

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ  
БИБЛИОТЕКА



Ю.М. БОГДАНОВ

# Наука о прочности



НАУЧНО — ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА  
ВЫПУСК 77

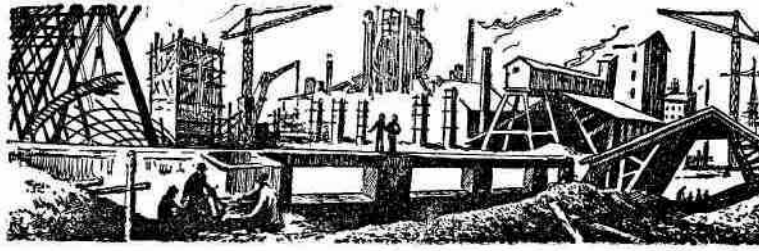
**Ю. М. БОГДАНОВ**

# **НАУКА О ПРОЧНОСТИ**

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1957



## ВВЕДЕНИЕ

О этой книжке рассказывается об основах науки о прочности — науки о сопротивлении материалов. Эта наука помогает учёным и инженерам создавать выносливые, прочные и лёгкие машины и сооружения. Законами науки о сопротивлении материалов руководствуются в своей работе конструкторы всех отраслей народного хозяйства.

XX съезд нашей партии поставил перед советскими машиностроителями задачу создавать новые машины не только хорошего качества, но и более лёгкого веса. Снижение веса машин даёт стране большую экономию металла. В то же время это делает машины более экономичными и производительными. Например, если автомобиль сделать легче, он перевезёт больше полезного груза.

Снижение веса нужно сочетать с улучшением качества машин. Однако решить эту задачу не так просто. Одним из важнейших качеств всякой машины является прочность. Можно детали машин делать достаточно массивными. Но тогда машина получится тяжёлой, громоздкой и будет хуже работать. Вот почему на протяжении всей истории развития машиностроения идёт борьба за создание лёгких и надёжных станков, двигателей, паровозов и других машин. Оружием в этой борьбе и служит наука о сопротивлении материалов.

Поучительна история создания стрелы шагающего экскаватора. Стрела длиной в 65 метров должна нести на конце тяжёлый ковш, вес которого вместе с грунтом составляет около 45 тонн. Расчёты показали, что при столь большой длине и грузоподъёмности вес стрелы должен быть не менее 90 тонн. Такая тяжесть может опрокинуть экскаватор.

Для увеличения устойчивости экскаватора нужен какой-нибудь противовес. Но это значительно утяжелило бы машину. Требовалось создать более лёгкую и прочную стрелу. Используя законы сопротивления материалов, инженеры Уралмаша разработали оригинальную конструкцию стрелы весом в 60 тонн. Выигрыш в весе, кроме экономии металла, сделал машину более подвижной и производительной.

Чтобы выяснить законы, управляющие поведением стали в стреле экскаватора, кирпича в стене здания, бетона в арках моста, необходимо изучить свойства этих материалов. Существует очень много строительных материалов. В нашей небольшой книжке невозможно описать все их свойства. Поэтому мы ограничимся лишь знакомством с некоторыми свойствами металлов. Мы расскажем только самое необходимое для того, чтобы понять, как ведёт себя металл, когда при работе машин и сооружений на него действуют различные силы.

## 1. ПУТЕШЕСТВИЕ ВНУТРЬ МЕТАЛЛА

На поверхности металла с помощью специального микроскопа можно увидеть плотно прилегающие друг к другу мельчайшие зёрна разнообразной формы и размеров. Что это за зёрна? Каковы их свойства?

Раскрыть природу металла помогают рентгеновы лучи — электромагнитные колебания с ничтожно малой длиной волны.

Проходя через различные среды, рентгеновы лучи, подобно свету, могут преломляться, поглощаться и отражаться. Они способны проходить сквозь тела, преграждающие путь

обычному свету.

Положим на фотоплёнку небольшую металлическую пластинку. Сверху на пластинку направим параллельный пучок рентгеновых лучей. Эти лучи, проникнув в толщу металла, рассеиваются атомами вещества и попадают на фотографическую плёнку.

Если бы атомы в металлической пластинке располагались беспорядочно, то и рассеяние рентгеновых лучей было бы подобно рассеянию света, прошедшего через матовое стекло. Однако на проявленной фотоплёнке видно, что лучи, прошедшие через металл, нарисовали чёткую картину. Это говорит о том, что атомы в зёрнах располагаются не хаотично, а в строгом порядке на определённых расстояниях друг от друга.

Упорядоченное расположение атомов характерно для кристаллов, поэтому зёрна, видимые под микроскопом, представляют собой кристаллы, а металлы являются кристаллическими веществами.

## 2. ПОЧЕМУ НЕ РАССЫПАЮТСЯ ТВЁРДЫЕ ТЕЛА

Почему твёрдые тела не рассыпаются? Почему атомы внутри кристалла располагаются на определённых расстояниях друг от друга? Объясняется это тем, что между атомами в кристаллах действуют силы взаимного притяжения и отталкивания (силы взаимодействия). Стоит лишь немного изменить расстояние между атомами, как - изменится и их взаимодействие.

Частицы в твёрдом теле всегда располагаются на таком расстоянии одна от другой, при котором сила взаимодействия между ними оказывается равной нулю, т. е. сила притяжения и сила отталкивания уравниваются друг друга. Если частицы сблизить, увеличивается сила отталкивания, стремящаяся возратить их в прежнее положение. И наоборот, при попытке отдалить частицы одну от другой увеличится сила притяжения. Силы притяжения и отталкивания между атомами в кристаллах имеют электрическую природу\*.

Согните слегка стальную линейку. Под действием вашей силы она изменит свою форму. В результате расстояния между атомами изменятся, и в кристаллах стали проявятся силы взаимодействия атомов. Сгибая линейку, мы ощущаем, как эти силы сопротивляются изгибу.

Всякое изменение формы и размеров тела, в том числе и изгиб прямой линейки, называется деформацией. При деформации тело испытывает действие двух сил — внутренних и внешних. Внутренними называются междуатомные силы, проявляющиеся при деформации. А силы, например, наших рук, действующие на линейку извне, называются внешними. Все твёрдые тела под действием внешних сил в той или иной степени изменяют свою форму. Деформация твёрдых тел встречается на каждом шагу. Например, растягиваются, хотя и незаметно для невооружённого глаза, тросы подъёмника под тяжестью груза. Сжимаются шатуны автомобильного двигателя под давлением газов, толкающих поршень. Кирпичи в стенке сжимаются под тяжестью вышележащих частей здания. Давление прессы сдвигает слои металла в стальной ленте. Под напором воды, вращающей рабочее колесо турбины, скручиваются вал гидрогенератора и карданный вал, передающий мощность

---

\* Подробнее об этом см. научно-популярную брошюру Гостехнздата проф. А. И. Китайгородского «Кристаллы».

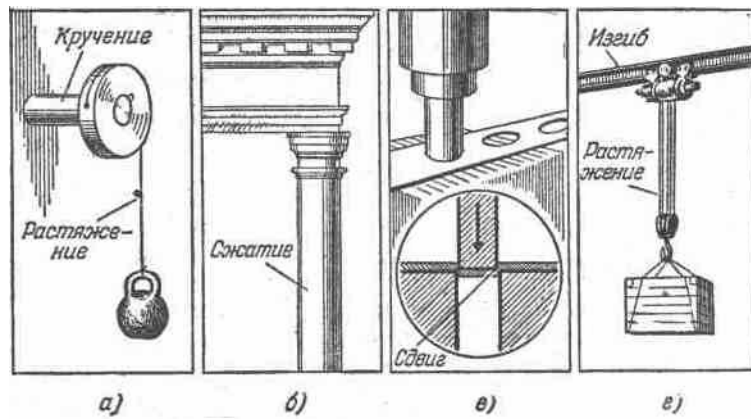


Рис. 1. Простейшие виды деформации.

двигателя ведущим колёсам автомобиля. Изгибаются рессоры грузовика под действием веса автомобиля и лежащего в кузове груза. Под давлением резца изгибается вал при обточке его на токарном станке.

Детали машин и сооружений подвергаются самым разнообразным, подчас очень сложным деформациям. Но подобно тому, как любое число, можно написать, пользуясь различными сочетаниями десяти цифр, так и самое сложное изменение формы тела можно представить себе как сумму нескольких простых деформаций. Простыми деформациями являются: растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб (рис. 1). Всякая простая деформация представляет собой то или иное сочетание двух основных деформаций: линейного удлинения или укорочения и углового сдвига. В этом можно убедиться на простом опыте.

Возьмём полоску резины и нанесём на неё несколько точек (рис. 2, вверху). Растянем полоску. Образованный точками квадрат превратился в прямоугольник (рис. 2, внизу). Это произошло потому, что в продольном направлении материал испытывает удлинение, а в поперечном — укорочение.

Обратите теперь внимание на два наклонных ряда, отмеченных буквами АБ и ВГ. До деформации точки этих рядов располагались, как видно из рисунка, в шахматном порядке.

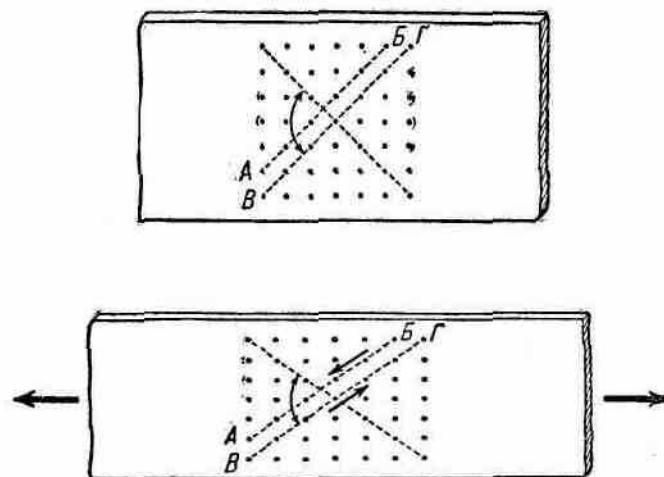


Рис. 2. Растяжение полосы вызывает удлинение в продольной направлении, укорочение в поперечном и деформацию сдвига по наклонным направлениям. О наличии деформации сдвига свидетельствует превращение прямого угла в острый.

Растяжение нарушило этот порядок: ряды сдвинулись один относительно другого в направлении, указанном на нижнем рисунке стрелками.

На верхнем рисунке видно, что угол между диагоналями квадрата прямой. После деформации он превратился в острый. По изменению этого угла судят о величине деформации сдвига. Чем больше сдвиг, тем сильнее меняется угол. Заметим, что прямые углы между горизонтальными и вертикальными рядами при деформации не изменились, потому что ни в продольном, ни в поперечном направлениях сдвига нет.

Независимо от того, как деформируется деталь машины или сооружения — скручивается

она или растягивается, сжимается или изгибается,— материал детали будет испытывать не только удлинения или укорочения, но и сдвиги. Эти две основные деформации всегда сопутствуют друг другу.

### 3. КАК ИЗМЕРИТЬ ВНУТРЕННИЕ СИЛЫ

Внутренние силы — неизменные спутники всякой деформации, вызванной воздействием внешних сил на твёрдое тело.

Мы уже знаем, что внутренние силы — это силы взаимодействия между атомами материала. Как измерить эти силы? Неужели придётся вычислять или измерять силы взаимодействия каждого атома с его многочисленными соседями?

Нет. Определить величину внутренних сил нам помогут знание основных законов механики и результаты простых опытов, часть которых читатель без труда может проделать сам.

Решим одну из простейших задач по определению внутренних сил. Подобные задачи часто встречаются в инженерной практике. Почти на каждой многоэтажной стройке можно увидеть башенные краны, поднимающие на высоту нескольких этажей контейнеры с кирпичом, балки и плиты перекрытий и другие грузы. Вот на опущенный почти до земли крюк крана надета петля, охватывающая железобетонную плиту весом в 2 тонны. Взмах флажка — и груз, повиснув на стальных канатах, плавно поднимается вверх. Вес плиты растягивает, деформирует канаты.

Нетрудно измерить внутренние силы и канатах, разрезав их поперёк и соединив отсечённые части посредством динамометров (рис. 3). Стрелка динамометра укажет величину внутренней силы в месте разрыва каната. Но разрезать канат не обязательно, мы можем ограничиться тем, что рассечём его мысленно. Теперь воспользуемся одним из основных законов механики, который гласит, что силы, действующие на тело, находящееся в покое или в равномерном поступательном движении, находятся в равновесии. Применим этот закон к той части каната, которая лежит ниже сечения.

Плита оттягивает канат с силой 2 тонны. Эта сила уравнивается внутренними силами в правой и левой ветвях каната. Легко сообразить, что внутренние силы в правой и левой ветвях каната одинаковы: в противном случае канат начал бы скользить в блоке крюка. Следовательно, в каждой ветви каната существует внутренняя сила, равная половине веса плиты, т. е. 1000 кг, и направленная вверх.

Используя закон равновесия сил, можно определить внутренние силы в различных частях машин или сооружений, подвергающихся самым разнообразным нагрузкам.

