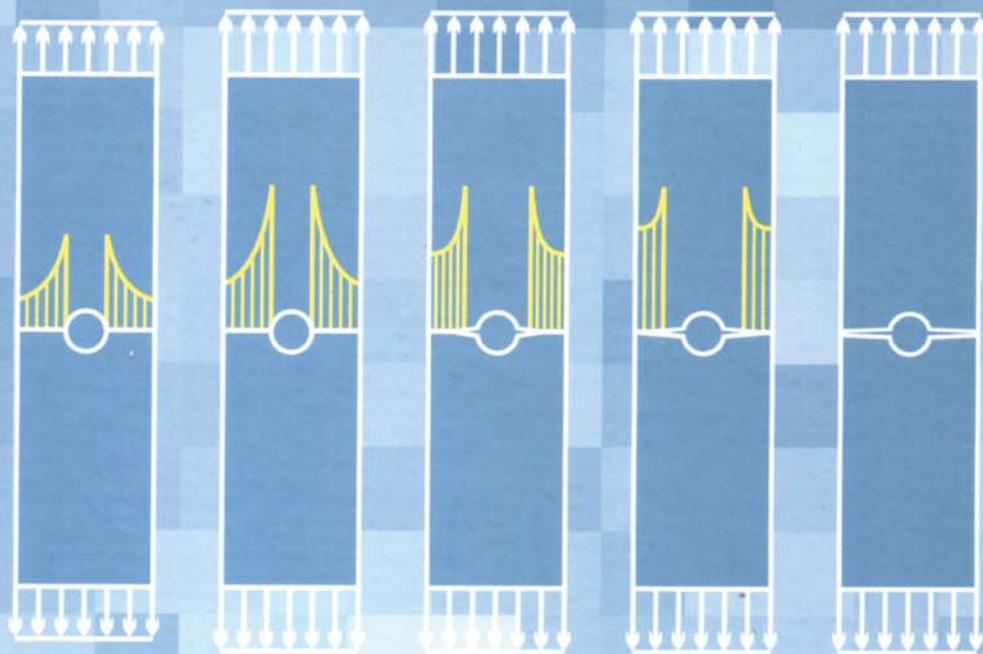




П. И. Бегун

О. П. Кормилицын

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА



Электронный аналог печатного издания: Бегун П. И., Кормилицын О. П. Прикладная механика : учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Политехника, 2006. — 463 с. : ил.

УДК 539.3
ББК 22.2я73
Б37



ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Санкт-Петербург 2012

www.polytechnics.ru

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России»

Рецензенты: кафедра теоретической и прикладной механики Санкт-Петербургского государственного университета и доктор технических наук Ю. Л. Рутман

Бегун, П. И., Кормилицын, О. П.

Б37 Прикладная механика : учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Политехника, 2012. — 463 с. : ил.

ISBN 5-7325-0859-7

В учебнике изложен курс прикладной механики, рассчитанный на один семестр обучения при подготовке бакалавров и инженеров по направлениям: приборостроение, электроника, автоматизация и управление. Освещаются вопросы построения расчетных схем и математических моделей реальных конструкций и анализа прочности и жесткости конструкций техники при различных внешних воздействиях.

Второе издание дополнено разделами «Физическое моделирование элементов конструкций» и темой «Кинематический анализ манипуляторов».

УДК 539.3
ББК 22.2я73

ISBN 5-7325-0859-7 © П. И. Бегун, О. П. Кормилицын, 2006
© Издательство «Политехника», 2012

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

1.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Приборы, системы, механизмы электронной аппаратуры имеют конструктивное оформление, основное функциональное назначение которого — защита от внешних воздействий и обеспечение надежной работы. Форма и размеры деталей конструкций и механизмов зависят, с одной стороны, от их функционального назначения, с другой — от материала, из которого они изготовлены, а также от характера внешних воздействий.

Изменение формы и размеров конструкции или ее элементов в результате внешнего воздействия называется деформацией.

Конструкция считается надежной, если она сохраняет прочность, жесткость и устойчивость при различных внешних воздействиях.

Под прочностью понимают способность конструкции или отдельных ее элементов выдерживать заданную нагрузку, не разрушаясь и не проявляя остаточных деформаций.

Жесткостью называют способность конструкции сопротивляться образованию деформаций, не превышающих допустимых значений.

