



Раздел II. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Тема 2.2. Растяжение и сжатие

Занятие №2.

Учебные вопросы:

4. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали
5. Расчеты на прочность при растяжении и сжатии
6. Смятие. Контактные напряжения

4. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

Механические характеристики материалов, т.е. величины, характеризующие их прочность, пластичность, упругость, твердость, а также упругие постоянные E и ν , необходимые конструктору для выбора материалов и расчетов проектируемых деталей, определяют путем механических испытаний стандартных образцов, изготовленных из исследуемого материала.

Большая заслуга в установлении единообразных во всем мире методов испытания материалов принадлежит русскому профессору Н. А. Белелюбскому (1845—1922) — президенту Международного общества испытания материалов.

Рассмотрим диаграмму, полученную в процессе наиболее распространенного и важного механического испытания — испытания на растяжение низкоуглеродистой стали (например, стали Ст3) при статическом нагружении.

В процессе этого испытания специальное устройство испытательной машины автоматически вычерчивает диаграмму, выражающую зависимость между растягивающей силой и абсолютным удлинением, т.е. в координатах $(F, \Delta l)$. Для изучения механических свойств материала независимо от размеров образца применяется диаграмма в координатах «напряжение—относительное удлинение» (σ, ϵ) . Эти диаграммы отличаются друг от друга лишь масштабами.

Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали представлена на рис. 2.8.

Эта диаграмма имеет следующие характерные точки.

Точка А соответствует пределу пропорциональности. **Пределом пропорциональности** $\sigma_{\text{пц}}$ называется то наибольшее напряжение, до которого деформации растут пропорционально нагрузке, т.е. справедлив закон Гука (для стали Ст3 $\sigma_{\text{пц}} \approx 200$ МПа).

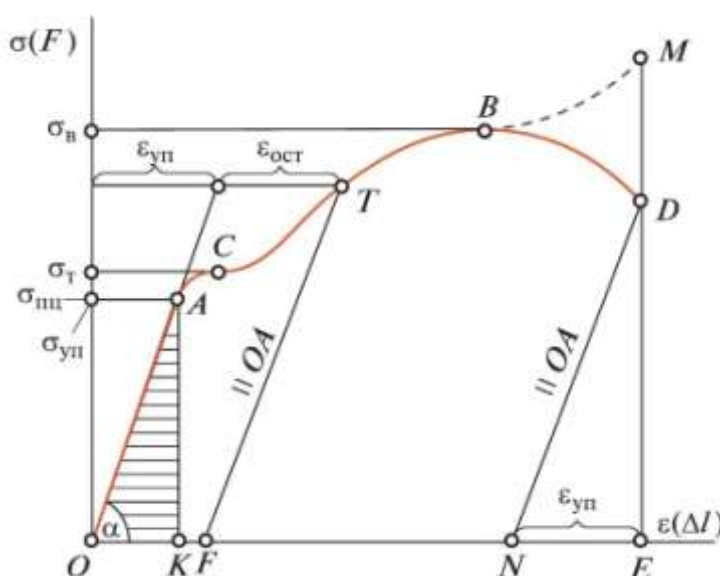


Рис. 2.8. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали



Точка А практически соответствует и другому пределу, который называется пределом упругости. **Пределом упругости** $\sigma_{уп}$ называется то наибольшее напряжение, до которого деформации практически остаются упругими.

Точка С соответствует пределу текучести. **Пределом текучести** σ_T называется такое напряжение, при котором в образце появляется заметное удлинение без увеличения нагрузки (для стали Ст3 $\sigma_T \approx 240$ МПа). При достижении предела текучести поверхность образца становится матовой, так как на ней появляется сетка линий Людерса—Чернова, наклоненных к оси под углом 45° . Линии Людерса—Чернова впервые были описаны в 1859 г. немецким металлургом Л. Людерсом и независимо от него в 1884 г. русским металлургом Д. К. Черновым (1839—1921), предложившим использовать их при экспериментальном изучении напряжений в сложных деталях. **Предел текучести является основной механической характеристикой при оценке прочности пластичных материалов.**

Точка В соответствует временному сопротивлению разрыву, или пределу прочности. **Временным сопротивлением** σ_B называется условное напряжение, равное отношению максимальной силы, которую выдерживает образец, к первоначальной площади его поперечного сечения (для стали Ст3 $\sigma_B \approx 400$ МПа). При достижении временного сопротивления на растягиваемом образце образуется местное сужение — шейка, т.е. начинается разрушение образца. В определении временного сопротивления говорится об условном напряжении, так как в сечениях шейки напряжения будут больше.

Пределом прочности $\sigma_{пч}$ называется временное сопротивление образца, разрушающегося без образования шейки. **Предел прочности является основной механической характеристикой при оценке прочности хрупких материалов.**

Точка D соответствует напряжению, возникающему в образце в момент разрыва во всех поперечных сечениях, кроме сечений шейки.

