюстрирующими возможности материалов будущего, и небольшим комментарием к ним. Отнесемся к табл. 2 со вниманием, она позволяет сделать ряд важных выводов.

Во-первых, сталь даже в виде очень тонкой проволоки оказывается в удельном выражении самым непрочным ( $\sigma_B/d$ ) и самым нежестким ( $E/d$ ) материалом из перечисленных. В больших сечениях хорошая конструкционная сталь при том же удельном весе имеет  $\sigma_B \approx 10^3$  МПа, а ультравысокопрочная —  $\sigma_B \approx (2 \div 2,5) \cdot 10^3$  МПа, следовательно,  $\sigma_B/d$  для стальных изделий с площадью сечения несколько квадратных миллиметров и более составит лишь 20—30 км.

Во-вторых, отпущенный природой резерв прочности сталей использован в большей мере, чем у неметаллов. Ведь модуль упругости бора, углерода вдвое выше, чем у стали, а достигнутая пока прочность ( $\sigma_B$ ) — такая же. Если в качестве армирующих волокон в будущем можно будет использовать «усы» этих материалов, то их преимущество еще более возрастет. На-

Таблица 2

## Свойства армирующих материалов

Материал	Диаметр, мм	Удельный вес, $d, \text{H/мм}^3 \cdot 10^3$	Предел прочности, $\sigma_B \cdot 10^{-3}$ МПа	Модуль упругости, $E, \text{МПа} \cdot 10^{-3}$	Удельная прочность, км	Удельный модуль упругости, км
Сталь	50—100	7,9	3,5—4,2	180	40—50	2 300
Оксид алюминия	250	4,0	2,5	250	62	6 400
Карбид кремния	100—150	3,5	2,8	400	80	11 600
Органические волокна	—	1,5	1,4—1,7	77—90	100—125	5100—6000
Бор	50—200	2,4—3,1	3,5	400	130	15 700
Стекло	7	2,5	4,2	82	170	3 200
Графит (углерод)	7	1,95	3—3,5	400	180	20 000

Таблица 3

## Свойства композиционных материалов

Материал	Удельный вес, $d, \text{H/мм}^3 \cdot 10^3$	Предел прочности, $\sigma_B \cdot 10^{-3}$ МПа	Модуль упругости, $E, \text{МПа} \cdot 10^{-3}$	Удельная прочность, км	Удельный модуль упругости, км
Бормагний	2,20	1,2—1,3	220	55—59	10 000
Боралюминий	2,65	1,6	260	60	9 800
Боропластик	2,02	1,4	210	69	10 400
Стеклопластик	2,08	1,7	35	81	1 680
Органоволокнит	1,38	1,1	77	81	5 600
Углепластик	1,58	1,4	140—280	89	8900—17 700

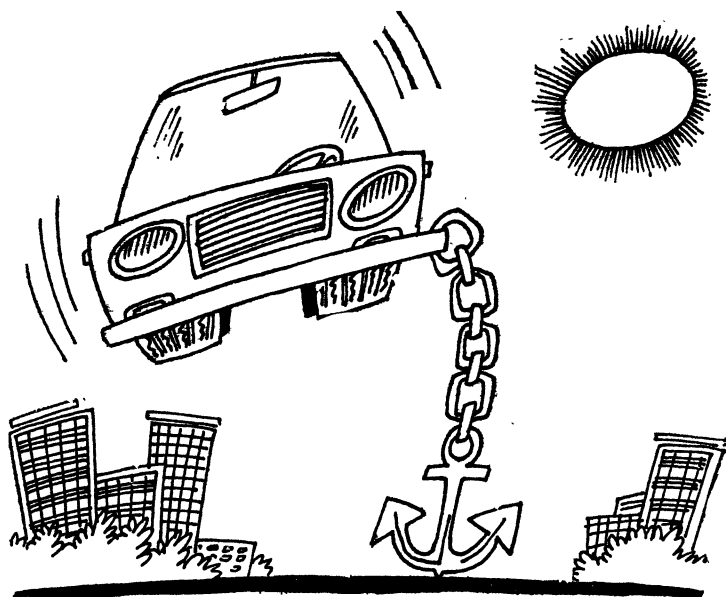


Рис. 108.

