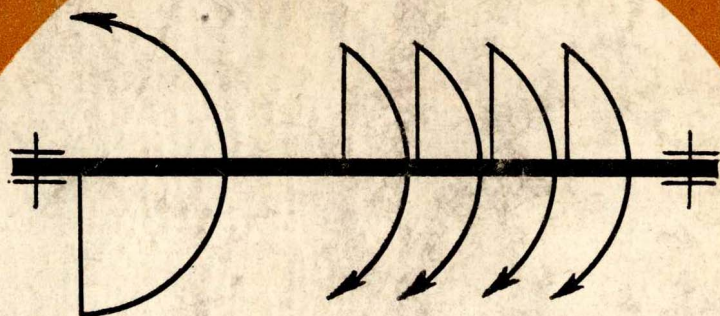


С.П. ФЕСИК



справочник

по

сопротивлению
материалов

С. П. ФЕСИК, канд. техн.

справочник по сопротивлению материалов

Издание 2-е, переработанное и дополненное

30.121 я2

Ф44

УДК 539.3/6(031)

Справочник по сопротивлению материалов / Фесик С. П.— 2-е изд., перераб. и доп.— Киев : Будівельник, 1982.—280 с.

В справочнике изложены основные сведения по всем вопросам сопротивления материалов в аспекте задач инженера-строителя. Расчетные формулы даны без выводов, но с необходимыми пояснениями, облегчающими их практическое применение. Значительное место отведено графикам, справочным и расчетным таблицам, иллюстрационным примерам расчета.

2-е издание переработано в связи с новыми нормативными материалами.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 01.12.81.

Справочник предназначен для инженеров-строителей, проектировщиков, а также может быть полезным студентам и аспирантам строительных специальностей.

Табл. 91. Ил. 216. Библиогр.: 50 назв.

Рецензенты *д-р техн. наук А. С. Сахаров, инж. Р. Б. Файенберг*

Редакция литературы по строительным конструкциям, деталям и изделиям

Зав. редакцией *инж. А. А. Петрова*

Степан Прокофьевич Фесик, канд. техн. наук.

СПРАВОЧНИК ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

Издание 2-е, переработанное и дополненное

Редактор *В. Н. Пархоменко*
Обложка художника *Б. М. Бойко*
Художественный редактор *Н. Г. Аникина*
Технический редактор *О. Р. Шульженко*
Корректоры *Т. Ю. Серга, Р. Я. Грухаль*

Информ. бланк № 1765.

Сдано в набор 04.01.82. Подписано в печать 20.07.82. БФ 03880. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская №2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 17,3. Усл. кр.-отт. 17,81. Уч.-изд. л. 18,91. Тираж 64000 экз. Изд. № 51. Заказ № 2—256. Цена 1 р. 16 к.

Издательство «Будівельник», 252053 Киев-53, Обсерваторная, 25

Главное предприятие республиканского производственного объединения «Полиграфкнига».
252057 Киев, Довженко, 3

3202000000—059
Ф М203(04)—82 88.82

© Издательство «Будівельник», 1970
© Издательство «Будівельник», 1982,
с изменениями и дополнениями

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A, B, C, ...** — опорные реакции
A — амплитуда колебаний;
 a_n — ударная вязкость при надрезе образца, удельная, Дж/м³ (кгс × см/см²);
B — бимомент, Нм³ (кгс × см³ или тс × м²);
D и d — диаметр, см, мм;
E — модуль продольной упругости, Па (кгс/см²);
F — площадь поперечного сечения, м²;
 $F_{нт}$ — полезная площадь поперечного сечения (за вычетом ослабления), м²;
G — модуль сдвига, Па (кгс/см²);
h, b — высота и ширина прямоугольного сечения, м;
J — осевой момент инерции сечения, см⁴;
 J_p — полярный момент инерции, см⁴;
r — радиус инерции сечения, см;
L, l — длина, пролет, м;
M — изгибающий момент, Нм (кгс × см или тс × м);
 M_k — крутящий момент, Нм (кгс × см или тс × м);
N — продольная сила, Н (кгс, тс);
P — сосредоточенная сила, Н (кгс, тс);
 $P_{кр}$ — критическая сила, критическая нагрузка, Н (кгс, тс);
n — запас прочности;
 n_y — запас устойчивости;
Q — нагрузка, поперечная сила, Н (кгс, тс);
q — нагрузка на единицу длины или поверхности, Н/м или Н/м² (кгс/м или кгс/м²);
R, r, ρ — радиус, плечо;
γ — коэффициент асимметрии цикла $r = \frac{\sigma_{мин}}{\sigma_{макс}}$;
- S** — статический момент площади, м³;
T — время, период, с;
t, δ — толщина;
W — момент сопротивления сечения при изгибе, м³;
 W_p — полярный момент сопротивления, м³;
x, y, z — обозначение осей координат, координаты рассматриваемой точки;
γ — относительный сдвиг;
ε — относительная продольная деформация;
 ε_l — относительная поперечная деформация;
 $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации;
 Δl — абсолютная линейная деформация (мм или см);
Θ — угол поворота поперечного сечения при изгибе, рад;
λ — гибкость стержня;
μ — коэффициент Пуассона;
σ — нормальное напряжение, Па (кгс/см²);
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения в рассматриваемой точке, при этом $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$;
 σ_i — интенсивность напряжений;
[σ] — допускаемое нормальное напряжение;
 σ_B — предел прочности;
 σ_T — предел текучести;
 $\sigma_{ц}$ — предел пропорциональности;
 σ_{-1} — предел выносливости при изгибе с симметричным циклом;
 σ_0 — предел выносливости при изгибе для пульсирующего цикла;
- $$\sigma_m = \frac{\sigma_{макс} + \sigma_{мин}}{2}$$
 — среднее напряжение цикла;
- $$\sigma_a = \frac{\sigma_{макс} - \sigma_{мин}}{2}$$
 — амплитуда напряжений цикла.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Сопротивление материалов — наука, занимающаяся вопросами прочности, жесткости и устойчивости частей сооружений и машин. Основной объект расчета — стержень (или брус), т. е. твердое тело, поперечные размеры которого малы по сравнению с длиной. Ось стержня — геометрическое место центров тяжести его поперечных сечений. Поперечное сечение получается при рассечении стержня плоскостью, перпендикулярной его оси.