Точка М соответствует напряжению, возникающему в наименьшем поперечном сечении шейки в момент разрыва. Это напряжение можно назвать **напряжением разрыва**.

С помощью диаграммы растяжения в координатах (σ, ϵ) определим модуль упругости первого рода:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{AK\mu_\sigma}{OK\mu_\epsilon} = \frac{\mu_\sigma}{\mu_\epsilon} \operatorname{tg}\alpha,$$

где μ_σ — масштаб напряжений;

μ_ϵ — масштаб относительных удлинений;

α — угол, который составляет с осью абсцисс прямая линия диаграммы до предела пропорциональности.

Для большинства углеродистых сталей предел пропорциональности можно приблизительно считать равным половине временного сопротивления.

Деформация образца за пределом упругости состоит из **упругой** и **остаточной**, причем упругая часть деформации подчиняется закону Гука и за пределом пропорциональности (см. рис. 2.8).

Если нагрузку снять, то образец укоротится в соответствии с прямой TF диаграммы. При повторном нагружении того же образца его деформация будет соответствовать диаграмме $FTBD$. Таким образом, при **повторном растяжении образца**, ранее нагруженного выше предела упругости, механические свойства материала меняются: повышается прочность (предел упругости и пропорциональности) и уменьшается пластичность. Это явление называется **наклепом**.

В некоторых случаях наклеп нежелателен (например, при пробивке отверстий под заклепки увеличивается возможность появления трещин возле отверстий), в других случаях наклеп создается специально (например, цепи подъемных машин, арматура железобетонных конструкций, провода, тросы подвергаются предварительной вытяжке за предел текучести). Проволока, полученная волочением, в результате наклепа имеет значительно большую прочность, чем точеный образец из того же материала.



Степень пластичности материала может быть охарактеризована (в процентах) **остаточным относительным удлинением** δ , %, и **остаточным относительным сужением** ψ , %, шейки образца после разрыва:

$$\delta = \frac{l_p - l_0}{l_0} \cdot 100; \psi = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0} \cdot 100,$$

где l_0 — первоначальная длина образца;
 l_p — длина образца после разрыва;
 A_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца;
 $A_{ш}$ — площадь, наименьшего поперечного сечения шейки образца после разрыва.

Чем больше δ и ψ , тем пластичнее материал. Материалы, обладающие очень малой пластичностью, называют **хрупкими**. Диаграмма растяжения хрупких материалов не имеет площадки текучести, у них при разрушении не образуется шейки.

Диаграмма сжатия стали до предела текучести совпадает с диаграммой растяжения, причем результаты испытаний сталей на растяжение и сжатие равноценны.

Результаты испытаний на растяжение и сжатие чугуна значительно отличаются друг от друга; предел прочности при растяжении в 3—5 раз ниже, чем при сжатии. Иными словами, чугун значительно хуже работает на растяжение, чем на сжатие.

Отметим, что ярко выраженную площадку текучести имеют только диаграммы растяжения низкоуглеродистой стали и некоторых сплавов цветных металлов. На рис. 2.9 показан для сравнения вид диаграмм растяжения сталей с различным содержанием углерода; из рисунка видно, что с **повышением процента содержания углерода увеличивается прочность стали и уменьшается ее пластичность**.

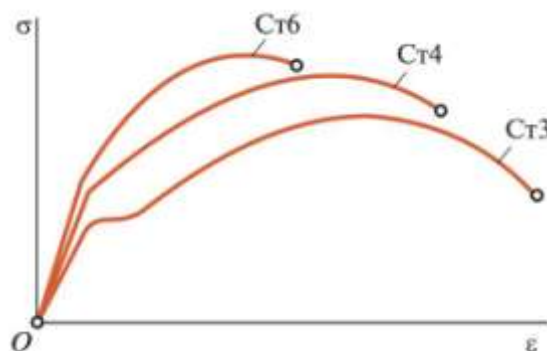


Рис. 2.9. Диаграммы растяжения сталей с различным содержанием углерода

Для пластичных материалов, диаграммы растяжения которых не имеют ярко выраженной площадки текучести (средне- и высокоуглеродистые, легированные стали) или совсем ее не имеют (медь, дюралюминий), вводится понятие **условного предела текучести** — напряжения, при котором относительное остаточное удлинение образца равно 0,2%. Условный предел текучести также обозначим σ_T (иногда его обозначают $\sigma_{0,2}$).

Следует отметить, что деление материалов на пластичные и хрупкие условно, так как в зависимости от характера действующей нагрузки хрупкий материал может получить пластические свойства и, наоборот, пластичный материал приобретает свойства хрупкого. Так, например, деталь из пластичного материала при низкой температуре или при ударной нагрузке разрушается без образования шейки, как хрупкая.