пример,  $\sigma_B$  тонких прозрачных «усов» сапфира — окиси алюминия — превышает приведенную в таблице цифру в 15 раз!

Проблема соединения тонких и сравнительно коротких «усов» в единый композиционный материал сложнее, чем создание композиций из непрерывных тонких волокон. Набор таких непрерывных волокон пропитывается тем или иным связующим веществом — и композиция готова. Наиболее распространенные сейчас композиционные материалы состоят из стеклянных, органических, угольных или борных нитей в полимерной матрице. Наполнители (полиэфирные смолы и др.) должны быть легкими и по возможности прочно соединять арматуру в единое целое. Есть композиции и на основе металлических матриц. Свойства некоторых из современных композиционных материалов приведены в табл. 3.

Видно, что попытка «впрячь в одну телегу» различные по свойствам материалы уже сейчас увенчалась большим успехом. Удельная прочность самой лучшей стали превышена в 2—3 раза, удельная жесткость — в 3—5 раз.



Из боро- и углепластиков изготавливают отдельные детали самолетов и ракет, спортивный инвентарь — несомые велосипеды, теннисные ракетки, хоккейные клюшки — многое другое. «Автомобиль будущего», целиком изготовленный из композиционных материалов, станет легче на одну треть. Корпус «самолета будущего» тоже станет легче на 30 %, что позволит снизить вес двигателей и горючего, а полезную нагрузку увеличить втрое.

В заключение отметим, что композиционные материалы уже побывали на Луне. Потолок кабины экипажа лунного модуля был изготовлен из стеклопластика на основе кремнийорганической смолы, а лестница и площадка для входа и выхода космонавтов — из эпоксидных стеклопластиков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Итак, подошел к концу наш рассказ о самых обычных и самых необычных свойствах обыкновенных металлов. В своих попытках улучшить то или иное свойство металла мы много раз заходили в тупик. Кажется, сама природа не позволяет двигаться дальше, но каждый раз находился какой-нибудь выход из положения. В результате мы узнали, что такое «сверхсвойства» металлов — сверхупругость, сверхпластичность, сверхпрочность, сверхестественная память. Мы узнали, какие интересные возможности сулит использование этих «сверхсвойств» и какие из этих возможностей уже реализованы. Одни и те же металлы среди других металлов в каком-то отношении могут быть Гуливерами в стране лилипутов, а в каком-то другом — карликами среди великанов. Если представить все разнообразие возможных свойств металлов и сплавов на одной диаграмме деформации, то такая диаграмма при соблюдении масштаба не поместится ни в одной книге.

Однако и здесь есть выход: отложим на осях логарифмы напряжения и деформации (рис. 109). Логарифмирование сжимает масштаб по осям — каждое деление теперь соответствует изменению напряжения и деформации в 10 раз. Металлические «усы» (1) обладают сверхпрочностью, так как они имеют гладкую поверхность, малое сечение и практически не содержат дислокаций. По этой же причине они не способны к пластической деформации, и их предел упругости совпадает с пределом прочности. В результате их деформация вплоть до разрушения остается чисто упругой и достигает нескольких процентов. В этих отношениях они, конечно, выглядят «суперменами» по сравнению с обычными поликристаллическими металлами и сплавами, самые прочные из которых имеют  $\sigma_{\text{упр}} \approx 10^3$  МПа, и  $\sigma_B \approx (2 \div 3) \cdot 10^3$  МПа при остаточном удлинении  $\epsilon_p$  меньше 10 % (2), а самые пластичные —  $\sigma_B$  не более  $(2 \div 3) \cdot 10^2$  МПа, а  $\epsilon_p \approx 50$  % (3). Предельная упругая деформация таких

металлов — доли процента. Но и среди них есть свои гиганты (4) — сплавы, проявляющие сверхупругость ( $\epsilon_{\text{макс}}^{\text{упр}} \geq 10\%$ ), которые обладают, кроме того, колоссальным внутренним трением («немые» сплавы). Эти же сплавы могут запоминать форму, т. е. самопроизвольно деформироваться при нагреве в обратном направлении, причем объем их памяти также огромен ( $\epsilon \geq 10\%$ ).