Расчет на прочность заключается в определении наименьших размеров элементов конструкции, исключающих возможность разрушения под действием заданных нагрузок. Расчеты на жесткость связаны с определением деформаций, исключающих быстрое разрушение материала, при условии, что под нагрузкой они не превышают заданных величин. Под устойчивостью подразумевается способность элементов конструкции сохранять свою первоначальную форму равновесия при действии нагрузок.

Изменение размеров и формы тела под действием силовых факторов называется деформацией *. Деформации связаны с перемещениями точек, линий и плоскостей. Перемещения по прямой называются линейными, а перемещения, вызванные поворотом линий и плоскостей, называются угловыми. Линейная деформация имеет размерность длины, а угловая — размерность угла. Измеренная величина линейной деформации на данном участке называется абсолютной деформацией, а отношение абсолютной деформации к длине участка — относительной деформацией.

Деформации, полностью исчезающие после снятия нагрузки, называются упругими, а частично остающиеся — пластическими. Соответственно этому свойство материалов полностью восстанавливать первоначальную форму при снятии нагрузок называется упругостью, а свойство накапливать остаточные деформации — пластичностью. Если внешние силы, действующие на брус, приводятся к силам, направленным по его оси, то говорят о растяжении или сжатии. Если внешние силы приводятся к паре сил, действующих в плоскости, перпендикулярной к оси стержня, то это — кручение. Если внешние силы приводятся к паре сил, действующих в плоскости продольной оси бруса, то брус испытывает изгиб.

Основные допущения, принимаемые в сопротивлении материалов

1. Рассматривается некоторое идеализированное тело, обладающее свойствами идеальной упругости, изотропии или ортотропии. Изотропными называются однородные тела, у которых физико-механические свойства одинаковы по всем направлениям (в инженерных расчетах к таким материалам можно отнести сталь, стекло, бетон); ортотропные — это такие тела, у которых физико-механические свойства одинаковы для определенных направлений (например, проволока). Анизотропные материалы (не обладающие свойствами изотропности или ортотропности) в сопротивлении материалов не рассматриваются.

2. Предполагается, что при действии силы, не превышающей определенной величины, тело является линейно-деформируемым, т. е. деформации пропорциональны действующей нагрузке.

* Этот термин в сопротивлении материалов применяется в двух значениях: когда речь идет об изменении формы тела в целом и при определении количественных изменений, происходящих во взаимно расположенных частицах тела под нагрузкой.

3. В инженерных конструкциях деформации элементов малы по сравнению с их общими размерами. Допущение о малости деформации позволяет не учитывать их при рассмотрении условий равновесия.

4. Применяется принцип независимости действия сил, состоящий в том, что упругую деформацию, вызванную многими силами, действующими одновременно, можно рассматривать как сумму упругих деформаций от каждой силы в отдельности.

5. Предполагается, что плоские сечения, проведенные в теле до его деформации, остаются плоскими и при деформации (гипотеза плоских сечений).

Внешние и внутренние силы

Силы, приложенные к телу в результате взаимодействия тел, называют внешними. Внешние силы бывают объемные — приложенные ко всем внутренним точкам тела (например, собственный вес, силы инерции), и поверхностные — приложенные к поверхности тела (например, нагрузка на балке). Поверхностные силы делятся на сосредоточенные, действующие на весьма малой поверхности (теоретически — в точке), и распределенные — приложенные непрерывно по длине или на площади. Величина распределенной нагрузки, приходящаяся на единицу длины или площади, называется интенсивностью нагрузки.

По времени действия нагрузки бывают постоянные, действующие непрерывно в течение всего срока службы сооружения, и временные; продолжительность действия последних ограничена.

По характеру изменения во времени нагрузки делят на статические и динамические. Первые прикладываются плавно, поэтому ускорениями точек конструкции и силами инерции, возникающими при движении масс, можно пренебречь. Динамические нагрузки меняют свою величину в течение короткого промежутка времени и вызывают значительные ускорения элементов конструкции.

Внутренние силы — результат действия одних частей тела на другие. Они существуют и при отсутствии внешних силовых воздействий как результат взаимодействия между частицами тела. Но под действием внешних сил в материале возникают дополнительные внутренние силы, сопровождающие деформацию. Эти силы и определяются в задачах сопротивления материалов.

Напряжения. Метод сечений

Величина внутренней силы, приходящаяся на единицу площади сечения, называется напряжением, а равнодействующая внутренних сил — внутренним усилием. При определении усилий и напряжений в сопротивлении материалов используется метод сечений (рис. 1.1). Изучаемый элемент мысленно рассекают плоскостью в том

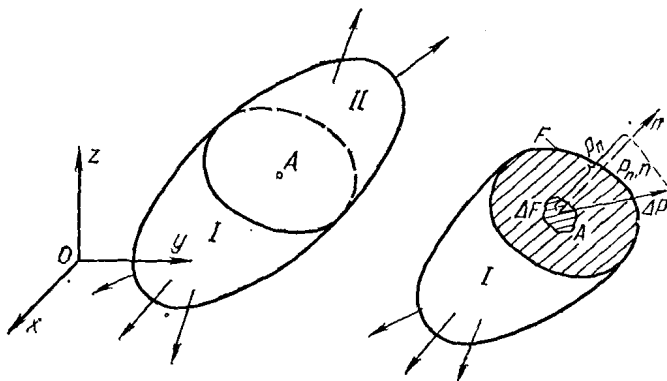


Рис. 1.1.