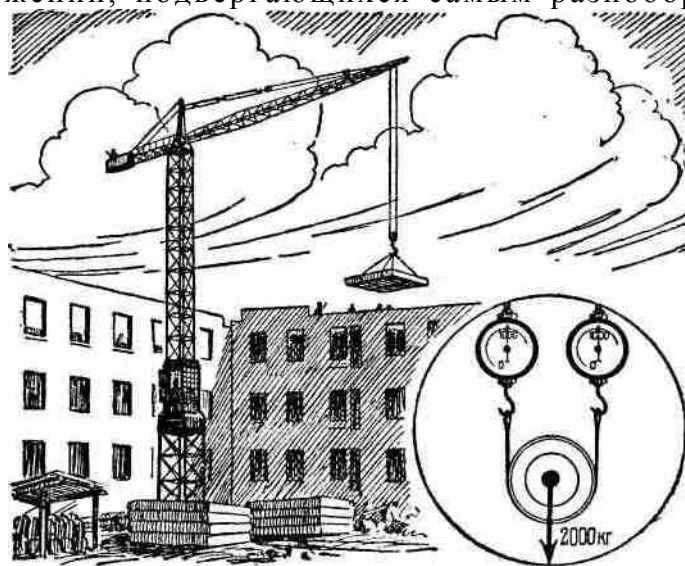


Рис. 3. При подъёме груза весом 2000 кг в поперечных сечениях каждой ветви каната возникает внутренняя сила в 1000 кг.

Описанный способ прост, но он не всегда оказывается достаточным. Наука о прочности — сопротивление материалов — даёт в руки инженеров ряд других способов решения, о которых в силу их сложности мы здесь рассказывать не будем.

Определив величину внутренних сил, надо ещё установить, не окажутся ли они разрушительными для материала. Без этого нет уверенности в надёжности машины или сооружения.

#### 4. МЕРА ИНТЕНСИВНОСТИ ВНУТРЕННЕЙ СИЛЫ

Мы уже выяснили, что внутренняя сила складывается из сил взаимодействия бесчисленного множества атомов. Следовательно, по своей природе внутренняя сила есть сила распределённая, подобно силе давления пара на поршень машины.

Но на этом сходство между внутренней силой и давлением кончается. Давление пара на поршень одинаково на любом участке его поверхности. Внутренняя же сила, как мы увидим



Рис. 4. Нормальные и касательные напряжения.

в дальнейшем, наоборот, может распределяться по сечению самым различным образом в зависимости от характера деформации (растяжение, кручение, изгиб и др.). Для оценки распределения внутренней силы надо иметь меру «плотности распределения», т. е. интенсивности этой силы.

Меру интенсивности внутренней силы называют напряжением. Иначе говоря, напряжением называется величина внутренней силы, которая приходится на единицу площади сечения.

Как известно, силу можно измерять килограммами, а площадь — квадратными сантиметрами. Поэтому напряжение измеряется количеством килограммов, распределённых на одном квадратном сантиметре поверхности.

Величину напряжения можно установить на основе знания величины внутренних сил, площади сечения и характера распределения напряжений.

Так же как внешние и внутренние силы, напряжения различаются по величине и направлению.

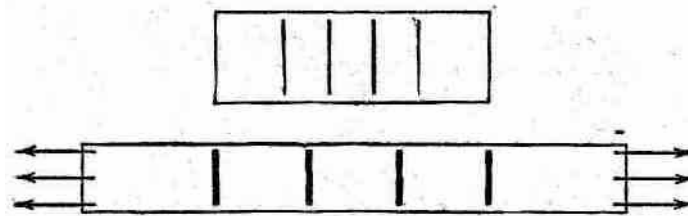
Напряжение, направленное перпендикулярно к плоскости сечения (под углом  $90^\circ$ ), называют нормальным\* напряжением. Если же направление напряжения лежит в плоскости сечения, т. е. угол равен нулю, то напряжение называется касательным. Нормальное напряжение — неразлучный спутник деформации удлинения или укорочения. Касательное напряжение появляется там, где существует деформация сдвига (рис. 4).

Конструктору очень важно знать, какие напряжения возникнут в деталях будущей машины или сооружения от нагрузок, которым подвергнутся эти детали. В нашем примерном

---

\* Слово «нормальный» часто используется математиками вместо слова «перпендикулярный». Значение обоих слов одинаково.





Ряс. 5. Деформация растяжения.

расчёте мы установили величину и направление внутренней силы в поперечном сечении каната подъёмного крана (см. рис. 3). Но мы ещё не определили, какие напряжения будет испытывать сталь каната. Для того чтобы узнать это, проделаем простой опыт."

Возьмём резиновую пластинку и начертим на ней ряд поперечных линий на равных расстояниях (рис. 5). Растянув резину, мы увидим, что расстояния между линиями увеличились, но линии остались поперечными и прямыми, как и прежде. Это означает, что все продольные волокна на поверхности резины удлиняются одинаково. Естественно предположить, что и во внутренних частях пластинки удлинения всех продольных волокон одинаковы. Отсюда следует, что при растяжении внутренняя сила распределяется по поперечному сечению равномерно, т. е. напряжения во всех точках сечения одинаковы. Нетрудно сообразить, что для определения напряжения в этом случае достаточно разделить внутреннюю силу на площадь сечения, т. е. напряжение в поперечном сечении растянутого каната можно определить, пользуясь простой формулой:

$$\text{напряжение} = \frac{\text{внутренняя сила}}{\text{площадь поперечного сечения}}$$

Предположим, что площадь поперечного сечения каната (см. рис. 3) подъёмного крана 2 см<sup>2</sup>. Тогда

$$\text{напряжение} = \frac{1000 \text{ кг}}{2 \text{ см}^2} = 500 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

По своему направлению это напряжение будет нормальным, т. е. перпендикулярным к сечению.

Эта формула помогает определять напряжения в самых разнообразных деталях машин и сооружений, подвергающихся действию растягивающих и сжимающих внутренних сил. Необходимо только иметь в виду, что при сжатии гибкие (длинные и тонкие) детали могут изогнуться, как изогнётся тонкая линейка, если поставить её вертикально и нажать сверху рукой. При возникновении такого изгиба наша формула уже неприменима.

Мы нашли величину напряжения в поперечном сечении каната. Но эта величина не характеризует ещё прочности каната. Выдержит ли сталь такое напряжение? Может быть, тяжёлая плита окажется для каната непосильной нагрузкой, и он, натянувшись, лопнет, как струна, не успев даже приподнять груз от земли? Может быть, напротив, напряжение 500 кг/см<sup>2</sup> далеко не исчерпает возможностей металла, и следовало бы взять канат потоньше, более дешёвый и лёгкий?

Ответы на эти и многие другие вопросы, возникающие перед конструктором при проектировании, даст знание прочности и некоторых других свойств материалов, из которых будут изготовлены детали машины. Такие сведения получают опытным путём в специальных лабораториях.

## 5. ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Лаборатория, в которой исследуют прочность материалов, несколько напоминает заводской цех. Здесь также расположились рядами различные испытательные машины и приборы. Среди них и мощные гидравлические прессы, развивающие усилия в десятки тонн, и маленькие чувствительные приборы — тензометры, улавливающие деформацию в десятитысячные доли миллиметра, и оптические установки, создающие наглядную картину распределения напряжений в деталях сложной формы.



Разнообразны машины, различны их назначения, но все они помогают решить общую задачу — определить механические свойства материала, те свойства, которые впоследствии будут использованы инженером, проектирующим машину или сооружение.

Важнейшие механические свойства металла определяют испытанием металлического образца на растяжение. Проводят это испытание на специальном прессе. Универсальный, винтовой пресс (рис. 6) применяется сейчас повсеместно. Создание этого прессы — заслуга известного русского исследователя Андрея Григорьевича Гагарина. Сконструированный много лет назад, этот пресс до сих пор считается одной из лучших испытательных машин. С его помощью можно? проверять материал не только на сжатие, но, применив несложные приспособления, также и на растяжение, изгиб, кручение. Например, для растяжения образца служит так называемый реверсор, показанный на рис. 6 в верхнем левом углу.

Включён ток. Электродвигатель вращает массивную гайку прессы. Винт, охватываемый гайкой, опускается и сдавливает реверсор с закреплённым в нем стальным образцом. Испытываемый образец растягивается. Автоматическое устройство записывает усилие, развиваемое прессом, и деформацию образца. На бумажном листе, обёрнутом вокруг насаженного на гайку барабана, перо оставляет кривую, определяющую взаимосвязь усилий и деформаций. Диаграмма, автоматически вычерчиваемая во время опыта, называется диаграммой растяжения. Чем больше растяжение, тем больше поворот барабана, чем больше сила, развиваемая прессом, тем выше подъём пера. Таким образом, перо, перемещаясь вверх и вниз, оставляет на бумажной ленте кривую, которая точно фиксирует непрерывное изменение напряжений и деформаций, происходящее во время опыта.

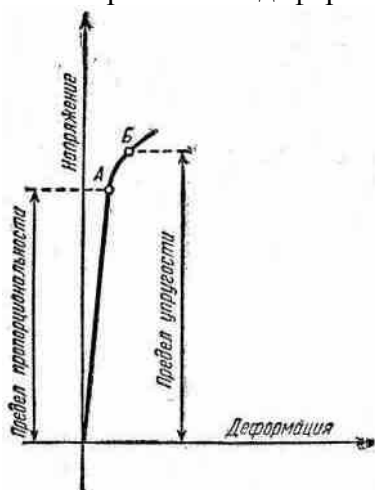


Рис. 7. Предел пропорциональности и предел упругости на диаграмме растяжения.

Эта закономерность и отражается ползущей вверх прямой линией диаграммы. Растёт нагрузка, и пропорционально ей увеличивается деформация.

Но вдруг картина меняется. Линия в точке А начинает искривляться. Это — сигнал о

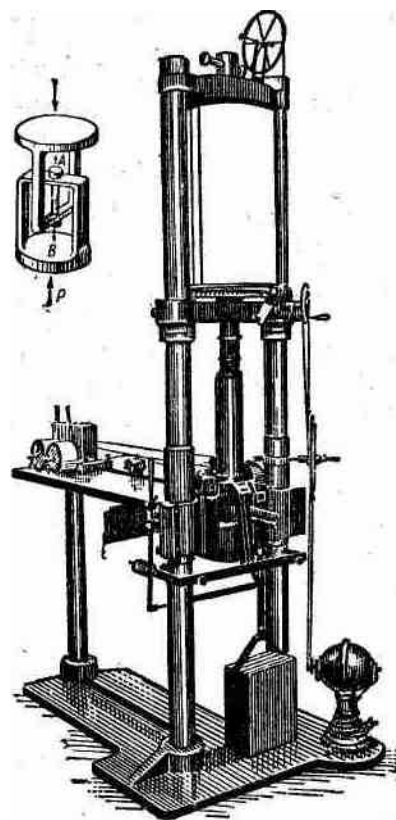


Рис. 6. Универсальный винтовой пресс Гагарина. В кружке—образец в реверсоре.

Прямая, которую вы видите на рис. 7, и показывает, что напряжение растёт пропорционально деформации. Чем больше деформация, тем больше и напряжение. И наоборот, с увеличением напряжения, с увеличением нагрузки, соответственно возрастает и деформация. Понятно, что величины деформации и напряжения в материале тесно связаны друг с другом.

Посмотрим на кривую, вычерчиваемую в процессе опыта. Растёт деформация, и вместе с ней увеличивается напряжение в металле. Барабан еще совсем немного повернулся, а перо уже поднялось почти до половины высоты бумажной ленты, вычертив на ней прямую, круто идущую вверх.

Поясним это на примере". Токарь обтачивает вал, и под давлением резца деталь прогибается. Станочник увеличивает подачу, и давление инструмента на деталь растёт. Вот давление увеличилось вдвое, прогиб вала возрос также вдвое. Давление утроилось, и в такой же мере увеличился прогиб.

нарушении пропорциональности между усилиями и деформациями. Напряжение, при котором теряет силу закон пропорциональности деформаций и напряжений, называют пределом пропорциональности. У разных материалов его величина различна.

До тех пор, пока напряжение не превышает предела пропорциональности, отношение напряжения к относительному удлинению\* остаётся постоянным. Это постоянное отношение называется модулем упругости материала.

Модуль упругости — очень важная характеристика материала, она показывает его жёсткость, т. е. способность материала противостоять деформирующему действию нагрузок. Чем больше модуль упругости, тем жёстче материал. Поясним это на двух металлах — стали и меди.

Испытывая сталь и медь, можно заметить, что при одинаковых напряжениях относительное удлинение стального стержня будет вдвое меньше, чем медного. Это означает, что сталь труднее поддаётся деформации, что она жёстче меди. И действительно, модуль упругости стали приблизительно вдвое больше модуля упругости меди. Сталь — очень жёсткий материал. Даже когда напряжение уже достигло предела пропорциональности, удлинение образца всё ещё остаётся ничтожно малым, совершенно незаметным для глаза.

## 6. ЛЕЗВИЕ БРИТВЫ И КОМОК СЫРОЙ ГЛИНЫ

Если прекратить испытание в тот момент, когда напряжение в металле достигло предела пропорциональности, и освободить образец, он примет свои первоначальные размеры, — удлинение исчезнет.

Деформация, исчезающая после снятия нагрузки, называется упругой деформацией, а способность тел восстанавливать свою первоначальную форму после прекращения действия деформирующих сил называют упругостью.

Это ценное качество металла широко используется в технике. Работа всевозможных пружин, рессор и многих других деталей основана на упругости тел.

По своей природе упругая деформация металла представляет собой временное искажение его кристаллических решёток. Как только внешние нагрузки, вызвавшие деформацию, прекратились, силы взаимодействия атомов тотчас же восстанавливают первоначальные очертания кристаллических решёток и упругое тело принимает свою первоначальную форму.

Упругость свойственна всем материалам. Но степень упругости каждого из них различна. Стремительно разгибается лезвие безопасной бритвы: оно изготовлено из упругой стали. Иные свойства имеет, например, глина. Комок сырой глины на первый взгляд кажется лишённым упругих свойств. Однако на самом деле это не так. Глина обладает упругостью, хотя и очень малой.

В природе нет материалов как абсолютно упругих, так и совершенно неупругих. Например, стальной прут упруг, пока мы сгибаем его с небольшой силой. Но, увеличивая изгиб всё сильнее и сильнее, мы скоро заметим, что прут уже не распрямляется полностью, а остаётся немного согнутым.