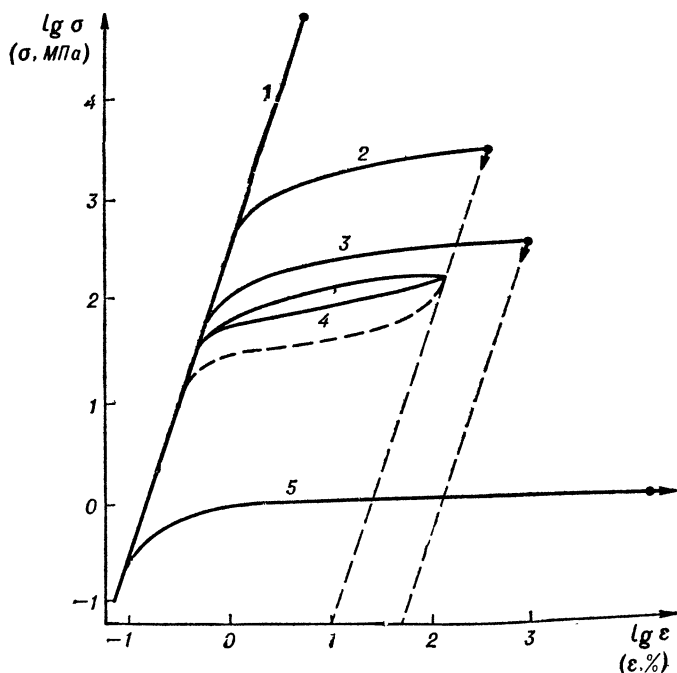


Рис. 109.

Даже самые пластичные из обычных металлов не более, чем карлики, по сравнению с теми же металлами в сверхпластичном состоянии (5): пластичность увеличивается примерно на 2 порядка и составляет тысячи процентов. Эти огромные деформации можно получить при напряжении, составляющем сотые доли от прочности обычных металлов и тысячные доли — от прочности усов.

Таким образом, резервы свойств металлических материалов необычайно разнообразны и велики. В аморфном состоянии они могут приближаться по прочности

к «усам», обладают великолепной коррозионной стойкостью и другими ценными качествами. В составе матриц композиционных материалов металлы могут успешно работать при температурах, приближающихся к температуре плавления.

Весьма разнообразные сверхсвойства металлов можно использовать и в самых разных сочетаниях друг с другом. Например, аморфными металлами можно армировать легкую и пластичную матрицу, а применение сверхпластичных металлических матриц позволяет решить ряд сложных технических вопросов при приготовлении композиционных материалов с прочными, но хрупкими волокнами бора или углерода. Совместное использование эффектов сверхупругости и запоминания формы открывает новые возможности в технике, медицине и т. д.

Во многих из тех явлений, о которых шла речь в этой книге, сегодня еще много неясного. Ясно лишь одно — будущее за «сверхметаллами», так как обычные металлы работают сейчас на пределе своих возможностей.

Поскольку в исследовании и в использовании необычных свойств обычных металлов последнее слово еще не сказано, нам остается надеяться, что его произнесет кто-то из наших молодых читателей.



*Владимир Александрович Займовский*  
*Татьяна Леонидовна Колупаева*

**НЕОБЫЧНЫЕ СВОЙСТВА  
ОБЫЧНЫХ МЕТАЛЛОВ**

---

(Серия: Библиотечка «Квант»)

Редактор *Л. А. Панюшкина*  
Технический редактор *Е. В. Морозова*  
Корректор *Л. С. Сомова*

ИБ № 12529

Сдано в набор 05.09.83. Подписано к печати 02.04.84. Т-07985. Формат 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага книжно-журнальная. Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,5. Уч.-изд. л. 10,01. Тираж 120 000 экз. Заказ № 1094. Цена 30 коп.

Издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы  
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.

30 коп.

---