месте, где хотят определить усилие или напряжение; мысленно отбрасывают одну часть и записывают условия равновесия оставшейся части. При этом предполагается, что каждая часть находится в равновесии под действием внешних сил, действующих

на эту часть, и внутренних сил как сил взаимодействия между оставшейся и отброшенной частями. Искомое напряжение или усилие находят из условий равновесия. Но не всегда с помощью метода сечений определяются неизвестные силы: в некоторых случаях необходимо дополнительно рассмотреть деформации изучаемого сооружения или его частей. Это — случаи статически неопределимых задач.

Отношение внутренней силы ΔP , действующей на небольшую площадь ΔF сечения, к величине этой площади приближается к некоторому пределу, если эту площадь уменьшать до бесконечно малых размеров, стягивая контур, ограничивающий ее, к точке A . Предел этого отношения, определяющий интенсивность внутренних сил, действующих на данную площадку в рассматриваемой точке A тела, называется напряжением. Напряжения различны не только в разных точках тела, но и в одной и той же точке по площадкам, наклоненным под разными углами.

Полное напряжение в точке A с координатами (x, y, z) на площадке с нормалью n определяется по формуле

$$p_n = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F}, \quad (1.1)$$

где ΔP — элементарная сила, передающаяся от отброшенной части II тела на рассматриваемую часть I. Размерность напряжения — сила/площадь — Па (кгс/см²).

Нормальное напряжение σ_n равно проекции p_n на нормаль n :

$$\sigma_n = p_n \cos(\widehat{p_n, n}). \quad (1.2)$$

Касательное напряжение τ_n равно проекции полного напряжения на плоскость площадки:

$$\tau_n = p_n \sin(\widehat{p_n, n}). \quad (1.3)$$

УПРУГИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Величины E — модуль упругости первого рода (модуль упругости при растяжении), G — модуль упругости при сдвиге (модуль сдвига, модуль упругости второго рода) и μ — коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) называют упругими постоянными или упругими характеристиками материалов. E и G имеют размерность напряжения Па (кгс/см²), μ — безразмерный коэффициент.

Постоянные E , G и μ характеризуют упругие свойства материалов. Они связаны между собой зависимостью

$$E = 2(1 + \mu)G. \quad (1.4)$$

Постоянные E , G и μ для различных материалов приведены в табл. 1.1.

Основными характеристиками материалов в пределах пропорциональности являются предел пропорциональности σ_p , предел текучести σ_T и предел прочности σ_B .

Упругие и механические характеристики материалов определяют экспериментально путем постановки опытов на растяжение и сжатие образцов, изготовленных из изучаемого материала. Для этой цели в лабораториях пользуются специальными машинами, способными деформировать и разрушать образцы. При этом с помощью точных приборов измеряют деформации образцов. Механические испытания материалов производят не только для изучения механических свойств материалов (прочности, пластичности, способности к упругим деформациям, способности сопротивляться ударным нагрузкам и т. д.), но и для проверки теоретических выводов (например, проверка гипотезы плоских сечений).

Основные методы эксперимента: 1) определение механических характеристик материала испытанием образца из данного материала; 2) непосредственное изучение напряженно-деформативного состояния элемента (метод лаковых покрытий, рентген); 3) изучение модели с последующим перенесением результатов испытания на действительно деталь (оптический способ, мембранная аналогия, электроаналогия).

При проведении экспериментов обычно из опыта получают не интересующую величину, а какую-то другую, связанную с ней определенной зависимостью. Например, для определения напряжений из опыта получаем абсолютную деформацию Δl и, зная модуль упругости материала, по закону Гука находим напряжение

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l}.$$

Таблица 1.1. Модули упругости и коэффициент Пуассона некоторых материалов

Материал	Модуль упругости, МПа		Коэффициент Пуассона
	E	G	
Чугун серый, белый	$(1,15—1,60) \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^4$	0,23—0,27
Ковкий чугун	$1,55 \cdot 10^5$	—	—
Углеродистая сталь	$(2,0—2,1) \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^4$	0,24—0,28
Легированная сталь	$2,1 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^4$	0,25—0,30
Стальное литье	$1,75 \cdot 10^5$	—	—
Медь прокатная	$1,1 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^4$	0,31—0,34
Медь холоднокатаная	$1,3 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^4$	—
Медь, литье	$0,84 \cdot 10^5$	—	—
Фосфористая бронзакатаная	$1,15 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$	0,32—0,35
Марганцевистая бронзакатаная	$1,1 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^4$	0,35
Алюминиевая бронзалитье	$1,05 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$	—
Латунь холоднокатаная	$(0,91—0,99) \cdot 10^5$	$(3,5—3,7) \cdot 10^4$	0,32—0,42
Корабельная латунькатаная	$1,0 \cdot 10^5$	—	0,36
Алюминийкатаный	$0,69 \cdot 10^5$	$(2,6—2,7) \cdot 10^4$	0,32—0,36
Алюминиевая проволокакатаная	$0,7 \cdot 10^5$	—	—
Дюралюминийкатаный	$0,71 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^4$	—
Цинккатаный	$0,84 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^4$	0,27
Свинец	$0,17 \cdot 10^5$	$0,70 \cdot 10^4$	0,42
Гранит	$0,49 \cdot 10^5$	—	—
Известняк	$0,42 \cdot 10^5$	—	—
Мрамор	$0,56 \cdot 10^5$	—	—
Песчаник	$0,18 \cdot 10^5$	—	—
Глинистый свинец непрочный (Донбасс)	$0,12 \cdot 10^5$	—	1,16
Глинистый свинец средней прочности (Донбасс)	$(0,310—0,333) \cdot 10^5$	—	до 0,10
Глинистый сланец прочный (Донбасс)	$(0,400—0,475) \cdot 10^5$	—	до 0,40
Глинистый сланец (Гришино): вдоль напластования	$0,19 \cdot 10^5$	—	—
перпендикулярно напластованию	$0,11 \cdot 10^5$	—	—
Уголь (Донбасс, Лутугино)	$0,062 \cdot 10^5$	—	0,11
Каменная кладка из: гранита	$(0,09—0,1) \cdot 10^5$	—	—
известняка	$0,06 \cdot 10^5$	—	—
кирпича	$(0,027—0,030) \cdot 10^5$	—	—
Бетон при пределе прочности, кгс/см ² :			
100	$(0,196—0,146) \cdot 10^5$	—	—
150	$(0,214—0,164) \cdot 10^5$	—	—
200	$(0,232—0,182) \cdot 10^5$	—	—
Дерево вдоль волокон	$(0,10—0,12) \cdot 10^5$	$0,055 \cdot 10^4$	—
То же, поперек	$(0,005—0,01) \cdot 10^5$	—	—
Каучук	$0,00008 \cdot 10^5$	—	0,47
Бакелит	$(0,02—0,03) \cdot 10^5$	—	—
Текстолит	$(0,06—0,10) \cdot 10^5$	—	—
Гетинакс	$(0,10—0,17) \cdot 10^5$	—	—
Стекло	$0,56 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^4$	0,25
Лед	$0,10 \cdot 10^5$	$(0,28—0,3) \cdot 10^4$	—