Значит, некоторая деформация остаётся и после прекращения действия внешних сил. Этот вид деформации называют остаточной или пластической деформацией.

Пластическая деформация есть признак того, что напряжения в металле под действием нагрузки превысили величину, называемую пределом упругости. Состояние материала при пределе упругости мы отметим на диаграмме точкой Б (см. рис. 7).

Во время работы машин многие детали их не должны подвергаться сколько-нибудь заметным остаточным деформациям. Конструктор должен сделать так, чтобы напряжения в таких деталях не превышали предела упругости материала.

---

\* Относительным удлинением называют отношение удлинения, возникшего при растяжении образца, к его первоначальной длине. Иными словами, это удлинение, приходящееся на долю каждого сантиметра образца.

Обратим внимание ещё на одно обстоятельство. Усилие прессы растягивает стальной образец, оно воздействует на стержень через захваты реверсора. Один из таких захватов перемещается по мере растяжения образца. Таким образом, видно, что образец деформируется под действием силы, точка приложений которой перемещается. Следовательно, при растяжении образца совершается работа. За счёт этой работы в деформируемом теле накапливается энергия, называемая потенциальной. Слово «потенция» в переводе с латинского языка означает «возможность». Иначе говоря, потенциальная энергия скрыта в теле и может проявиться при известных условиях, переходя в другие виды энергии.

В самом деле, когда действие силы прекращается и тело начинает восстанавливать свою форму, оно расходует накопленную потенциальную энергию, производя ту или иную работу

Рассмотрим простой пример. Мы заводим часы, совершая при этом работу, без которой невозможно деформировать пружину. Производимая нами работа накапливается в пружине в виде потенциальной энергии. Заведённые часы идут больше суток. В это время пружина отдаёт свои запасы энергии. Потенциальная энергия пружины расходуется на преодоление трения в часовом механизме. Одновременно пружина восстанавливает свою форму, которую она имела перед заводом.

Так и любая деталь машины или сооружения при деформации накапливает энергию и расходует её, восстанавливая свою форму.

Пресс продолжает растягивать образец, и автомат записывает все изменения деформации и напряжений. Обратимся снова к диаграмме, вычерчиваемой прибором. Перо прочертило небольшой криволинейный участок и теперь снова прокладывает прямую линию, но на этот раз уже не круто взбегающую вверх, а горизонтальную, отмеченную на диаграмме рис. 8 буквами В и Г.

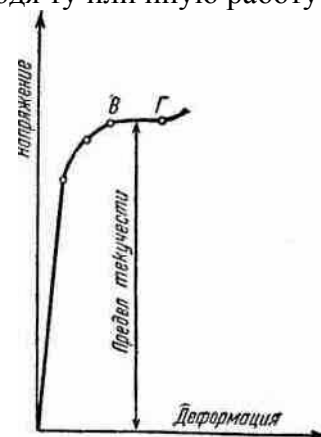


Рис. 8. Предел текучести на диаграмме растяжения.

Наступило состояние материала, называемое текучестью. Напряжение, которое при этом испытывает металл, называется пределом текучести. Сталь как будто потеряла способность противостоять усилию прессы. Материал «течёт», говорят инженеры. Быстро нарастает остаточная (пластическая) деформация, при которой происходят сдвиги слоев атомов в кристаллических зёрнах металла.

В кристаллической решётке каждого металла существуют определённые плоскости, по которым слои атомов сдвигаются легче, чем по другим направлениям. Они называются плоскостями наилегчайшего скольжения. На рис. 9 эти плоскости обозначены пунктирными линиями. Однако, как показано на этом же рисунке справа, не все плоскости наилегчайшего скольжения «работают» при пластической деформации.

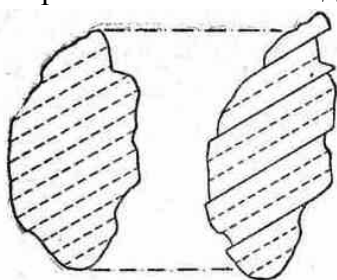


Рис. 9. Пластическая деформация представляет собой сдвиг атомов в кристаллических зёрнах металла.

Дело в том, что ещё при образовании кристалла из расплавленной массы металла строгий порядок расположения атомов в решётке кое-где нарушается, образуются местные сдвиги атомов, слабые точки кристалла. Именно там, где имеются эти «изъяны», в кристаллической решётке и происходят при деформации металла пластические сдвиги.

О том, что пластическая деформация представляет собой сдвиг слоев металла, свидетельствует и внешний вид испытуемого образца. При наступлении текучести его зеркально отполированная поверхность "как будто мутнеет, покрывается сеткой тончайших бороздок. Эти линии, впервые обнаруженные знаменитым русским металлургом Д. К. Черновым, — не что иное, как следы пластических сдвигов в кристаллах, расположенных у поверхности образца.

Появление пластического сдвига ещё не означает разрушения металла. Сдвинувшиеся слои кристаллов ещё прочно сцеплены друг с другом. Металл «потёк», но до разрыва

образца еще далеко.

Пластическая деформация отличается тем, что она нарастает без увеличения вызвавших её нагрузок и, следовательно, без увеличения напряжений, тогда как для нарастания упругой деформации необходимо постоянное увеличение напряжений в металле.

Горизонтальная линия диаграммы - (см. рис. 8) на участке текучести — свидетельство того, что в образце происходит быстрый рост пластической деформации.

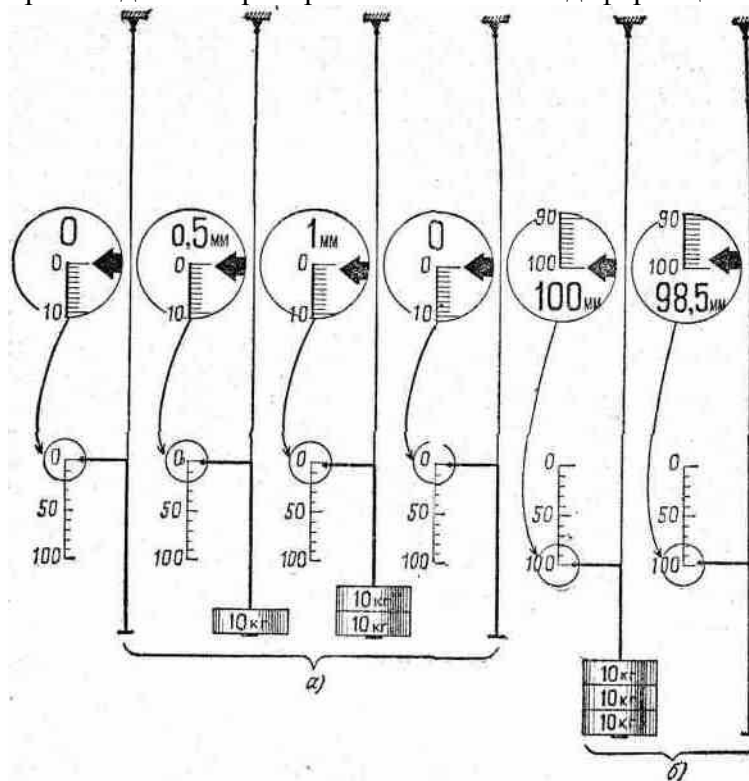


Рис. 10. Упругая и пластическая деформации: а — упругая деформация исчезает после прекращения действия сил; б — упругая деформация сопровождается пластической. В отличие от упругой, пластическая деформация нарастает без увеличения нагрузок и не исчезает после прекращения их действия.

Пластическая деформация, в отличие от упругой, не исчезает и после прекращения действия нагрузки: она остаётся; поэтому её и называют остаточной деформацией.

Простая модель поможет нам выяснить связь и различие между упругой и пластической деформациями. На рис. 10 изображена стальная проволока длиной в 1 м, растягиваемая грузами, которые мы накладываем на площадку. Площадь поперечного сечения проволоки  $1 \text{ мм}^2$ . Положив на площадку гирию 10 кг, мы не заметим на глаз удлинения проволоки, однако с помощью точного прибора нам удалось бы обнаружить, что проволока растянулась примерно на полмиллиметра. Положим ещё одну такую же гирию. Удлинение увеличится до 1 миллиметра. Снимем гири с площадки, и прибор тотчас покажет, что проволока сократилась до своей первоначальной длины — один метр; деформация исчезла. Это была упругая деформация.

Положим теперь на площадку груз 30 кг. Мы легко заметим на глаз, что проволока начала вытягиваться. Удлинение продолжается, хотя мы и не подкладываем больше гири на площадку. Удлинение прекратится, когда проволока, растянется примерно на 100 мм. Когда же мы снимем гири, то не заметим уменьшения длины проволоки; и только тщательное измерение позволит установить, что её длина уменьшилась приблизительно на полтора миллиметра. Осталось удлинение на 98,5 миллиметра. Это — остаточная, пластическая деформация. Итак, величина упругой деформации при нагрузке 30 кг составляла полтора миллиметра; эта деформация исчезла, как только мы сняли нагрузку.

Однако продолжим рассмотрение текучести материала.

Предел текучести, т. е. напряжение, при котором значительно возрастает остаточная деформация, представляет собой очень важный показатель свойств материала. При

испытаниях предел текучести тщательно фиксируют и записывают в «паспорт металла».

Если растягивать образцы из высокоуглеродистой стали, меди и многих других металлов, то на диаграмме нельзя заметить горизонтального участка, говорящего о наступлении текучести. В таких случаях за предел текучести условно принимают напряжение, при котором остаточное удлинение образца составляет 0,2% его первоначальной длины.

Но и для мягкой стали состояние текучести кратковременно. Посмотрите на диаграмму рис. 11. После точки Г перо уже движется вверх. Сталь как будто бы снова обрела способность сопротивляться растяжению. Наступило, как говорят, «упрочнение» металла.

Но теперь дело идёт совсем не так, как в начале испытания. Образец сильно вытягивается, он уже удлинился примерно на одну шестую своего первоначального размера, т. е. в десятки раз больше, чем к началу текучести. А между тем напряжение возросло меньше чем вдвое по сравнению с пределом текучести.

Наблюдая за образцом, легко заметить, что стержень в одном месте начинает сужаться, образуется так называемая «шейка». С появлением шейки прекращается и подъём пера. Достигнув наивысшей точки (на рис. 11 — точка Д), оно начинает постепенно опускаться.

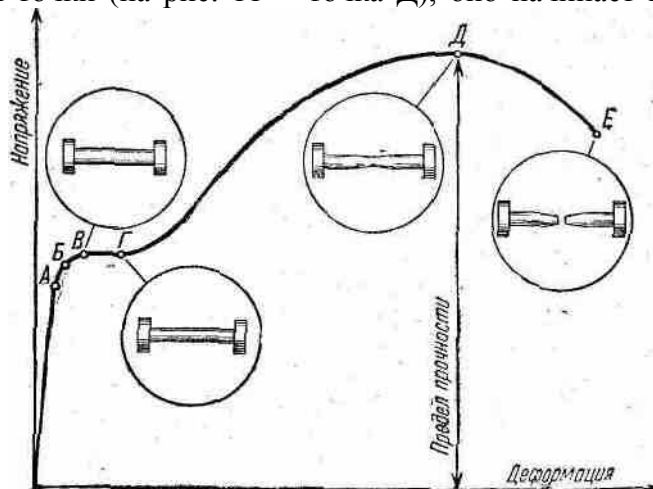


Рис. 11. Предел прочности на диаграмме растяжения.

Линия диаграммы идёт вниз. Падает усилие прессы, растягивающее образец.

Гайка прессы продолжает вращаться. Нарастают пластические сдвиги, шейка постепенно вытягивается, становится всё тоньше и, наконец, разрывается. Сопротивление материала пластическому сдвигу исчерпано. Образец разрушен, испытание окончено.

Наибольшее напряжение в поперечном сечении образца замеченное при испытании, называют пределом прочности материала. Именно эту величину прежде всего учитывает конструктор, выбирая материал для деталей будущей машины. Разумеется, прочность различных материалов далеко не одинакова.

Но отличаются материалы один от другого не только прочностью. Каждый из них под воздействием усилий деформируется и разрушается по-своему, и зависимости от присущих именно ему качеств.

Стальной стержень прежде чем разорваться, сильно вытягивается (для некоторых марок стали удлинение перед разрывом превышает 30%). В основном это удлинение проходит за счет пластической (остаточной) деформации, так как сталь пластична, способна к большим остаточным деформациям. В этом свойстве заключается большая ценность стали.

Пластичность материала — весьма важное свойство, позволяющее наиболее полно использовать его прочность в деталях машин и сооружений. Деталь из пластичной стали при чрезмерном увеличении нагрузки сигнализирует своей постепенной деформацией о приближении момента поломки. Пластичные материалы хорошо противостоят действию ударов, толчков, неизбежных при работе многих машин. Благодаря способности металла к пластической деформации, мы можем его ковать, прокатывать, делать из него трубы и

проволоку, штамповать кузова легковых автомобилей, выполнять сотни других операций обработки.

Чем больше остаточное удлинение, тем пластичнее материал. Но есть материалы, почти неспособные к остаточным деформациям, они непластичны, хрупки. Их разрушение при растяжении происходит не в результате развития пластических сдвигов, а за счёт отрыва частиц материала друг от друга. Растягивая чугунный образец, мы увидим, что он лопнет, не удлинившись и на сотую долю первоначального размера. Чугун, стек-то, камень разрываются внезапно, без заметного удлинения и без образования шейки.

Хрупкость — отрицательное свойство материала. Тем не менее, многие хрупкие материалы находят широкое применение в технике. Чугун, камень, кирпич, бетон хрупки, они легко разрушаются при растяжении или ударе, но зато вполне удовлетворительно работают на сжатие, выдерживая большую нагрузку. Поэтому инженеры, зная свойства различных материалов, умело используют их положительные качества и находят каждому из них целесообразное применение.