Устойчивость — это способность конструкции противостоять воздействиям, стремящимся вывести ее из исходного состояния статического или динамического равновесия.

Основная задача прикладной механики заключается в разработке методов конструирования и расчета прочности, жесткости и устойчивости элементов конструкций и механизмов, гарантирующих их надежную работу. Причем важнейшей стадией анализа прочностных характеристик конструкции является построение расчетной схемы, адекватной реальной конструкции, а также внешним воздействиям, которые она испытывает.

Элементы конструкции или конструкция в целом рассматриваются в прикладной механике как твердое тело, однако, в отличие от теоретической механики, где рассматривается абсолютно твердое тело, здесь вводятся новые понятия, связанные со способностью реальных твердых тел под внешним воздействием изменять свои форму и размеры.

1.2. ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ (СИЛА)

При рассмотрении элемента конструкции (в дальнейшем будем называть его телом) изолированно от окружающих тел действие последних на него заменяют в н е ш н и м и с и л а м и. Внешняя сила — мера воздействия физических объектов.

По времени действия внешние силы можно разделить на п о с т о я н н ы е, действующие все время существования изделия, и в р е м е н н ы е, действующие лишь в течение некоторого промежутка времени.

По характеру действия они бывают статическими и динамическими. С т а т и ч е с к и е силы сообщают как всему изделию, так и отдельному его элементу малые ускорения, которыми можно пренебречь при исследовании. Д и н а м и ч е с к и е силы придают значительные ускорения, которыми пренебрегать не следует.

Если конечное изменение внешней силы и скорости тела, передающего силу, происходит в очень короткий промежуток времени, динамическая сила называется у д а р н о й.

Встречаются динамические силы, характеризующиеся периодическими изменениями абсолютного значения в зависимости от времени (в частности, по гармоническому закону). Под влиянием такой силы могут возникать колебания (вибрации) тела.

Внешние силы можно классифицировать еще и по месту их приложения к телу. По этому признаку они подразделяются на объемные и поверхностные.

О б ъ е м н ы е силы распределены по всему объему, занятому телом. Единица объемной силы — ньютон на кубический метр (Н/м^3). Рассмотрим некоторое тело (рис. 1.1). Выде-

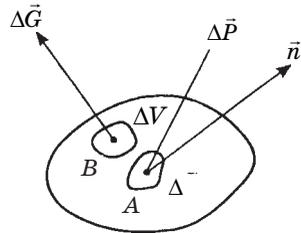


Рис. 1.1

лим в нем элементарный объем ΔV , на который действует объемная сила $\Delta \vec{G}$. Среднее значение этой силы находим по формуле

$$\bar{g}_c = \frac{\Delta \vec{G}}{\Delta V}.$$

Значение объемной силы в окрестности точки B равно

$$\bar{g} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{G}}{\Delta V}.$$

Объемную силу можно разложить по координатным осям x, y, z на составляющие g_x, g_y, g_z .

П о в е р х н о с т н ы е силы распределены по поверхности. Единица поверхностной силы — ньютон на квадратный метр ($\text{Н}/\text{м}^2$). Выделим в некотором теле на его поверхности элементарную площадку ΔF (см. рис. 1.1). Обозначим через $\Delta \vec{P}$ поверхностную силу, действующую на данной элементарной площадке. Среднее значение поверхностной силы определяется по формуле

$$\bar{p}_c = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta F}.$$

Значение поверхностной силы в окрестности точки A определяет выражение

$$\bar{p} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta F}.$$

Поверхностную силу можно разложить по координатным осям x, y, z на составляющие p_x, p_y, p_z .

Если поверхность соприкосновения очень узкая, то можно считать, что сила распределена по линии — р а с п р е д е л е н н а я сила. Единица измерения распределенной силы — ньютон на метр ($\text{Н}/\text{м}$).

Если площадка, на которой действует поверхностная сила, мала по сравнению с поверхностью всего тела, то поверхностную силу можно считать с о с р е д о т о ч е н н о й в точке тела. Единица сосредоточенной силы — ньютон (Н).