Примечания: 1. Значения E и μ для камней должны рассматриваться как средние, от которых возможны значительные отклонения в ту или другую сторону.

2. Для того чтобы модуль упругости получить в кгс/см², необходимо величину в МПа умножить на 10.

Таблица 1.2. Типы образцов для испытания на растяжение

Образец	Расчетная длина, мм	Сечение образца, мм ²	Диаметр цилиндрического образца, мм	Символы кратности образца *
Нормальный	100	78,54	10	δ_{10}
длинный	50	78,54	10	δ_5
короткий				
Пропорциональный:				
длинный	$11,3 \sqrt{F_0}$	Произвольное	Произвольное	δ_{10}
короткий	$5,65 \sqrt{F_0}$	»	»	δ_5

* Для обозначения относительного удлинения.

Для испытания на разрыв используют стандартные стальные образцы (рис. 1.2) круглого или прямоугольного сечения. В стандартном (нормальном) образце отношение расчетной длины к диаметру поперечного сечения равно 10. Характеристикой размеров образца является отношение $\frac{L}{\sqrt{F_0}} = 11,3$ (F_0 — площадь поперечного сечения образца до испытания).

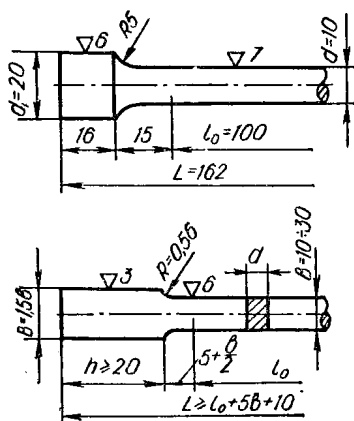


Рис. 1.2.

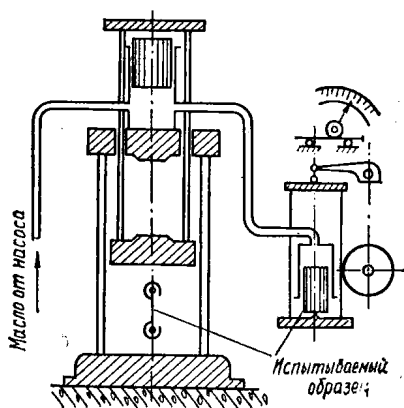


Рис. 1.3.

В тех случаях, когда изготовить нормальный образец по каким-либо причинам нельзя, пользуются так называемыми пропорциональными образцами, в которых характеристика размеров такая же, как и в стандартных: 11,3 или 5,65. По ГОСТ 1497-73* образцы для испытаний на растяжение должны удовлетворять требованиям, приведенным в табл. 1.2.

Концы образцов имеют утолщения — головки для захватов и участки плавного перехода размеров от расчетной части до головок. Форма головки зависит от конструкции захватов.

Все многообразие испытательных машин [5, 19, 20] характеризуется наличием трех основных устройств: создающего усилие (обычно гидравлический пресс с электрическим приводом, реже — механизмы рычажного нагружения); силовизмерительного — для регистрации приложенной нагрузки (манометр со шкалой, приводящей давление сжимаемой жидкости к усилию в образце); опорного приспособления для установки или закрепления испытуемых образцов. Принципиальная схема машины для испытания на разрыв показана на рис. 1.3.

Диаграммы напряжений

Нагрузка, вызывающая растяжение или сжатие, прикладывается статически и увеличивается ступенями. При каждом увеличении нагрузки отмечаются абсолютные удлинения образца. График зависимости удлинений от нагрузки называется диаграммой растяжения. Обычно строят графики в системе координат $\left(\sigma = \frac{P}{F_0}; \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}\right)$, деля усилие на начальную площадь сечения образца, а абсолютное удлинение на длину рабочей части. Полученный таким путем график называют диаграммой напряжений. Последняя определяет условные напряжения и имеет 5 характерных точек (рис. 1.4; 1.5).

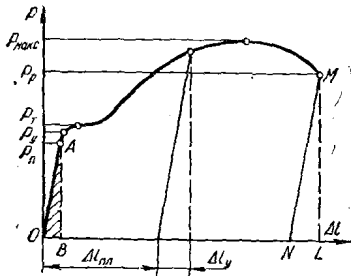


Рис. 1.4.

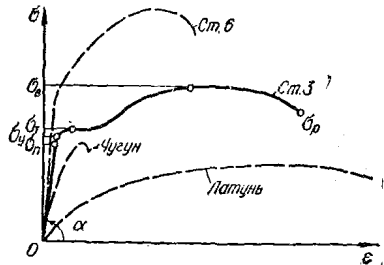


Рис. 1.5.