Испытание металла на растяжение даёт важнейшие сведения о его прочности и пластичности. Результаты опыта помогают конструктору правильно выбрать наилучший материал для деталей машины или сооружений.

Чтобы создать легкую, и прочную машину, инженеры стремятся возможно полнее использовать прочность материала, заставить металл деталей работать с наибольшим напряжением, не допуская, однако, разрушающего напряжения. Как правило, детали машины не должны подвергаться заметным остаточным деформациям. Чтобы выполнить эти условия, необходимо знать предел прочности, предел текучести и пластичность материалов, из которых будут изготовлены детали машины. Все эти сведения и добываются в лабораториях по изучению прочности.

Испытание материалов на растяжение представляет собой один из видов многочисленных и разнообразных опытов, проводимых в лаборатории прочности. Без этих исследований не создаются машины и сооружения.

Подобно тому, как аэродинамика и гидродинамика, т. е. науки, помогающие строить шлюзы, плотины, корабли и самолёты, не могут обойтись без исследований в аэродинамических трубах, опытных бассейнах и каналах, так и наука о сопротивлении материалов не может развиваться без изучения свойств материалов в лабораториях.

«Как ни совершенно крыло птицы, оно никогда бы не смогло поднять её ввысь, не опираясь на воздух. Факты — это воздух учёного, без них вы никогда не сможете взлететь. Без них наши «теории» — пустые потуги». Эти слова замечательного советского ученого академика И. П. Павлова справедливы для любой области науки. Сопротивление материалов — не исключение из этого правила, и в нём решающее слово принадлежит опыту.

Мы уже говорили о том, что многие хрупкие материалы, плохо сопротивляясь растяжению, способны выдерживать большие сжимающие нагрузки. В лаборатории изучают хрупкие материалы, подвергая их сильному сжатию.

Образцы из хрупких материалов берут для испытания на сжатие в виде кубиков или коротких толстых цилиндров. Допустим, что кубик сделан из бетона. Его кладут под пресс и постепенно увеличивают нагрузку.

Линия на бумажном листе, обёрнутом вокруг барабана, ползёт вверх до тех пор, пока нагрузка не достигнет разрушающей величины. Образец ломается, у него выкрашиваются бока, он становится похож на две пирамиды, обращённые друг к другу вершинами. По-иному ведёт себя под прессом чугунный цилиндр. Он разрушится, рассечённый наклонными трещинами. А цилиндр из мягкой стали не раздробится, а сплющится в лепешку.

Результаты испытания бетона и чугуна на сжатие показывают, что чугун примерно вчетверо, а бетон — в десять раз прочнее при сжатии, чем при растяжении.

Но нередко конструкциям приходится работать одновременно и на сжатие и на растяжение. В этих случаях их часто делают из двух материалов, обладающих требуемыми

свойствами. Например, железобетон представляет собой сочетание стали и бетона. В нем сталь (арматура) отлично противодействует растяжению, а окружающий её бетон — сжатию.

## 7. ПРОЧНОСТЬ ПРОВЕРЯЮТ ПО ТВЕРДОСТИ

В лаборатории изучают ещё одно важное свойство материалов — твёрдость. Так называют способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твёрдого тела. Твёрдость у различных материалов не одинакова. Известно, что сталь твёрже дерева, а алмаз твёрже стекла. Эти и многие другие примеры знакомы каждому из жизненного опыта. Но этих знаний недостаточно, для того чтобы выбрать лучший по твёрдости материал. Надо точно знать величину твёрдости любого из материалов, предназначенных для работы в той или иной машине.

Твёрдость материалов определяют на специальных приборах, снабжённых или стальным закалённым шариком или алмазным конусом (рис. 12). Вдавливая шарик или конус в отшлифованную поверхность проверяемого металла, образуют лунку. По диаметру этой лунки и судят о том, насколько твёрд испытываемый материал. Чем он твёрже, тем меньше размеры лунки.

Опыты показали, что между твёрдостью и прочностью металла существует определённая зависимость. Чем выше твёрдость стали, тем она прочнее. Поэтому для приблизительной оценки прочности металла можно воспользоваться более быстрым и удобным испытанием на твёрдость вместо проверки на растяжение.

Ценность такого испытания понятна. Ведь для того чтобы испытать прочность металла растяжением, нужно иметь образец в виде стержня. А как же быть, если нужно проконтролировать прочность материала уже готовой детали? Вырезать из неё образец металла? Но это значит испортить деталь, сделать её негодной для работы.

Вот тут-то и помогает испытание на твёрдость, при котором деталь не будет испорчена, на поверхности останется только маленькая, еле заметная лунка, не мешающая нормальной

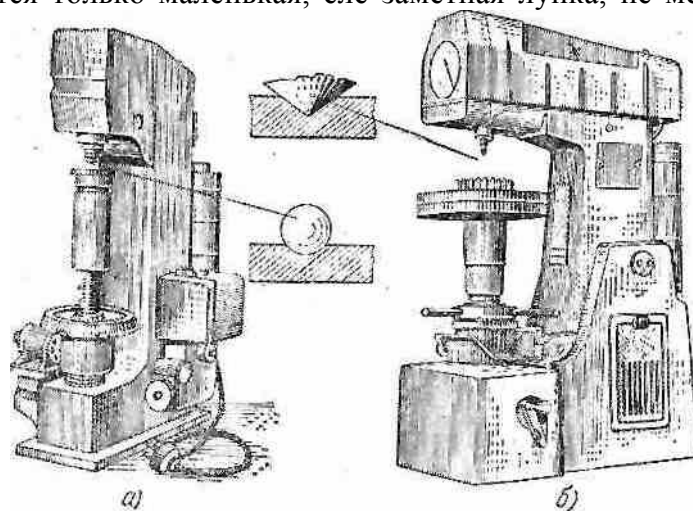


Рис 12, Приборы для определения твёрдости: а—вдавливанием стального шарика, б — вдавливанием алмазного конуса.

работе детали. Больше того. Испытание на твёрдость можно провести даже без разборки машины. Везти детали в лабораторию не обязательно, с помощью переносного прибора проводят измерение твёрдости в цехе, на строительной площадке и т. д.

## 8. НАПРЯЖЕНИЯ МОЖНО «УВИДЕТЬ»

В лаборатории прочности испытывают материалы не только на растяжение, сжатие и твёрдость. Здесь на специальных машинах их скручивают, изгибают, подвергают воздействию ударов и переменных нагрузок и др. Цель всех этих опытов одна — получить наиболее важные сведения о свойствах материалов, об их поведении при различных



деформациях, при воздействии разнообразных видов нагрузок.

И всё же эти испытания материалов не дают конструкторам машин всех необходимых сведений. Например, они не дают ответа на вопросы: какие напряжения испытывает та или иная деталь машины при работе? в каком месте детали возникают наибольшие напряжения? Иногда ответы на эти вопросы можно получить путём расчёта. Но зачастую встречаются такие детали, сложная форма которых не позволяет рассчитать величину возникающих в них напряжений. Поэтому приходится использовать другие пути, помогающие обнаружить напряжения и измерить их величину.

Вспомните, как измеряют силу электрического тока. Никто не считает числа электронов, пробегающих за секунду по проводам. Силу тока измеряют, наблюдая и измеряя его действие — отклонение стрелки амперметра, осаждение металла на пластинках, опущенных в раствор солей, и т. д. Примерно так же поступают и при измерении напряжений.

Мы уже знаем, что деформация — неразлучный спутник напряжения, что она меняется соответственно напряжению, если, конечно, оно не превышает предела пропорциональности. Отсюда следует, что, измерив деформацию, мы измерим и напряжение. Нетрудно измерить деформацию деталей неработающей машины. В лабораториях деформацию измеряют чувствительными приборами — тензометрами. Их укрепляют на испытываемой детали. Рычажный механизм прибора увеличивает ничтожно малую деформацию настолько, что её можно увидеть и измерить. Однако тензометром нельзя измерить деформации деталей работающей машины, например стрелы экскаватора или других движущихся его частей. Тензометр — очень чувствительный прибор и не выдержит толчков и сотрясений движущейся детали.

Как же измерить, например, деформации деталей экскаватора во время его работы?

Ковш шагающего экскаватора наполнен землёй. Машина разворачивается, чтобы откинуть грунт далеко в сторону. Машинист, желая ускорить процесс, делает рывок.

Не опасен ли этот рывок для машины? Не возникнут ли напряжения выше допустимых?

Рывок растягивает, сжимает, изгибает, закручивает детали стрелы. Чтобы измерить напряжения в стреле, к её отдельным деталям прикрепляют тонкие проволочки, по которым пропускают электрический ток. При деформации деталей проволочки вытягиваются или сжимаются, их электрическое сопротивление изменяется. Обнаружить и измерить, даже увидеть и сфотографировать, изменение сопротивления проволочек можно чувствительным прибором — осциллографом. Этот прибор записывает световым лучом на фотоплёнке колебания напряжений в деталях работающего экскаватора. На основании результатов таких испытаний конструкторы создали устройства, обеспечивающие плавный поворот стрелы.

Описанный способ измерения напряжений в деталях работающих машин имеет и свои недостатки. Например, чтобы обнаружить наиболее напряжённое место, приходится деталь «ощупывать» проволочками по многим точкам. На это уходит много времени.

А нельзя ли сразу получить наглядную картину распределения напряжений в детали машины? Оказывается, можно, с помощью оптического метода.

Как же это делают?

Из прозрачной пластмассы изготавливают модель детали, освещают её поляризованным светом и подвергают воздействию таких же внешних сил, какие деталь будет испытывать в машине. Поляризованный свет — это, так сказать, процеженный свет. Сущность поляризации света состоит в следующем. Луч обыкновенного света представляет собой колебания электромагнитных волн во всех направлениях (плоскостях) от центра. Волна же поляризованного света колеблется только в одной плоскости, она проходит как бы через щель, а не через круглое отверстие. Для того чтобы «процедить» свет, его пропускают сквозь кварц, исландский шпат или через фильтр из мелких кристаллов минерала геропатита, взвешенных в желатине. Эти фильтры пропускают только те световые волны, которые колеблются в одной определённой плоскости, а все остальные волны задерживают. Таким образом обычный свет превращается в поляризованный. Если белый поляризованный свет пропустить через прозрачное тело, подвергнутое упругой деформации, он создаст на экране

яркую цветную радужную картину, по которой видно распределение напряжений в материале.

Для исследования напряжений в материале применяют специальные установки, одна из которых показана на рис. 13. В лаборатории выключают свет. Пресс деформирует модель; на неё действуют силы, подобные тем, которые испытывает настоящая деталь в машине. Изображение модели па экране играет всеми цветами радуги, раскрывая распределение возникающих в детали напряжений. Исследователь внимательно следит за переливами

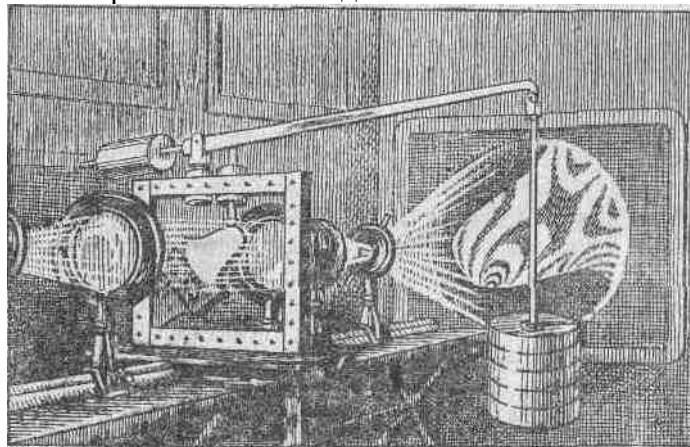


Рис. 13. Установка для исследования напряжений оптическим методом. На экране — изображение напряженной модели с картиной полос.

красок, а когда снова вспыхивает свет, он производит вычисления и определяет, в каких точках детали возникают, опасные напряжения.

## 9. ЗАПАС ПРОЧНОСТИ

Мы уже знаем, что, проектируя машину, конструктор обязан сделать её детали прочными, надёжными и в то же время лёгкими. Чтобы удовлетворить этим противоположным требованиям, надо как можно полнее использовать прочность материалов. Но перенапрягать материал нельзя, так как при чрезмерной деформации машина выйдет из строя.

Как же найти такие напряжения, при которых возможности материала используются достаточно полно и вместе с тем не возникает угрозы для прочности детали?

Для большинства деталей машин и сооружений недопустимы напряжения, при которых возникают заметные остаточные деформации. Нельзя, например, работать на станке, у которого изогнут шпиндель, пускать поезд на мост, стальная ферма которого перекошена. Из этого следует, что напряжение в пластичном материале не должно превышать предела текучести.

На практике детали машин или сооружений зачастую работают в чрезвычайно сложных условиях, которые делают невозможным точный подсчёт нагрузок, действующих на эти детали. Можно ли, например, заранее точно подсчитать все силы, сжимающие, изгибающие и скручивающие колонну стального каркаса высотного дома? Здесь и тяжесть стен и перекрытий, и давление порывистого ветра, и вес снега на крыше и мебели в комнатах. Учесть все нагрузки и точно высчитать напряжения, возникающие от их действия, удаётся далеко не всегда. Поэтому возникает угроза, что напряжения в материале окажутся большими, чем предполагал конструктор, и колонна разрушится. К этому следует ещё добавить, что прочность металла никогда не бывает строго одинаковой.

Учитывая всё это, конструкторы дают каждой детали некоторый запас прочности.

Каким же должен быть запас прочности?