5. Расчеты на прочность при растяжении и сжатии

В результате проведения механических испытаний устанавливают предельные напряжения, при которых происходит нарушение работы или разрушение деталей конструкции.

Предельным напряжением при статической нагрузке для **пластичных материалов является предел текучести, для хрупких — предел прочности**. Для обеспечения прочности деталей необходимо, чтобы возникающие в них в процессе эксплуатации напряжения были меньше предельных.



Отношение предельного напряжения к напряжению, возникающему в процессе работы детали, называют **коэффициентом запаса прочности** и обозначают буквой s :

$$s = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma}, \text{ где } \sigma = \frac{N}{A}.$$

Очевидно, что недостаточный коэффициент запаса прочности не обеспечит надежности конструкции, а чрезмерный запас прочности приведет к перерасходу материала и утяжелению конструкции. Сечение, для которого коэффициент запаса прочности наименьший, называется **опасным**.

Минимально необходимый коэффициент запаса прочности называют **допускаемым** и обозначают $[s]$. Допускаемый коэффициент запаса прочности зависит от свойств, качества и однородности материала, точности представления о нагрузках, действующих на конструкцию, ответственности конструкции и многих других причин.

Для пластичных материалов $[s] = 1,2 \dots 2,5$, для хрупких $[s] = 2 \dots 5$, для древесины $[s] = 8 \dots 12$.

Отношение предельного напряжения к допускаемому коэффициенту запаса прочности называют **допускаемым напряжением** и обозначают $[\sigma]$:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{[s]}.$$

Условие прочности детали конструкции заключается в том, что наибольшее возникающее в ней напряжение (рабочее) не должно превышать допускаемого:

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma].$$

Условие прочности можно записать в ином виде: $s \geq [s]$, т.е. расчетный коэффициент запаса прочности не должен быть меньше допускаемого.

Если допускаемые напряжения при растяжении и сжатии различны, то их обозначают соответственно $[\sigma_p]$ и $[\sigma_c]$. Ориентировочные значения допускаемых напряжений на растяжение и сжатие для некоторых материалов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

Значения допускаемых напряжений на растяжение и сжатие для некоторых материалов

Материал	[σ], МПа	
	Растяжение	Сжатие
Чугун серый	28...80	120...150
Сталь углеродистая конструкционная	60...250	
Сталь легированная конструкционная	100...400 и выше	
Медь	30...120	
Латунь	70...140	
Бронза	60...120	
Дюралюминий	80...150	
Текстолит	30...40	50...90
Дуб (вдоль волокна)	9...13	13...15
Кирпичная кладка	До 0,2	0,6...2,5
Бетон	0,1...0,7	1...9



Расчетная формула при растяжении и сжатии имеет вид

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma]$$

и читается так: **нормальное напряжение в опасном сечении**, вычисленное по формуле $\sigma = N/A$, не должно превышать допускаемое.

При расчете конструкций на прочность встречаются три вида задач, различающихся формой использования расчетной формулы:

1) **проектный расчет**, при котором определяются размеры опасного сечения по формуле

$$A = \frac{N_{\max}}{[\sigma]};$$

2) **проверочный расчет**, при котором определяется рабочее напряжение и сравнивается с допускаемым по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma];$$

3) **определение допускаемой нагрузки**, которое ведется по формуле

$$[N] = A[\sigma].$$

6. Смятие. Контактные напряжения

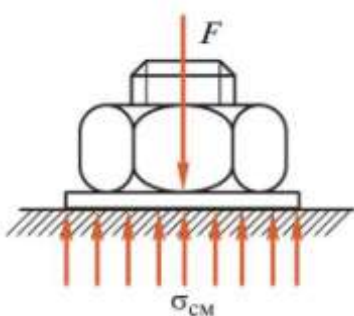


Рис. 2.10. Изображение шайбы под гайкой и головки болта

Если детали конструкции, передающие значительную сжимающую нагрузку, имеют небольшую площадь контакта, то может произойти смятие поверхностей деталей. Смятие стараются предотвратить, например, под гайки и головки болтов подкладывают шайбы (рис. 2.10).

Для простоты расчетов полагают, что при контакте по плоскости возникают нормальные напряжения смятия, **равномерно распределенные по площади контакта**. Расчетное уравнение на смятие имеет вид

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F}{A_{\text{см}}} \leq [\sigma_{\text{см}}],$$

где F — сжимающая сила;
 $[\sigma_{\text{см}}]$ — допускаемое напряжение на смятие;
 $A_{\text{см}}$ — площадь контакта.

Если соприкасающиеся детали сделаны из разных материалов, то на смятие проверяют деталь из более мягкого материала.