1. **Предел пропорциональности** $\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$ — наибольшее напряжение, до которого практически сохраняется прямая пропорциональная зависимость между напряжениями и деформациями, выражающаяся законом Гука. В пределах пропорциональности деформации пропорциональны усилиям:

$$\Delta l = \alpha P.$$

Коэффициент α в пределах пропорциональности — постоянная величина, равная $\frac{l}{EF}$, м/Н (см/кгс).

Модуль упругости E также определяют опытным путем при испытании стандартного образца на растяжение с изменением величины F_0 , P , l_0 , Δl .

По закону Гука можно записать $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P}{F_0} \cdot \frac{l_0}{\Delta l}$. Тангенс угла наклона касательной, проведенной к диаграмме напряжений, численно выражает величину модуля упругости (угол α на рис. 1.5).

2. **Предел упругости** $\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}$ — напряжение, при котором остаточные удлинения достигают некоторой малой величины, устанавливаемой техническими условиями (например 0,001; 0,01% и т. д.). Иногда предел упругости обозначается соответственно допуску $\sigma_{0,001}$; $\sigma_{0,1}$ и т. д.

3. **Предел текучести** $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$ — напряжение при текучести материала (деформации растут без заметного увеличения нагрузки). При этом по всему объему испытуемого материала происходит частичный разрыв внутренних связей, препятствующих остаточным сдвигам. Материал полностью не разрушается, но его начальные геометрические размеры изменяются в необратимой форме. На отшлифованной поверхности образца наблюдаются фигуры текучести — линии сдвигов (открытые проф. В. Д. Черновым). Для различных металлов углы наклона этих линий различны, но лежат в пределах 40—50°. Часть накапливаемой потенциальной энергии необратимо расходуется на частичный разрыв внутренних связей. При испытании на растяжение различают верхний и нижний пределы текучести — соответственно наибольшее и наименьшее из напряжений, при которых возрастает остаточная деформация при почти постоянной величине действующей нагрузки.

Таблица 1.3. Ориентировочные пределы прочности некоторых материалов

Материал	σ_B , МПа	Материал	σ_B , МПа
Растяжение			
Сталь:		Стекло	600—1200
Ст.2	340—420	Базальт	250—320
Ст.3	380—470	Гранит	120—260
Ст.4	420—520	Мрамор	100—180
Ст.5	500—620	Песчаник	70—90
Ст.6	600—720	Известняк:	
легированная хромистая	800	плотный	100—150
хромоникель-молибде-	1000	пористый	20—50
новая		Высокопрочный гипс	
Латунь	320—600	(возраст 1 сутки)	20
Бронза	200—600	Кирпич	7—30
Дюралюминий	180—500	Кирпич из шлака	2—10
Сжатие		Каменная кладка на растворе	2,5—9
Чугун серый:		Бетон:	
СЧ 15—32	650	литой	11
СЧ 21—40	750	мягкий	23
СЧ 24—44	850	прочный	48
СЧ 38—48	1000		
СЧ 32—52	1100		
СЧ 35—56	1200		
СЧ 38—60	1300		

Примечание. Прочность бетона зависит от его состава, консистенции и возраста

Таблица 1.4. Ориентировочные пределы прочности некоторых пластмасс

Материал	Предел прочности, МПа		Материал	Предел прочности, МПа	
	на растяжение	на сжатие		на растяжение	на сжатие
Винипласт	50		Текстолит	85—100	130—250
Полиэтилен	65		Гетинакс	150—170	150—180
Бакелит	20—30	80—100	Бакелизованная фанера	130	115
Целлулоид	50—70	—			

Таблица 1.5. Ориентировочные пределы прочности на растяжение σ_B для волокон

Волокно	σ_B , МПа	Волокно	σ_B , МПа
Хлопок	376	Пенька	450
Шерсть	109	Манильская пенька	477
Шелк-сырец	448	Копра	292
Лен	352	Растительный шелк	355
Джут	287	Рапи	287

Таблица 1.6. Ориентировочные пределы прочности древесины

Порода леса	Предел прочности, МПа		
	на статический изгиб	на скалывание	на сжатие вдоль волокон
Сосна	50,0—115,0	6,5—9,5	25,0—62,5
Сосна сибирская	28,6—115,0	—	16,2—50,0
Ель	52,4—101,0	—	31,8—56,5
Пихта кавказская	53,4—107,8	4,5—9,0	28,2—55,0
Кедр сибирский	39,8—70,1	—	25,6—40,8
Лиственница	80,0—125,0	7,7—10,0	41,4—67,0
Береза	60,6—114,4	9,1—15,4	31,5—62,0
Каштан кавказский	60,8—89,1	7,4—10,1	34,3—49,0
Тополь	45,7—89,6	6,5—9,5	38,4—54,7
Ильм дальневосточный	55,7—122,3	—	28,0—56,4
Акация	90,3—151,2	—	46,5—71,5
Бук кавказский	81,0—148,0	12,3—14,5	43,2—82,0
Ясень украинский	70,0—170,0	—	37,5—72,5
Дуб	77,0—130,0	—	42,5—65,0
Липа	47,8—83,9	—	25,9—46,3

Некоторые материалы не имеют выраженной площадки текучести. Для них за условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ принимается напряжение, при котором остаточное удлинение образца достигает $\epsilon_0 \approx 0,2\%$.