Величину, оценивающую его (так называемый коэффициент запаса) обычно исчисляют, исходя из предела прочности материала и с учётом того, что опасным состоянием для пластичных материалов является наступление текучести. Хрупкие материалы не дают боль-

ших остаточных деформаций вплоть до разрушения, поэтому опасным напряжением для них является предел прочности.

Для деталей из пластичных материалов, работающих под воздействием спокойной нагрузки, например для стальных конструкций перекрытий жилых зданий, заводских цехов и пр., коэффициент запаса обычно принимается примерно 2,5. Это означает, что допускаемое напряжение в детали в два с половиной раза меньше предела прочности.

Поясним это на примере. Проектируется ферма, перекрытия заводского цеха. Её решено изготовить из стали с пределом прочности 3800 кг/см<sup>2</sup>, а коэффициент запаса принят 2,4. Допускаемое напряжение вычисляется по простой формуле:

$$\frac{\text{предел прочности}}{\text{коэффициент запаса}} = \text{допускаемое напряжение,}$$
$$\frac{3800 \text{ кг/см}^2}{2,4} = 1580,3 \text{ кг/см}^2.$$

Напомним, что предел текучести для такой стали равен 2200 кг/см<sup>2</sup>. Значит, принятый запас прочности вполне гарантирует конструкцию от опасных последствий наступления текучести металла.

Иной запас прочности берётся, если детали машины или сооружения при работе подвергаются ударам. Напряжения при ударах могут оказаться значительно больше, чем при действии спокойной нагрузки. Поэтому для деталей машин и сооружений, подверженных при работе ударам, запас прочности берут обычно в полтора-два раза больше, чем для спокойной нагрузки.

Так обстоит дело с выбором запаса прочности для пластичных материалов. Для хрупких материалов (чугун, бетон, кирпич и т. д.) запас прочности обычно значительно увеличивают, так как неоднородное строение этих материалов увеличивает вероятность появления трещин и разрушения.

При спокойной нагрузке для хрупких материалов принимают не менее чем трёхкратный запас прочности, а иногда его доводят и до девятикратного.

Правильно выбрать запас прочности нелегко, но это очень важно экономически. Избыток прочности вызывает перерасход материалов, увеличивает вес машин, снижает их производительность и экономичность и в конечном счете ведёт к бесцельной затрате государственных средств.

Выбирая запас прочности, инженер руководствуется установленными нормами проектирования, в которых указаны величины запасов прочности и допускаемых напряжений для деталей различных машин и сооружений. Однако это не означает, что не нужно стремиться к снижению коэффициентов запаса прочности. Наоборот, используя результаты новейших исследований прочности различных материалов и конструкций, инженеры создают машины и сооружения более легкие и экономичные.

В ранний период развития машиностроения ещё не умели достаточно точно рассчитывать детали машин и сооружений на прочность. Поэтому, стремясь обеспечить надёжность конструкций, брали очень большие запасы прочности. Таким образом, повышенный коэффициент запаса прочности покрывал недостаток знаний в области сопротивления материалов. Оттого он и получил полушутливое, но довольно верное название — «коэффициент незнания».

Успехи науки о сопротивлении материалов вооружили инженеров совершенными приёмами расчётом и способами испытаний материалов, машин и сооружений на прочность, позволили намного снизить коэффициенты запаса прочности.

Приведем только один пример. 40 лет назад при расчёте строительных конструкций инженеры считали для стали марка «Ст. 3» допустимым напряжением не более 1000 кг/см<sup>2</sup>. Сейчас конструкции из стали этой марки, за исключением мостов, рассчитывают по допускаемому напряжению 1600 кг/см<sup>2</sup>. Запас прочности снижен более чем в полтора раза.

Борьба с «коэффициентом незнания» продолжается и сейчас. Каждый новый успех советских учёных в области сопротивления материалов — это удар по «коэффициенту

незнания», это новые возможности уменьшения веса и стоимости машин и сооружений при одновременном повышении их надёжности и долговечности.

Машина существует пока только на бумаге. Ещё никто не видел, как она работает, но конструкторы знают, что машина будет отлично выполнять свои «обязанности», уверены в прочности и надёжности каждой её детали.

Чтобы уяснить себе общие методы расчёта на прочность, посмотрим, например, как конструкторы обеспечили надёжность одной из деталей башенного крана, который мы уже видели на рис. 3. На этом рисунке виден противовес, уравнивающий стрелу, Десятитонный противовес лежит на двух балках, поддерживаемых тросами.

Как рассчитать эти тросы на прочность?

На каждую балку и трос приходится нагрузка 5 тонн. Определяют внутреннюю силу в поперечном сечении троса. Внутренние силы в тросах и балках уравнивают вес груза. Построив параллелограммы сил, находят, что тросы испытывают растяжение, причём внутренняя сила в каждом тросе равна 10 тоннам.

Мы уже знаем, что при растяжении внутренняя сила распределяется равномерно по всей площади поперечного сечения. Поэтому напряжение в сечении троса легко определить по знакомой нам формуле:

$$\frac{\text{внутренняя сила}}{\text{площадь поперечного сечения}} = \text{напряжение.}$$

Для изготовления подъёмных кранов подобного типа обычно берут сталь марки «Ст. 3». При спокойной нагрузке, какую испытывает трос крана, допустимое Напряжение равно  $1600 \text{ кг/см}^2$ . Задача конструктора состоит в том, чтобы расчётное напряжение в тросе не превысило допустимого.

Формулу, по которой мы определяли напряжение, можно представить в другом виде:

$$\frac{\text{внутренняя сила}}{\text{напряжение}} = \text{площадь поперечного сечения.}$$

Тогда по ней можно подобрать площадь поперечного сечения троса; она будет равна;

$$\frac{10\,000 \text{ кг}}{1600 \text{ кг/см}^2} = 6,25 \text{ см}^2.$$

Такую площадь имеет, например, прямоугольное сечение троса толщиной 1 см и шириной 6,25 см или сечение в форме уголка.

Между прочим, заметим, что прочность растягиваемой детали не зависит от формы её поперечного сечения (прямоугольное, квадратное, круглое или какой-либо иной формы). Важно только, чтобы сечение имело достаточную площадь. Чем больше площадь поперечного сечения детали, тем выше её прочность. При других же видах деформаций, например при изгибе или кручении, дело будет обстоять совсем иначе.

## 10. СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЕ ДВУХ ПРОСТЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Расчёт на прочность деталей, работающих на сжатие, например колонн стального каркаса здания, и т. п., существенно отличается от расчёта на растяжение. Правда, при сжатии, как и при растяжении, внутренняя сила распределяется равномерно по поперечному сечению детали. Но при сжатии важную роль играет форма детали. Например, при продольном сжатии тонкий и длинный стержень сравнительно легко изгибается, как говорят, «теряет устойчивость», и деталь выходит из строя. В этом легко убедиться, если взять обыкновенную линейку 60 см длиной, поставить её вертикально на стол и нажимать сверху рукой. Линейка потеряет устойчивость и согнётся (рис. 14). Разорвать же линейку руками невозможно. А между тем, прочность дерева при сжатии лишь немного меньше, чем при растяжении. А теперь попытайтесь сделать то же самое с обыкновенным карандашом. Вам не удастся преодолеть устойчивость карандаша и согнуть его.

Из этих простых опытов можно сделать важные выводы. Устойчивость зависит не только от длины стержня и площади поперечного сечения, но и от формы сечения. Площадь се-

чения карандаша вдвое меньше, чем у линейки, но круглый карандаш устойчивей гибкой линейки.

Устойчивость стержня зависит также от его длины. Чем короче стержень, тем он устойчивей, тем большую сжимающую нагрузку он выдержит,

Очень короткие стержни при сжатии совсем не гнутся, а раздавливаются, если они изготовлены из хрупких материалов, - или сплющиваются в лепёшку, если их материал пластичен. Расчёт таких коротких стержней на прочность ведется так же, как при растяжении.

При сжатии длинных колонн, стоек, шатунов и штоков двигателей, частей ферм различных сооружений и т. п. разрушение или чрезмерная деформация из-за потери устойчивости могут появиться при сравнительно небольших, казалось бы, неопасных нагрузках. Всё это инженеры обязаны учитывать при конструировании деталей, работающих на сжатие. Устойчивость конструкции, работающей на сжатие,— такое же необходимое условие надежности сооружения, как и прочность всех его частей.

История строительной техники знает примеры, когда мосты, радиомачты и другие сооружения разрушались вследствие того, что конструкторы не сумели придать их деталям необходимой устойчивости.

Советские учёные добились крупных успехов в разработке способов расчёта деталей сооружений на устойчивость. Теперь уверенно проектируют и строят такие сооружения, которые не так давно казались неосуществимыми из-за опасности потери устойчивости.

## 11. ИЗГИБ

Познакомившись с деформацией при растяжении и сжатии, рассмотрим теперь изгиб, которому подвергаются многие конструкции. Например, тяжесть поезда стремится прогнуть мост, переброшенный с одного берега реки на другой, сила тяжести изгибает оси вагонов и паровоза, крыло самолёта испытывает изгиб в воздухе и т. д.

Резиновая пластинка помогла нам разобраться в растяжении и сжатии. Чертёжная резинка облегчит нам раскрытие секретов изгиба.

Возьмите такую резинку и начертите на её широкой грани вертикальные параллельные линии с одинаковыми промежутками между ними. Прогните резинку пальцами, как показано на рисунке 15. Вы увидите, что расстояния между линиями в верхней части уменьшатся, а в нижней — увеличатся. Значит, верхняя часть сжата, а нижняя — растянута. Сильнее всего растянут самый нижний слой материала, сильнее всего сжат самый верхний. Промежуточная часть деформируется меньше, а на самой середине резинки расстояния между линиями не изменяются совсем. Этот средний слой не подвержен ни растяжению, ни сжатию. Он не участвует в деформации, как бы сохраняя нейтралитет. Поэтому его и называют нейтральным слоем.

Как нам уже известно, чем больше деформация, тем больше и напряжение. Нейтральный слой не растягивается и не сжимается, значит, в нём нет и напряжений. По мере удаления от нейтрального слоя деформация растёт, соответственно ей растут и напряжения. Наиболее напряжёнными окажутся самый верхний и самый нижний слои резины.

Рассмотрим, какие силы вызывают изгиб. На рис. 1 стрелками показаны усилия пальцев, сгибающих резинку. Усилия большого и указательного пальцев каждой руки образуют пару сил, т. е. две одинаковые параллельные силы, направленные в разные стороны. Подобное взаимодействие усилий часто встречается в жизни. Например, водитель автомашины, прикладывая силы своих рук к баранке руля, создаёт пару сил, поворачивающую руль. Таковую же

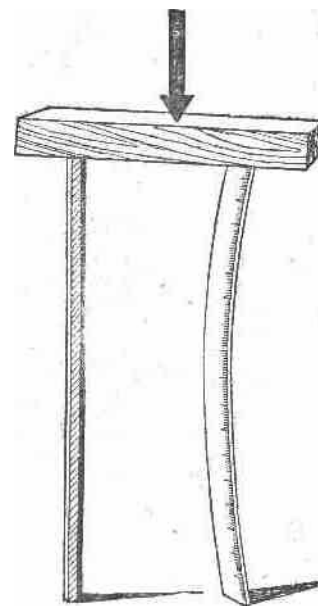


Рис. 14. Карандаш более устойчив, чем линейка, хотя имеет меньшую площадь поперечного сечения.

пару создают усилия пальцев, закручивающих гайку. Действие пары сил будет тем большим, чем больше образующие её силы и чем больше расстояние между ними — плечо пары.

Произведение силы на плечо называется моментом. Усилия пальцев изгибают резинку, они создают момент, называемый изгибающим.

Подобно резинке любая деталь машины или сооружения будет изгибаться только в том случае, если действующие на неё силы образуют изгибающий момент.

Создаваемые правой и левой рукой моменты уравновешивают друг друга, так как они одинаковы по величине и противоположны по направлению. Но если мысленно разрезать резинку на две половины (рис. 16), то момент внешних сил, действующих на любую половину, будет уравновешен моментом внутренних сил, действующих в месте разреза.

Посмотрите на рисунок 16. Напряжения, условно обозначенные на рисунке тонкими стрелками, в верхней и нижней частях резинки направлены в противоположные стороны, потому что верхняя часть сжимается, а нижняя растягивается. Заменим растягивающие напряжения одной силой — их равнодействующей (на рисунке обозначена одной жирной стрелкой).

Прделаем то же самое с напряжениями на верхней части. Получилась пара сил. Момент этой пары равен и противоположен моменту, создаваемому пальцами; они уравновешивают друг друга. Чем больше момент внутренних сил, тем сильнее сопротивление изгибу.

Способность бруса сопротивляться изгибу, его прочность при изгибе, зависит от размеров поперечного сечения. Если сравнить два квадратных бруска из одного и того же материала, из которых один имеет поперечное сечение, например,  $1\text{ см} \times 1\text{ см}$ , а другой —  $2\text{ см} \times 2\text{ см}$ , то второй брус будет в восемь раз прочнее первого. А брус сечением  $3\text{ см} \times 3\text{ см}$  окажется уже в 27 раз прочнее бруса сечением  $1\text{ см} \times 1\text{ см}$ .

Возьмём теперь стальной стержень, начнём его изгибать, постепенно увеличивая нагрузку. Наступит такой момент, когда напряжение в крайних, наиболее удалённых от нейтрального слоя, частях поперечного сечения стержня достигнет предела текучести. Вот этот момент и считают опасным для прочности детали. Его учитывают при определении поперечных размеров детали. Поперечные размеры обычно берут такими, чтобы расчетное напряжение в крайних точках сечения не превысило допустимой величины.

Однако в этом случае способность детали сопротивляться изгибу еще далеко не исчерпана. Ведь напряжения во внутренних частях стержня будут меньше допустимых.