При контакте двух деталей по цилиндрической поверхности (например, клепаное соединение) закон распределения напряжений смятия по поверхности контакта сложен (рис. 2.11), поэтому при расчете на смятие цилиндрических отверстий в расчетную формулу подставляют не площадь боковой поверхности полуцилиндра, по которой происходит контакт, а значительно меньшую площадь диаметрального сечения отверстия (условная площадь смятия); тогда

$$A_{\text{см}} = d\delta,$$

где d — диаметр отверстия;
 δ — толщина соединяемой детали (высота цилиндра).

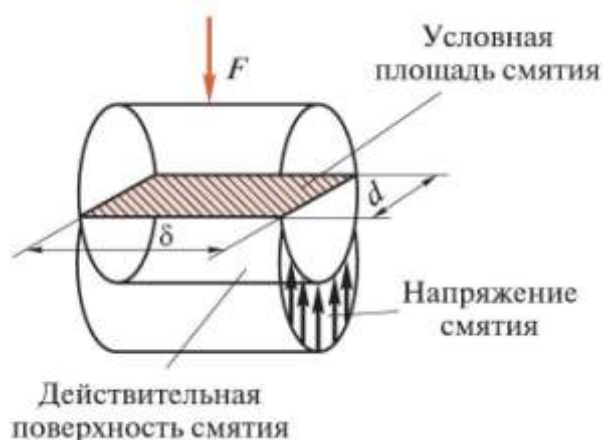


Рис. 2.11. Условная площадь смятия

При различной толщине соединяемых деталей в расчетную формулу подставляют меньшую толщину.

В машиностроении допускаемые напряжения на смятие для болтовых, штифтовых и шпоночных соединений из низкоуглеродистой стали принимают в пределах 100...120 МПа, для клепаных соединений — 240...320 МПа, для древесины (сосна, дуб) — 2,4...11 МПа в зависимости от сорта древесины и направления сжимающей силы по отношению к направлению волокон.

Контактные напряжения

Решение вопросов о контактных напряжениях и деформациях впервые дано в работах немецкого физика Г. Герца (1857—1894). **Контактными** называются напряжения и деформации, возникающие при сжатии тел криволинейной формы, причем первоначальный контакт может быть линейным (например, сжатие двух цилиндров с параллельными образующими) или точечным (например, сжатие двух шаров). В результате деформации контактирующих тел начальный точечный или линейный контакт переходит в контакт по некоторой малой площадке.

Для деталей, в поверхностных слоях которых возникают контактные напряжения (например, фрикционные катки, зубчатые колеса, подшипники качения), решающую роль играет прочность рабочих поверхностей — контактная прочность.

Рассмотрим наиболее важный для нас случай контакта двух цилиндров с параллельными образующими (рис. 2.12). Определение контактных напряжений в этом случае производится по формуле Герца, выведенной в предположении, что материалы цилиндров подчиняются закону Гука. Очевидно, что контактные напряжения по

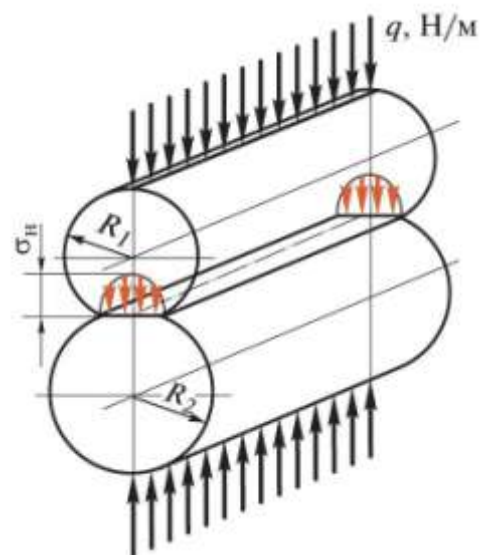


Рис. 2.12. Два цилиндра с параллельными образующими



ширине площадки контакта неравномерны. Максимальные напряжения σ_n определяются по формуле

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{qE_{\text{пр}}}{2\pi(1 - \nu^2)\rho_{\text{пр}}}},$$

где q — нагрузка на единицу длины линии контакта;
 $E_{\text{пр}}$ — приведенный модуль упругости;
 ν — коэффициент Пуассона;
 $\rho_{\text{пр}}$ — приведенный радиус кривизны цилиндров.

$E_{\text{пр}}$ получаем из соотношения

$$\frac{2}{E_{\text{пр}}} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$

откуда

$$E_{\text{пр}} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}.$$

$\rho_{\text{пр}}$ получаем из соотношения

$$\frac{1}{\rho_{\text{пр}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

откуда

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}$$

При $\nu = 0,3$ формула Герца приобретает вид

$$\sigma_n = 0,418 \sqrt{\frac{qE_{\text{пр}}}{\rho_{\text{пр}}}}.$$