4. С дальнейшим ростом нагрузки материал вновь обретает способность сопротивляться. При максимальном усилии $P_{\max}$ начинается полное разрушение внутренних связей материала. При этом пластические деформации концентрируются в одном месте, образуя в образце так называемую

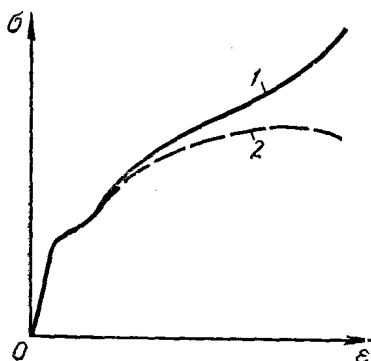


Рис. 1.6.

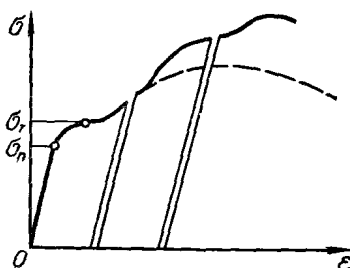


Рис. 1.7.

шейку. Напряжение при максимальной нагрузке называется пределом прочности и обозначается σ_B

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}.$$

В таблицах 1.3—1.6 приведены ориентировочные величины пределов прочности.

5. Одной из механических характеристик металлов является относительное сужение «шейки», выражаемое в процентах:

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100,$$

где F_0 и F — площади поперечного сечения образца до деформации и «шейки». Чем больше ψ , тем более выражены пластические свойства материала.

Для окончательного разрушения образца уже не требуется такая большая нагрузка (так как в «шейке» поперечное сечение значительно меньше), поэтому разрыв происходит при нагрузке несколько меньшей $P_{\text{макс}}$.

Если сложить разорванные части образца и измерить его удлинение, то обнаружится, что оно меньше, чем удлинение на диаграмме. После разрыва упругое удлинение исчезло и осталось только пластическое. Величина этого пластического удлинения является важной характеристикой механических свойств материала.

На рассмотренной диаграмме отмечаются условные напряжения путем деления соответствующей силы на начальную площадь поперечного сечения образца. Так как поперечное сечение уменьшается при возрастании нагрузки, то действительные напряжения в материале растут вплоть до его разрушения. Это наглядно видно на диаграмме истинных напряжений (рис. 1.6), на которой по оси ординат откладываются действительные напряжения в каждый момент времени, полученные делением данного усилия на площадь поперечного сечения образца в данный момент (на рис. 1.6 показаны диаграммы истинных (1) и условных (2) напряжений малоуглеродистой стали).

За пределами упругости, вплоть до разрушения, полная деформация состоит из упругой и пластической составляющих. Если довести материал до напряжений, превышающих предел текучести, и разгрузить его, в нем останутся пластические деформации. При повторном нагружении предел упругости станет выше. Этот процесс можно повторять, все повышая прочностные свойства материала. Такое изменение свойств материала, получаемое путем повторных статических нагружений, называется наклепом. При повышении прочности металла путем наклепа теряются его пластические свойства (увеличивается хрупкость), поэтому полезным можно считать лишь небольшой наклеп. На рис. 1.7 изображен общий вид диаграммы напряжений при наклепе, где наклонные прямые соответствуют разгрузке и повторным нагружениям.

Работа деформации

Прочность материала тем выше, чем больше внутренние силы взаимодействия частиц. Поэтому величина сопротивления разрыву, отнесенная к единице объема материала, может служить характеристикой его прочности. В этом смысле предел прочности не является исчерпывающей характеристикой прочностных свойств данного материала. При разрыве разрушаются взаимосвязи по всей площади сечения, а при сдвигах, которые сопутствуют всякой остаточной деформации, — только местные взаимосвязи. На разрушение их затрачивается определенная работа внутренних сил взаимодействия, которая равна работе внешних сил на перемещениях:

$$A = \frac{1}{2} P \Delta l. \quad (1.5)$$

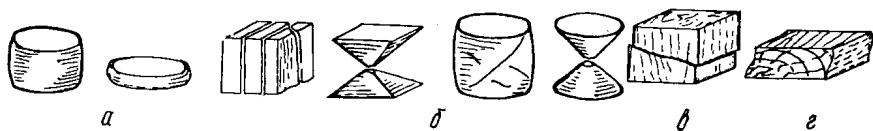


Рис. 1.8.

Здесь коэффициент $1/2$ — результат статического действия нагрузки, возрастающей от 0 до P в момент ее приложения (среднее значение $\frac{0+P}{2}$). В момент разрыва упругая составляющая деформации мгновенно исчезает. При упругой деформации работа сил определяется площадью треугольника OAB (см. рис. 1.4). Полная работа, затраченная на деформацию образца и его разрушение,

$$A = \eta P_{\text{макс}} \Delta l_{\text{макс}}, \quad (1.6)$$

где η — коэффициент полноты диаграммы, равный отношению площади всей диаграммы, ограниченной кривой OAM и прямыми OA , MN и ON , к площади прямоугольника со сторонами $OP_{\text{макс}}$ и $\Delta l_{\text{макс}}$. При этом надо вычесть работу, определяемую площадью треугольника MNL . Работа, затрачиваемая на деформацию и разрушение об-

разца, является одной из важнейших характеристик материала, определяющих его степень хрупкости.

Деформация сжатия протекает подобно растяжению: сначала наблюдаются упругие деформации, к которым впоследствии, за пределом упругости, присоединяются пластические. Характер деформации и разрушения при сжатии показан на рис. 1.8: *а* — для пластических материалов; *б* — для хрупких; *в* — для дерева вдоль волокон и *г* — для дерева поперек волокон. Испытания на сжатие менее удобны для установления механических свойств пластических материалов из-за трудности фиксирования момента разрушения. Согласно ГОСТ 25503—80 испытанием на сжатие определяют механические характеристики только хрупких материалов. При этом определению подлежит лишь предел прочности. На рис. 1.9 показаны диаграммы напряжений при сжатии: *а* — чугуна, *б* — дерева. При испытании на сжатие формы образца и его размеры могут быть различными (табл. 1.7).