Учеными разработаны способы расчета на прочность балок и других изгибаемых частей машин и сооружений. В этих расчётах учитывается способность стержней, балок и других деталей сопротивляться изгибу и после появления текучести материала в наиболее напряженных слоях. Практически это дает возможность полнее использовать грузоподъемность балок, создавать более лёгкие и экономичные конструкции машин и сооружений из металла и других материалов.

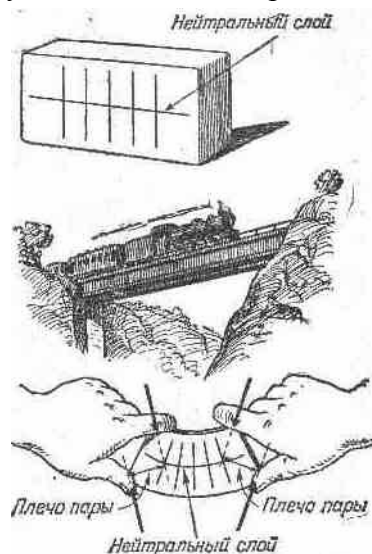


Рис. 15. Деформация изгиба. Верхняя часть резинки сжата, нижняя растянута. Длина нейтрального слоя осталась неизменной.

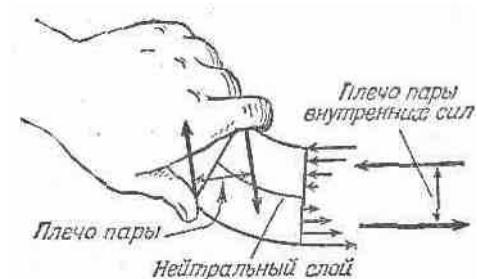


Рис. 16. Равновесие внешних и внутренних сил при изгибе.

## 12. ФОРМА ЭКОНОМИТ МАТЕРИАЛ

Уже в древности строители знали, что доска или брус, поставленные па ребро, во много раз лучше противостоят изгибу, чем положенные плашмя. На рис- 17 изображены две балки одинаковой длины и одинакового сечения, положенные по-разному: одна на ребро, другая плашмя.

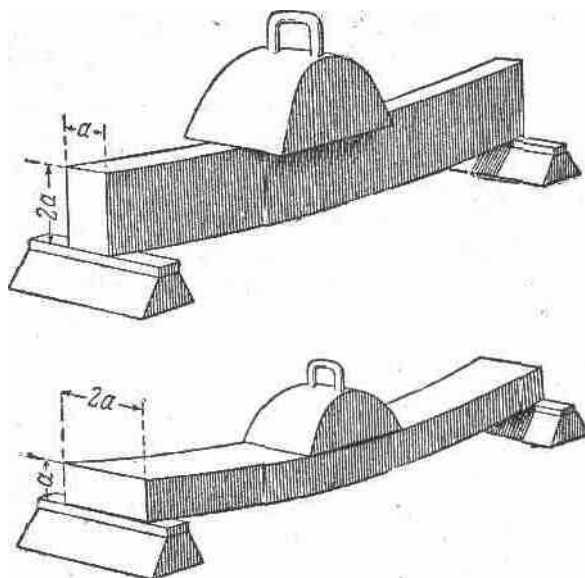


Рис. 17. Балка, поставленная на ребро, вдвое прочнее такой же балки, уложенной плашмя, и к тому же даёт меньший прогиб.

Если ширина балок вдвое больше их толщины, а материал одинаков, то верхняя балка выдержит вдвое большую нагрузку, чем нижняя. Но это еще не все. Балка, поставленная на ребро, будет иметь не только большую прочность, но и большую жёсткость: если на балки положить одинаковые грузы, то прогиб верхней балки будет вчетверо меньше, чем нижней.

Однако этим ещё не исчерпаны все возможности использования прочности материала. Прочность и жесткость балки можно ещё больше повысить, не меняя площади поперечного сечения. Для этого достаточно сузить её в средней части и за этот счёт увеличить высоту. Поперечное сечение балки, имея прежнюю величину площади, приняло другую форму. Эта форма получается как бы от сложения своими ножками двух букв Т. За это и называют такие балки двутавровыми. Так получается одна из наивыгоднейших форм поперечного сечения балки, работающей на изгиб.

Двутавровая стандартная балка примерно в семь раз прочнее и в тридцать раз жёстче, чем балка квадратного поперечного сечения такой же площади, сделанная из того же материала.

Простой опыт убеждает нас в том, как сильно влияет форма поперечного сечения на жёсткость балки.

Вырежьте полоску бумаги длиной 12—13 сантиметров и шириной 3—4 сантиметра. Положите её концами на две спичечные коробки так, чтобы получилось подобие моста (рис. 18, а). Бумажка заметно прогнется даже от собственного веса. А когда вы положите на середину полоски копеечную монету, «мост» рухнет. Полоска бумаги сильно деформировалась, потому что жёсткость её ничтожно мала.

Но достаточно согнуть полоску, как показано на рисунке 18, б, и она уже не будет прогибаться от собственного веса. Нагружайте бумажный мост монетами. Почти не деформируясь, он выдержит тяжесть четырёх пятикопеечных монет. Бумажная полоска стала жёсткой.

Приведенные примеры показывают, что конструктор располагает большими возможностями повышения прочности и снижения веса изгибаемых деталей машин и сооружений путём правильного выбора формы их поперечного сечения.

Двутавровые балки применяются в строительстве жилых и промышленных зданий, мостов и других сооружений.



Двутавровые балки образуют каркасы высотных зданий, они же служат основой междуэтажных перекрытий жилых домов и заводских корпусов. Мощные балки, иногда в несколько метров высотой, склепанные в форме двутавра из толстых стальных листов, перекрывают пролеты между опорами железнодорожных и автомобильных мостов. Рациональная форма поперечного сечения, наиболее приспособленная к работе на изгиб, позволяет создавать из этих балок прочные, жёсткие и вместе с тем лёгкие, экономичные конструкции.

Но когда строителям нужно перекрыть здание цеха шириной в 50 м и даже больше или соединить стометровым однопролётным мостом речные берега, от двутавра обычно отказываются. В таких случаях строители избегают конструкций, работающих на изгиб.

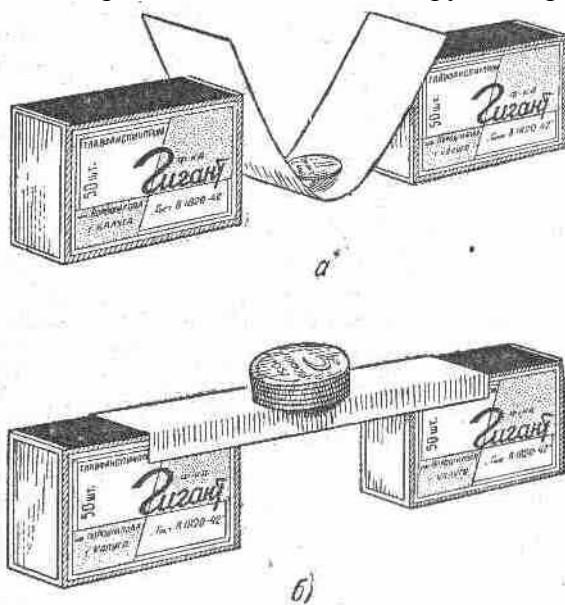


Рис. 18. Изменение формы поперечного сечения резко повысило жесткость бумажного «моста»

Дело в том, что длинные балки сильно, прогибаются даже от собственного веса. Например, стандартная двутавровая балка высотой 20 сантиметров и длиной 10 метров прогнется от собственного веса менее чем на 1 сантиметр, а такая же балка длиной 20 метров прогнётся на 13 сантиметров. Прогиб возрос в 13 раз! А балка длиной 50 метров сломается под тяжестью собственного веса. Бесполезно пытаться выйти из положения путём увеличения поперечных размеров балки. При этом её вес будет очень большим.

### 13. ИЗГИБ ПРЕВРАЩЁН В РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

Что же предпринимают строители для того, чтобы мосты со стометровыми пролётами и широкие перекрытия заводских цехов были прочными? Вместо балок они применяют другие конструкции, а именно фермы и арки.

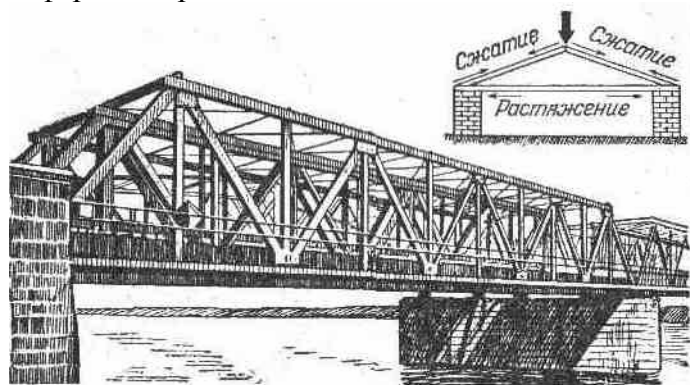


Рис. 19. Простейшая ферма и ферма железнодорожного моста.

Ферма — это конструкция, преобразующая изгиб в растяжение или сжатие. На рисунке 19 вверху показана самая простая ферма. Она состоит из трёх брусьев, соединённых в виде треугольника шарнирами.

Стропила, поддерживающие кровлю, образуют такую конструкцию, известную уже много тысяч лет. Нагрузка, приложенная в вершине треугольника, сжимает наклонные брусья и растягивает горизонтальный брус. Таким образом, ни одна из частей фермы не испытывает изгиба.

На том же рисунке 19 изображён железнодорожный мост. Его ферма состоит из треугольников. Нагрузки, приложенные в узлах (так называются места соединения стержней фермы), не изгибают стержней, а вызывают растяжение или сжатие.

Благодаря тому, что части фермы испытывают не изгиб, а главным образом растяжение или сжатие, вся конструкция получается прочной, лёгкой и экономичной.

Широко применять фермы начали в XIX веке, в связи с железнодорожным строительством.

Выдающийся русский инженер и учёный Дмитрий Иванович Журавский в середине прошлого столетия создал теорию расчета мостовых ферм. Профессора Л. Д. Проскуряков и Н. А. Белелюбский, сочетавшие глубокое знание теории с практическим опытом, разработали совершенные для своего времени конструкции крупнейших ферм железнодорожных и шоссейных мостов.

В наше время фермы применяются не только в мостостроении, но и при постройке перекрытий крупных цехов, в конструкциях подъёмных кранов, опор высоковольтных линий и других сооружений. Даже крыло самолета зачастую имеет «скелет» в виде лёгкой фермы.

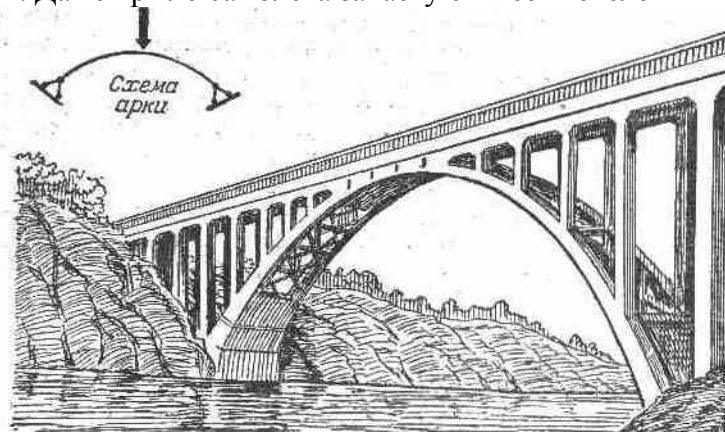


Рис. 20. Схема арки и арочный железобетонный мост.

Достоинства фермы многообразны, но она имеет и свои недостатки. Для постройки фермы железнодорожного моста нужно много стали. А нельзя ли сэкономить металл, заменить его, где возможно, более дешёвыми материалами — железобетоном, бетоном, камнем? Можно. Но выполнить ферму из бетона или камня нельзя, так как эти материалы плохо выдерживают растяжение. Если же вместо ферм использовать арки, тогда можно мосты строить из бетона или камня.

Простейшая арка (рис. 20) представляет собой дугообразный брус, концами упирающийся в опоры. Под нагрузкой арка стремится распрямиться и раздвинуть опоры. Возникающее при этом горизонтальное давление называется распором. В некоторых типах арок их концы соединяют специальной стяжкой, принимающей на себя усилие распора и работающей на растяжение.

Арка — одна из древнейших строительных конструкций, насчитывающая более 5000 лет. Материал арочного сооружения при нагрузке испытывает главным образом сжатие. Строители древности, не знавшие ни стали, ни бетона, возводили арки и своды из камня.

Ещё в XVIII в. крупную арку из дерева спроектировал И. П. Кулибин для однопролётного моста через реку Неву. Работая над этим проектом, Кулибин создал и теорию расчёта арок.

Советскими, строителями возведены крупнейшие арки из железобетона, например арка

моста через Днепр пролетом почти 230 м для двухпутной железной дороги и автомобильного движения. Замечательны по своей грузоподъёмности и красоте железобетонные арки четырёхпутного железнодорожного моста, висящего над каналом имени Москвы у Химок.

Своими успехами в строительстве арочных сооружений инженеры во многом обязаны трудам академика Г. П. Передерия, действительного члена Академии наук Грузинской ССР К. С. Завриева и других советских учёных, разработавших теорию и методы расчёта железобетонных, бетонных и каменных арок.

## 14. ВАЛ ТУРБИНЫ

Электрическая энергия в наши дни имеет повсеместное применение. Она приводит в движение экскаваторы, электровозы, станки, плавит металл...