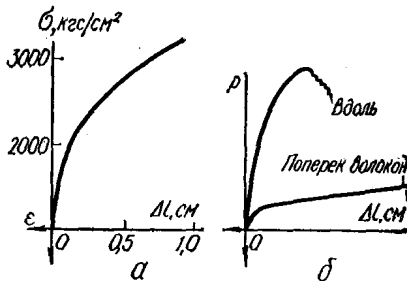


Рис. 1.9.

Если материал выдерживают под нагрузкой при постоянном напряжении, то к упругой деформации, развившейся практически одновременно с нарастанием нагрузки, со временем прибавляется еще добавочная упругая деформация. При снятии нагрузки и нулевом напряжении упругая деформация, нараставшая одновременно

Таблица 1.7. Нормальные размеры образцов для испытания на сжатие

Материал	Размер образца, см
Чугун: кубик цилиндр	$2 \times 2 \times 2$ или $3 \times 3 \times 3$ $d = h = 2$
Камни: естественные (кубики) цементные	$7 \times 7 \times 7$ $7 \times 7 \times 7$
Бетон	$20 \times 20 \times 20$ или $30 \times 30 \times 30$
Кирпич (распиленный пополам)	$12 \times 12 \times 6$

с увеличением нагрузки, исчезает одновременно с исчезновением напряжений, а добавочная — медленнее.

Образовавшаяся добавочная упругая деформация при постоянном напряжении, которая исчезает не сразу после разгрузки, называется упругим последствием (см. главу 12).

Изменение механических свойств материалов под влиянием температуры

Механические свойства материалов зависят не только от абсолютной величины температуры, но и от продолжительности ее действия. Для большинства материалов при нагреве механические характеристики (σ_p , σ_T и σ_B) уменьшаются с проявлением пластичности, а при снижении температуры увеличиваются с повышением хрупкости. При нагреве уменьшается модуль продольной упругости E , а коэффициент Пуассона μ — увеличивается. При снижении температуры наблюдается обратное явление. Но некоторые материалы представляют исключение из этих правил. На рисунке 1.10 показаны графики зависимости механических характеристик углеродистой стали от температуры.

При нагревании цветных металлов и сплавов из них их прочность сразу падает и при температуре, близкой к 600°C , практически теряется. Исключение составляет

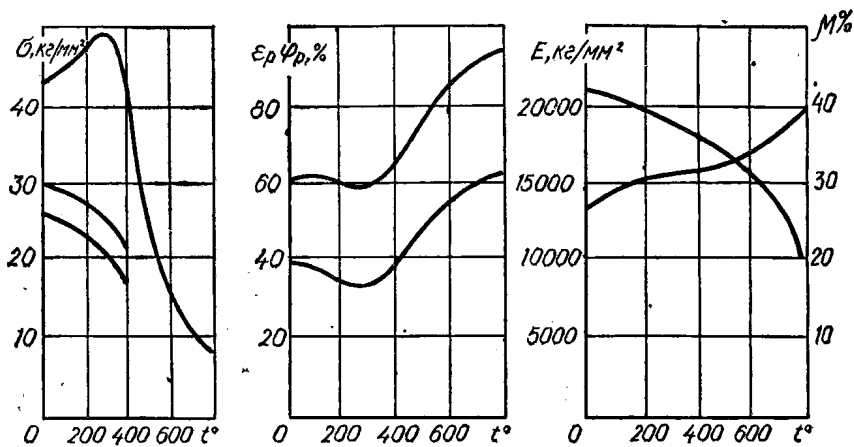


Рис. 1.10.

алюмотермический хром, предел прочности которого с увеличением температуры увеличивается и при температуре равной 1100°C достигает максимума $\sigma_{1100} = 2\sigma_{20}$.

Характеристики пластичности меди, медных сплавов и магния с ростом температуры уменьшаются, а алюминия — увеличиваются. При нагреве пластмасс и резины их предел прочности резко снижается, а при охлаждении эти материалы становятся очень хрупкими.

Влияние радиоактивного облучения

Радиоактивное облучение по-разному сказывается в различных материалах. Облучение неорганических материалов по своему влиянию на механические характеристики и характеристики пластичности аналогично понижению температуры: с увеличением дозы радиоактивного облучения увеличивается предел прочности и особенно предел текучести, а характеристики пластичности (δ , ψ) снижаются.

Облучение пластмасс также приводит к увеличению хрупкости, причем на предел прочности этих материалов облучение оказывает различное влияние: на некоторых пластмассах оно почти не сказывается (полиэтилен), у других вызывает значительное понижение (катамен), а в третьих — повышение (селектрон) предела прочности [11].

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

В расчетах на прочность, жесткость и устойчивость ставится требование, чтобы действительное напряженно-деформированное состояние системы (конструкции, элемента или детали машины) в условиях эксплуатации не соответствовало бы опасному состоянию. Это достигается введением коэффициентов запаса. Величины коэффициентов запаса зависят прежде всего от степени соответствия принятых предположений о расчетной схеме действительным условиям работы и должны учитывать возможное отступление эксплуатационных нагрузок от расчетных, неизбежный разброс в экспериментальном определении величин опасных напряжений, неточность принятых методов расчета, неточность изготовления деталей, степень однородности материала, класс сооружения, экономию материала и др.

При расчете на сопротивление пластическим деформациям допускаются более низкие запасы прочности в связи с тем, что образование остаточных деформаций еще не приводит конструкцию к окончательному разрушению. При расчете на сопротивление хрупкому статическому разрушению запасы прочности повышаются в силу опасности таких разрушений, из-за неоднородности материала и т. д. При расчете на усталость запасы прочности выбирают в зависимости от достоверности определения усилий и напряжений, уровня технологии изготовления и т. д. (см. гл. 11).

Существует три методики расчета конструкций и деталей машин на силовые воздействия: по допускаемым напряжениям, по разрушающим нагрузкам и по предельным состояниям.