Гидростанции дают самую дешёвую электроэнергию. Под напором воды вращается турбинное колесо. Через стальной вал вращение турбинного колеса передаётся генератору, вырабатывающему электрический ток. Вода воздействует на турбину с огромной силой. Эта сила стремится деформировать вал турбины, скрутить его подобно тому, как мы скручиваем промокшую рубашку. Усилия рук, удаляющих из ткани влагу, образуют момент, который называют крутящим моментом.

Чтобы выяснить, как деформируется и какие напряжения испытывает сталь вала под воздействием крутящего момента (рис. 21, а), возьмём резиновый жгут и начертим на его цилиндрической поверхности ряд продольных линий и поперечных окружностей. Скручивая затем жгут руками, как показано на рис. 21, б, увидим, что прямые продольные линии превратились в винтовые, а прямоугольники, образованные прямыми линиями и окружностями, оказались перекошенными. Это произошло в результате деформации сдвига под воздействием крутящего момента. Такой перекош мы уже видели, когда знакомились с деформацией сдвига. Если мысленно «вскрыть» жгут, то можно заметить, что сдвиг произошёл по всей толщине жгута, но неодинаково: чем ближе к оси жгута, тем меньше деформация. Это видно на рис. 21, в: отмеченные стрелками углы сдвига уменьшаются по мере приближения к оси жгута.

Мы уже говорили, что деформация сдвига сопровождается появлением касательных напряжений. При скручивании вала в его поперечных сечениях также возникают касательные напряжения. По толщине они распределяются так: по мере приближения к оси вала напряжения, как и сдвиги, уменьшаются (рис. 22). Наибольшие напряжения возникают у самой поверхности вала. Это должен иметь в виду конструктор, рассчитывая вал на прочность: он обязан сделать так, чтобы наибольшие касательные напряжения не превосходили допустимой величины.

Внутренняя пара сил, распределённая по поперечному сечению вала, образует крутящий момент, который по величине равен крутящему моменту внешних сил, но противоположен по направлению. Отсюда следует, что чем больше диаметр вала, тем лучше он сопротивляется скручивающему действию внешних сил, тем выше его прочность при кручении.

Увеличение диаметра вала вдвое повышает его прочность в восемь раз, а увеличение диаметра в четыре раза делает вал прочнее в 64 раза.

Однако прочность вала зависит не только от его диаметра и прочности материала. На рисунке 22 видно, что напряжения во внутренних частях вала, вблизи его оси, невелики, там

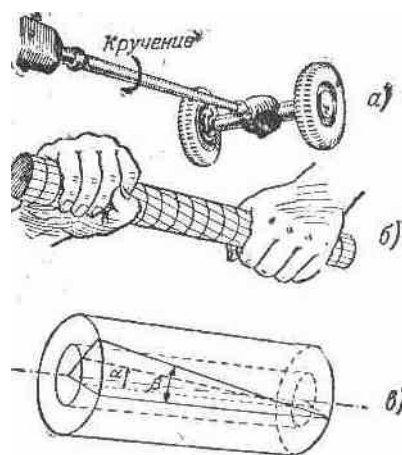


Рис. 21. Деформация кручения:  
 а — карданный вал автомобиля испытывает кручение;  
 б — на цилиндрической поверхности при кручении возникает сдвиг, заметный по перекоосу прямоугольников;  
 в — угол  $\alpha$  меньше угла  $\beta$ , следовательно, сдвиг уменьшается по мере приближения к оси жгута; соответственно уменьшаются и касательные напряжения.

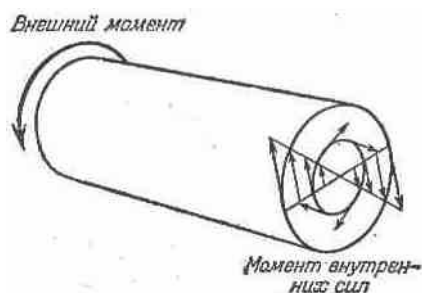


Рис. 22, Касательные напряжения в поперечных сечениях вала при кручениях.  
Длина стрелок пропорциональна напряжению.

материал недогружен, его прочность почти не используется. Этот факт подсказывает, как можно без ущерба для прочности вала уменьшить его вес, а следовательно, сделать машину более лёгкой и сэкономить металл. Если высверлить сердцевину вала, превратив его в трубу, то прочность снизится незначительно, а выигрыш в весе будет весьма существенным. Для примера сравним два вала, имеющих одинаковые площади поперечного сечения и одинаковый вес. Один вал сплошной с поперечником 10 см, а другой в виде трубы диаметром 14,5 см и толщиной стенок 2 см. Трубчатый вал будет вдвое прочнее массивного (рис. 23).

Неудивительно поэтому, что трубчатые валы нашли широкое применение в автомобиле- и самолётостроении, где особенно важно сочетание высокой прочности деталей с наименьшим их весом. Разумеется, нельзя чрезмерно увлекаться заманчивой перспективой применить очень тонкостенный вал, вроде водосточной трубы. Такой вал при скручивании сплющится. Толщину стенок трубчатого вала можно уменьшать только до известного предела.

Итак, мы познакомились со всеми простейшими деформациями — растяжением, сжатием, изгибом, сдвигом и кручением. Из этих пяти простейших деформаций складываются самые разнообразные, подчас очень сложные деформации, которым подвергаются многие детали машин и сооружений. Например, коленчатый вал автомобильного двигателя одновременно испытывает скручивание и изгиб; сверло, вгрызаясь в сталь, скручивается, изгибается и сжимается; заклёпки, соединяющие детали мостовой фермы, испытывают сложное напряжённое состояние, в котором изгиб сочетается со сдвигом и растяжением. Наука о прочности даёт в руки инженерам способы расчета деталей, испытывающих самые сложные деформации.

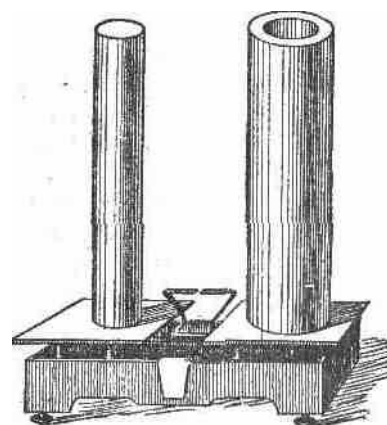


Рис. 23, Эта два вала сделаны из одного материала и имеют одинаковый вес, но трубчатый вал вдвое прочнее сплошного.

## 15. ПРОЧНОСТЬ ПРИ УДАРЕ

Работа почти всякой машины сопровождается более или менее сильными ударами. Даже тиканье наручных часов, которое можно услышать, только поднеся их совсем близко к уху, есть не что иное, как удары друг о друга мельчайших деталей часового механизма.

Понятно, что инженерам — создателям машин — совершенно необходимо знать, как удары влияют на материалы, из которых сделаны машины. И не только инженеры, но и машинисты экскаваторов, водители автомобилей, машинисты паровозов должны знать, как переносят их машины ударные нагрузки; это поможет им увеличить срок службы деталей машин, испытывающих удары при работе.

Величина спокойной нагрузки измеряется в килограммах, тоннах или других единицах силы. Величину ударной нагрузки так измерять нельзя. Ударная нагрузка определяется

количеством энергии, передаваемой в момент удара от одного тела к другому. Например, камень, падающий из ковша экскаватора в кузов самосвала, обладает в момент удара определённой кинетической энергией. Эта энергия превращается в энергию упругой и остаточной деформации кузова, рессор, колёс и других несущих деталей автомобиля, а также самого камня. Поэтому способность того или иного материала противостоять ударным

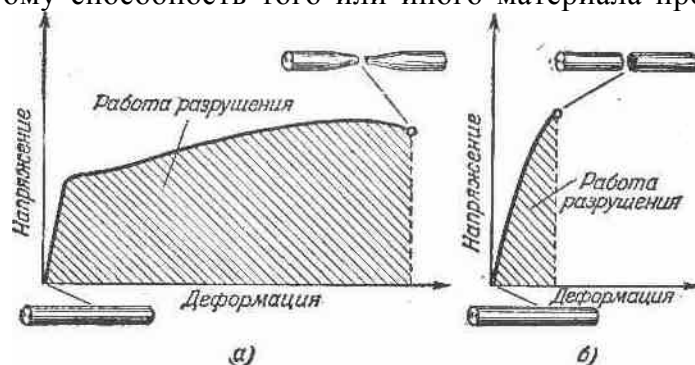


Рис. 24. Диаграмма растяжения; а — пластичного материала; б — хрупкого материала. Заштрихованная площадь пропорциональна работе разрушения образцов.

нагрузкам определяется уже не пределом его прочности, а энергией деформации, которая может быть накоплена в одном кубическом сантиметре материала до разрушения.

Знакомясь с испытанием материалов на растяжение, мы упоминали о том, что чем больше деформация и напряжение, тем больше энергия, накапливаемая в материале. Следовательно, наибольшую энергию перед разрушением сможет накопить пластичный материал, способный к большим деформациям (рис. 24).

Хрупкие материалы к пластическим деформациям неспособны, они разрушаются при очень небольших деформациях. Поэтому хрупкие материалы плохо противостоят ударам, даже если предел прочности этих материалов велик. Вот почему не делают из чугуна автомобильных рессор, пружин, железнодорожных рельсов и других деталей и изделий, подвергающихся ударным нагрузкам. Такие детали должны быть изготовлены из пластичного материала, например из стали.

Однако ударная прочность детали машины зависит не только от материала, но и от формы и размеров.

На рис. 25 слева мы видим два стержня. Они выточены из одного прутка стали. Их диаметры одинаковы, но они разные по длине: один вдвое длиннее другого. Испытание их на разрыв при постепенно увеличивающейся нагрузке даёт одинаковые результаты: стержни разорвутся при одной и той же нагрузке. Иная картина получится, если стержни испытать на разрыв при ударной нагрузке. Для разрыва длинного стержня потребуется почти вдвое более сильный удар, чем для короткого. Как же это объяснить?

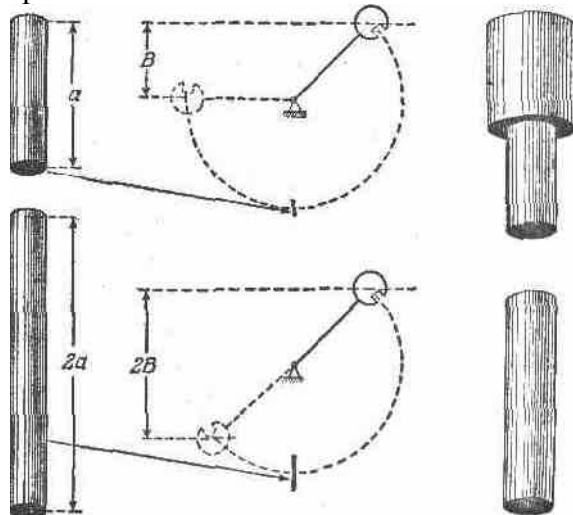


Рис. 25. Нижние стержни при разрыве ударом будут приблизительно вдвое прочнее верхних.

Причина состоит в том, что к моменту разрыва удлинение короткого стержня почти вдвое меньше, чем у длинного. Эта разница в деформации и приводит к тому, что энергия удара различна для разрыва короткого и длинного стержней.

Таким образом, длинные детали лучше противостоят ударному растяжению, чем короткие. Например, длинный трос или болт выдержит большую ударную нагрузку, чем короткий.

Длинный стержень при ударной нагрузке оказался прочнее потому, что он способен к большим деформациям, чем короткий, он более «податлив». Такая же картина наблюдается и тогда, когда детали подвергаются ударному изгибу, скручиванию и сжатию. Всегда ударную нагрузку легче воспринимают более податливые, как бы пружинящие детали. Поэтому там, где нужно смягчить удар, ставят рессоры, пружины, резиновые прокладки, т. е. детали, отличающиеся большой податливостью, принимающие на себя действие удара, предохраняющие от него остальные части машины.

Познакомимся ещё с одной особенностью ударной прочности. На рис. 25 справа показаны два стержня одинаковой длины, они изготовлены из стали одной марки. Нижний имеет одинаковый диаметр по всей длине, а у верхнего половина утолщена вдвое. На первый взгляд может показаться, что утолщённый стержень при ударе будет прочнее. Однако это не так. В действительности деталь без утолщения может выдержать растягивающий удар почти вдвое более сильный, чем деталь с утолщением.

Это объясняется тем, что под воздействием растягивающего удара только тонкая часть стержня будет испытывать пластическую деформацию и сильно удлинится. Толстая же часть останется упругой и деформируется очень мало. Таким образом, противодействовать удару, поглощая его энергию, будет главным образом тонкая часть, а утолщённая половина стержня останется «безработной». Следовательно, утолщение не только не повышает, а, наоборот, снижает прочность детали при действии удара, оно как бы выключает часть стержня из работы.

## 16. УСТАЁТ ЛИ МЕТАЛЛ

Стремительно мчится паровоз. Пар гонит поршни по цилиндрам. Штоки тянут и толкают шатуны. Все детали движутся быстро и непрерывно. Неужели никогда «не устают»?

Двигается шток вперёд и назад. Сталь, из которой он сделан, то растягивается, то сжимается. Растяжение и сжатие сменяют друг друга, десятки и сотни миллионов растяжений и сжатий за долгую жизнь паровоза!

«Шток испытывает многократную знакопеременную нагрузку», — скажет инженер. Растяжение сменяется сжатием — нагрузка меняет направление своего действия, меняет знак; и так много раз подряд.

Знакопеременным нагрузкам подвергается не только шток паровоза, но и многие другие детали машин: паровозов, вагонов, двигателей, станков. Вот, например, ось вагона. Колёса посажены на неё наглухо, и ось вращается вместе с ними. Под тяжестью вагона ось изгибается. Материал верхней её части испытывает растяжение, а нижней — сжатие. Но во время движения поезда ось вращается, и те волокна, которые только что находились наверху и растягивались, через долю секунды уже оказываются внизу и сжимаются. Такая нагрузка называется знакопеременным изгибом.

Нередко знакопеременный изгиб порождается колебаниями детали. Например, удары струй пара в ротор паровой турбины вызывают дрожание лопаток. Частота колебаний очень велика — до 200000 в минуту; лопатки дрожат, словно струны. Двести тысяч изгибов в минуту, более ста миллиардов изгибов в год!

Осмотр деталей, разрушившихся под воздействием многократной знакопеременной нагрузки, показывает, что даже пластичные материалы в этом случае разрушаются подобно хрупким.

Познакомимся с испытанием материалов на выносливость (так называют способность материалов сопротивляться многократным, нагрузкам).

Для этой цели применяют специальные машины. Одна из таких машин показана на рис. 26. На валу электромотора укреплены два патрона с образцами испытываемого металла. К свободным концам образцов подвешивают грузы, изгибающие образцы и вызывающие в материале определённые напряжения.

Патроны с образцами начинают вращаться. Грузы всё время отгибают их вниз. Благодаря вращению материал образца испытывает знакопеременный изгиб, подобно паровозной оси.

За один оборот завершается полный цикл изменения нагрузки. Несложный механизм ведёт счёт оборотам. Вдруг образец с треском ломается. Специальное устройство останавливает мотор. Образец, прежде чем сломался, выдержал 1200 тысяч циклов.

Заменяем образцы новыми, такими же, как и первый. Уменьшаем напряжения в металле, сняв тяжёлые грузы и установив более лёгкие. Заработала машина, счётчик начал отсчитывать обороты. На этот раз образец до поломки выдержал почти 4 миллиона циклов. Вставляем новые образцы и ещё более уменьшаем напряжения. Начинаем опыт и третий раз. Вот уже счётчик показал 10 миллионов оборотов, а образец всё ещё работает. Сколько бы мы не продолжали испытание, всё равно не дождалось бы разрушения образца.

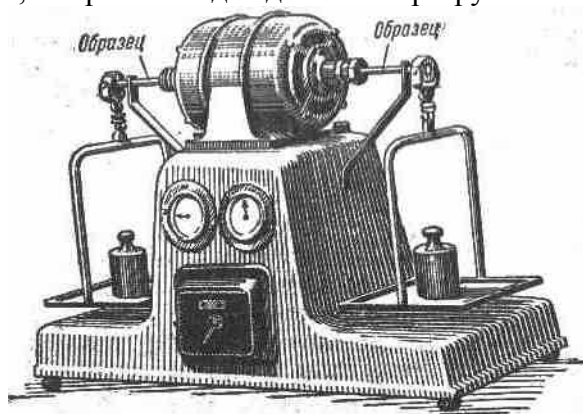


Рис. 26. Машина для испытания материалов на выносливость.

Опыты, подобные вышеописанным, показывают, что, постепенно уменьшая нагрузку при каждой смене образцов, можно найти такую величину напряжения, при которой сталь выдерживает уже практически неограниченное число циклов нагрузки. Это напряжение называется пределом выносливости металла.

Результаты испытаний изображают в виде диаграммы выносливости (рис. 27). Вдоль горизонтальной оси диаграммы откладывают число циклов нагрузки до момента разрушения образца, а вдоль вертикальной оси — напряжения, вызываемые в образце нагрузкой. На диаграмме видно, что по мере уменьшения напряжений возрастает число циклов нагрузки, необходимое для разрушения образца. Правая часть кривой идёт горизонтально. Это значит, что при напряжении, равном пределу выносливости или меньшем, материал может выдерживать неограниченное число циклов нагрузки.

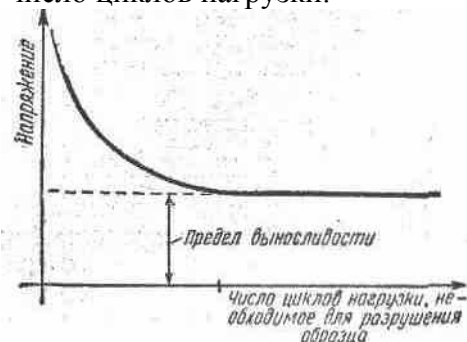


Рис. 27. Диаграмма выносливости стали.

Если при работе паровоза знакопеременные напряжения в материале штока никогда не превышают предела выносливости, то шток будет работать неограниченно долго, он никогда



не «устанет», не сломается. Если же напряжения в штоке превышают этот предел, то рано или поздно произойдёт катастрофа. И она случится не сразу, не при первом пробном пробеге паровоза, а через некоторое время, может быть, через несколько месяцев или даже лет безупречной работы.

Внезапность, неожиданность поломки деталей машин от «усталости» делает такие аварии особенно опасными.

Важно отметить, что предел выносливости материала всегда меньше его предела прочности (обычно в 2—3 раза), зачастую даже меньше предела текучести.

Знакопеременная многократная нагрузка гораздо опаснее для прочности металла, чем спокойная. Это объясняется тем, что уже при сравнительно небольших напряжениях в отдельных зёрнах металла, менее прочных, чем, другие, появляются пластические сдвиги. При многократной смене напряжения эти сдвиги дают начало микроскопической трещине. В дальнейшем трещина постепенно растёт, и в конце концов деталь, ослабленная трещиной, ломается.

Появление трещины остаётся незамеченным, так как деталь в целом не испытывает пластических деформаций, металл до самого момента разрушения работает нормально.

Борьба с «усталостью» металла приобретает особенно важное значение в наше время, когда значительно увеличились скорости работы разнообразных машин. Чем больше скорость, тем чаще сменяется нагрузка, тем больше число её циклов за время службы машины и тем разрушительнее последствия излома движущейся детали.

Своевременно обнаружить развивающуюся трещину, чтобы сменить повреждённую деталь, почти невозможно. Поэтому машина должна быть сделана так, чтобы появление трещины усталости в течение нормального срока службы машины было исключено. В решении этой задачи участвуют и металлурги, и конструкторы, проектирующие машины, и технологи, выбирающие способы изготовления деталей, и люди, управляющие работой построенной машины.

При остывании стали, выплавленной на металлургическом заводе, а также при прокатке и ковке внутри металла иногда образуются трещины или пустоты. На поверхности их не видно. Из такого металла будет изготовлена деталь машины. Небольшая трещина или пустота незначительно снизит прочность детали, работающей при спокойной нагрузке. Но если деталь будет работать при знакопеременной нагрузке, трещина быстро увеличится и деталь очень скоро сломается.

Вот почему слитки и поковки, идущие на изготовление ответственных частей машин, в особенности таких крупных многотонных деталей, как валы турбогенераторов, крупных электромоторов и двигателей, обязательно проверяются на отсутствие внутренних трещин и пустот. Для этой цели существуют специальные приборы — дефектоскопы, позволяющие обнаружить невидимые глазу внутренние пороки металла.

Однако не только невидимые трещины являются опасными. Подобно трещинам, очаг разрушения создают острые надрезы или выточки на поверхности деталей, шпоночные канавки валов, резкие изменения диаметра вала (рис. 28). Это учитывает конструктор, разрабатывая чертежи детали, подвергающейся знакопеременным нагрузкам. Он старается придать ей по возможности плавные очертания, избежать выточек с острыми углами, резких переходов от тонкой части к утолщениям и т. п.

Небрежная, грубая обработка деталей также может стать причиной появления трещин. Например, после грубой обточки на поверхности детали остаётся след резца, неглубокая спиральная канавка, похожая на резьбу болта. Если её не ликвидировать, то впоследствии на дне такой канавки легко образуется трещина усталости. Вот почему технологи обязаны заботиться о том, чтобы сгладить следы обточки последующей шлифовкой, а в особо ответственных случаях даже полировкой. Полированная деталь выдержит знакопеременную нагрузку, в полтора-два раза большую, чем грубо обточенная.

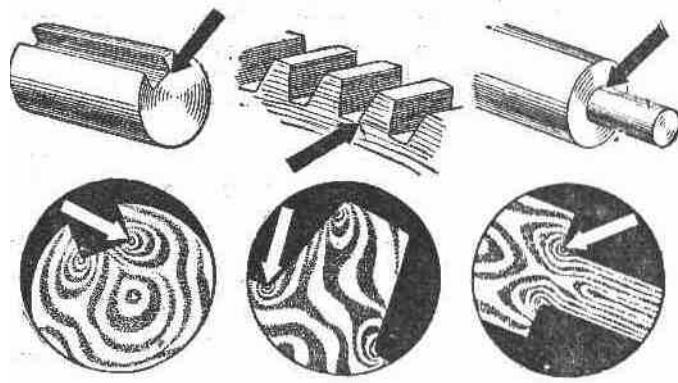


Рис. 28. Очаги зарождения трещины при многократной знакопеременной нагрузке (показаны стрелками). В кружках — картины полос, получаемые оптическим методом при исследовании напряжений в таких деталях.

Но вот изготовлены все детали. Машина собрана и отправлена на стройку, в шахту, в колхоз, на железную дорогу. Здесь за машиной надо следить — чистить и смазывать её, не давать ржаветь стальным деталям. Пятна ржавчины не только портят внешний вид; ржавчина, разъедая гладкую поверхность, создаёт очаг разрушения, слабое место, на котором легко появится и разовьётся гибельная трещина усталости.

Но, разумеется, ни плавные очертания, ни полированная поверхность, ни хороший уход не спасут деталь от разрушения при воздействии многократной знакопеременной нагрузки, если конструктор не обеспечит ей необходимую прочность правильным выбором поперечных размеров. Принимая во внимание, что предел усталости металла гораздо ниже предела прочности, конструктор, рассчитывая деталь, подвергающуюся опасности разрушения от усталости, берёт коэффициент запаса от 5 до 15, в зависимости от материала и условий работы детали. Правильно рассчитанная деталь будет надёжно работать при многократной знакопеременной нагрузке.

## 17. МЕТАЛЛ ПОЛЗЁТ

Такие свойства металлов, как пластичность, упругость, прочность, значительно изменяются с изменением температуры, давления и других условий работы. На практике детали многих машин и сооружений работают под воздействием высокой температуры. В таких условиях металлы приобретают отрицательное свойство — постепенно деформироваться под воздействием даже сравнительно небольшой нагрузки.

Текучесть холодного металла наступает только при сравнительно высоких напряжениях. А текучесть нагретого металла происходит под действием постоянной нагрузки даже при напряжениях, далеко не достигающих предела текучести. Металл как бы «ползёт». Поэтому явление постепенного нарастания деформации нагретого металла без увеличения нагрузки называют ползучестью. Ползучесть — это пластическая деформация, своего рода медленная текучесть.

Некоторые металлы, например латунь, алюминий, «ползут» даже при комнатной температуре, хотя и очень медленно. Сталь более устойчива: её ползучесть заметна только при температурах, превышающих 300—350°.

Чем больше напряжение в металле и чем выше температура, тем быстрее «ползёт» металл, тем быстрее нарастает деформация ползучести. Правда, по сравнению с привычными для нас скоростями, быстрота ползучести кажется ничтожной. Например, метровый стержень из углеродистой стали, растягиваемый при напряжении  $100 \text{ кг/см}^2$  при температуре 540°, удлинится за целый год всего лишь на 15 мм.

Кажется, небольшая скорость — 15 миллиметров в год. Но для деталей, которые должны служить годы, такое удлинение недопустимо. Кроме того, достаточно повысить температуру до 600°, как скорость ползучести нашего стержня возрастёт более чем в 10 раз.

Ясно, что такой материал непригоден для работы при высокой температуре.

Чтобы избежать поломки деталей, работающих при высоких температурах, металлургии

создали специальные сорта стали, отличающиеся низкими скоростями ползучести.

Благодаря обширным исследованиям, проведённым учёными, накоплены достаточно полные сведения о том, как ведут себя с точки зрения ползучести различные материалы при разных температурах и напряжениях. Эти данные позволяют конструктору установить величину напряжений, которые могут быть допущены в детали.

Ползучесть металла может вызвать не только рост деформации деталей со временем, но и ослабление затяжки болтов, плотности посадок колёс и дисков на валах и т. д.

Явление ползучести — один из многих примеров того, как изменчивы и многообразны свойства материалов, широко применяемых в технике. Глубокое изучение этих свойств — одна из важнейших задач учёных, работающих области науки о прочности.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ПУТЕШЕСТВИЕ ВНУТРЬ МЕТАЛЛА .....	3
2. ПОЧЕМУ НЕ РАССЫПАЮТСЯ ТВЁРДЫЕ ТЕЛА .....	4
3. КАК ИЗМЕРИТЬ ВНУТРЕННИЕ СИЛЫ.....	6
4. МЕРА ИНТЕНСИВНОСТИ ВНУТРЕННЕЙ СИЛЫ .....	7
5. ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ .....	8
6. ЛЕЗВИЕ БРИТВЫ И КОМОК СЫРОЙ ГЛИНЫ .....	10
7. ПРОЧНОСТЬ ПРОВЕРЯЮТ ПО ТВЕРДОСТИ.....	15
8. НАПРЯЖЕНИЯ МОЖНО «УВИДЕТЬ» .....	15
9. ЗАПАС ПРОЧНОСТИ .....	17
10. СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЕ ДВУХ ПРОСТЫХ ДЕФОРМАЦИИ.....	19
11. ИЗГИБ .....	20
12. ФОРМА ЭКОНОМИТ МАТЕРИАЛ .....	22
13. ИЗГИБ ПРЕВРАЩЁН В РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ .....	23
14. ВАЛ ТУРБИНЫ .....	25
15. ПРОЧНОСТЬ ПРИ УДАРЕ .....	26
16. УСТАЁТ ЛИ МЕТАЛЛ.....	28
17. МЕТАЛЛ ПОЛЗЁТ.....	31
ОГЛАВЛЕНИЕ.....	33