Методика расчета по допускаемым напряжениям основана на представлении об упругой работе материала. Гарантия «допускаемых» условий эксплуатации достигается путем введения одного коэффициента запаса по напряжениям, который должен учитывать все факторы, изложенные выше (подробнее см. ниже).

В СССР методикой расчета по допускаемым напряжениям пользовались для расчета железобетонных конструкций до 1938 г., металлических и деревянных — до 1955 г.

Методика расчета по разрушающим нагрузкам исходит из учета пластической стадии работы материалов в отдельных элементах или сечениях конструкции. Рассматривая схему разрушения, определяют нагрузку (так называемую разрушающую), соответствующую полному исчерпанию несущей способности системы. Условие расчета состоит в том, что эксплуатационная нагрузка должна быть меньше (или равна) разрушающей, деленной на коэффициент запаса прочности. Методика применялась в СССР для расчета железобетонных конструкций с 1938 до 1955 г., каменных — с 1943 до 1955 г.

Методика расчета по предельным состояниям разработана советскими специалистами как дальнейшее развитие идеи расчета по разрушающим нагрузкам. Особенность методики состоит в том, что исходят из некоторого расчетного предельного состояния, а один коэффициент запаса заменяется системой расчетных коэффициентов: по напряжениям, по нагрузкам и по условиям возведения и эксплуатации конструкции.

Расчет по допускаемым напряжениям

В основе методики расчета по допускаемым напряжениям лежит сравнение расчетных напряжений с так называемыми допускаемыми.

Допускаемые напряжения определяются как опасные, деленные на коэффициент запаса:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_0}{k}; \quad [\tau] = \frac{\tau_0}{k}. \quad (1.7)$$

Для пластических материалов опасное состояние характеризуется появлением значительных остаточных деформаций и опасным напряжением считается предел

Таблица 1.8. Ориентировочные значения основных допускаемых напряжений

Материал	Допускаемое напряжение, МПа		Материал	Допускаемое напряжение, МПа	
	на растяжение	на сжатие		на растяжение	на сжатие
Чугун серый в отливках	28—80	120—150	Алюминий	30—80	
Сталь ОС и Ст.2		140	Дюралюминий	80—150	
Ст.3		160	Текстолит	30—40	
Ст.3 в мостах		140	Гетинакс	50—70	
Сталь углеродистая конструкционная в машиностроении		60—250	Бакелизированная фанера	40—50	
Сталь легированная конструкционная в машиностроении		100—400 и выше	Сосна вдоль волокон	7—10	10—12
Медь		30—120	То же, поперек	—	1,5—2
Латунь		70—140	Дуб вдоль волокон	9—13	13—15
Бронза		60—120	То же, поперек	—	2—3,5
			Каменная кладка	До 0,3	0,4—4
			Кирпичная	До 0,2	0,6—2,5
			Бетон	0,2—1,4	2—24

текучести. Тогда:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_r}{k_1}, [\tau] = \frac{\tau_r}{k_1}. \quad (1.8)$$

Для элементов конструкций или деталей машин, выполненных из хрупких материалов, опасное состояние определяется появлением трещин. За опасное напряжение принимается предел прочности

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{k_2}. \quad (1.9)$$

Таблица 1.9. Допускаемые напряжения для углеродистых сталей обыкновенного качества в горячекатаном состоянии при статической нагрузке

Марка стали (ГОСТ 380-71)	Допускаемые напряжения, МПа (кгс/см²), при				
	растяжении [σ_p]	изгибе [$\sigma_{из}$]	кручении [$\tau_{кр}$]	срезе [$\tau_{ср}$]	смятии [$\sigma_{см}$]
Ст. 2	115 (1150)	140 (1400)	85 (850)	70 (700)	175 (1750)
Ст. 3	125 (1250)	150 (1500)	95 (950)	75 (750)	190 (1900)
Ст. 4	140 (1400)	170 (1700)	105 (1050)	85 (850)	210 (2100)
Ст. 5	165 (1650)	200 (2000)	125 (1250)	100 (1000)	250 (2500)
Ст. 6	195 (1950)	230 (2300)	145 (1450)	115 (1150)	290 (2900)

При повторно-переменных нагрузках опасное состояние связано с появлением усталостных трещин, поэтому опасным напряжением считается предел выносливости (подробнее см. главу 11)

$$[\sigma] = \frac{\sigma_r}{k_3}. \quad (1.10)$$

Величины допускаемых напряжений при растяжении [σ_p] и при кручении тонкостенных стержней [$\tau_{кр}$] для сталей определяются по формулам (1.8).

Особенности работы элемента или конструкции могут учитываться введением коэффициентов снижения основных допускаемых напряжений, ориентировочные значения которых приведены в табл. 1.8.

В машиностроении для определения допускаемых напряжений применяют следующие основные методы.

1. Дифференцированный — запас прочности находят как произведение коэффициентов, учитывающих качество материала, точность метода расчета, степень ответственности детали и другие факторы, определяющие условия работы детали.

2. Табличный — допускаемые напряжения принимают по действующим нормам (по таблицам).

Второй метод менее точен, но более прост, поэтому он нашел более широкое применение в практике проектирования, особенно — в проверочных прочностных расчетах.

В табл. 1.9 приведены некоторые допускаемые напряжения, принимаемые в машиностроении.

Методика расчета по предельным состояниям

Сущность методики расчета по предельным состояниям заключается в назначении таких условий работы конструкции, при которых исключалась бы возможность наступления расчетного предельного состояния.

Под расчетным предельным состоянием понимают такое состояние конструкции, при котором она теряет способность сопротивляться внешним воздействиям или перестает удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям.

Различают две группы расчетных предельных состояний.

Первая группа — по потере несущей способности из-за хрупкого, вязкого или усталостного разрушения, а также из-за потери устойчивости формы или положения некоторых элементов или всей конструкции в целом.