Механическую величину, характеризующую внешнее воздействие на тело и определяющую изменение его вращательного движения, называют м о м е н т о м с и л ы. Относительно полюса (точки) O (рис. 1.2) это вектор \vec{M}_r , равный векторному произведению радиуса-вектора \vec{r} , прове-

денного из полюса O в точку приложения силы, на вектор силы \vec{P} . Момент силы подсчитывают по формуле

$$\vec{M} = \vec{P}\vec{r} \sin \alpha = \vec{P}l,$$

где α — угол между векторами \vec{r} и \vec{P} ; $l = \vec{r} \sin \alpha$ — плечо силы, равное расстоянию от точки O до линии действия силы.

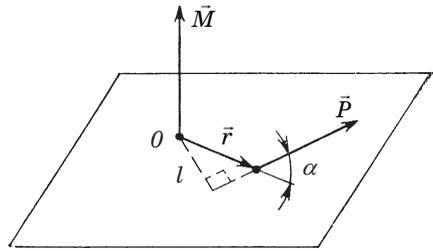


Рис. 1.2

Момент силы относительно оси есть скалярная величина, равная проекции вектора момента силы (M) на ось относительно любой точки O оси (местоположение точки O на оси не влияет на значение момента силы относительно оси). Моменты силы относительно полюса складывают геометрически, а относительно оси — алгебраически. Единица момента силы — ньютон-метр ($\text{Н} \cdot \text{м}$).

1.3. ВНУТРЕННИЕ СИЛЫ. НАПРЯЖЕНИЯ

Изменение сил взаимодействия между частицами тела вследствие деформации называют внутренними силами, сопровождающими деформацию.

В прикладной механике введено допущение, что тело обладает сплошностью. Для выявления и вычисления внутренних сил применяют метод сечений. Рассмотрим произвольное тело (рис. 1.3), нагруженное системой сил. Мысленно разрежем его

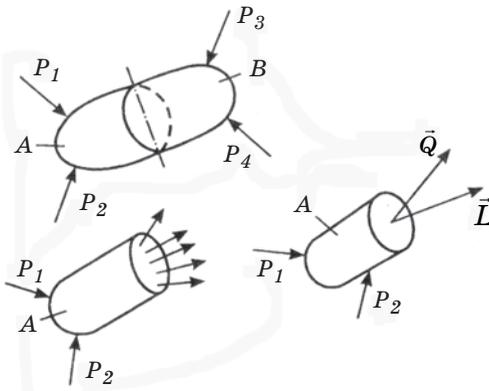


Рис. 1.3

некоторой плоскостью на две части A и B . В точке с обеих сторон сечения будут действовать силы взаимодействия. В зависимости от формы тела и характера приложенных внешних сил интенсивность внутренних сил в различных точках сечения может быть различна. В соответствии с третьим законом Ньютона си-

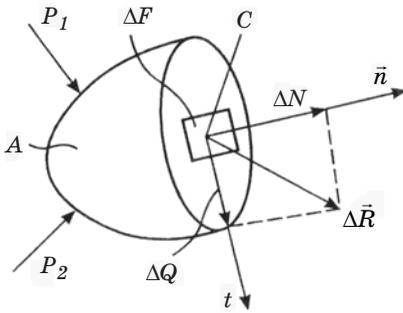


Рис. 1.4

стороне сечения получим главный вектор внутренних сил \vec{Q} и вектор главного момента внутренних сил \vec{L} . Для того чтобы характеризовать закон распределения внутренних сил по сечению, необходимо ввести для них числовую меру. За такую меру принимается **напряжение**.

Рассмотрим сечение A некоторого тела (рис. 1.4). В окрестности точки C выделим элементарную площадку ΔF (\vec{n} — нормаль к площади сечения). Пусть $\Delta \vec{R}$ — равнодействующая внутренних сил на площадке ΔF

$$\lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{R}}{\Delta F} = \vec{\sigma}_n,$$

где $\vec{\sigma}_n$ — полное напряжение в окрестности точки C на площадке с нормалью \vec{n} . Единица напряжения — паскаль (Па).

Как равнодействующую внутренних сил $\Delta \vec{R}$, так и полное напряжение $\vec{\sigma}_n$ можно разложить на составляющие. Равнодействующую внутренних сил разложим на составляющие ΔN , направленную по нормали к площадке, и ΔQ , касательную к площадке. Полное напряжение разложим на нормальное напряжение, действующее в окрестности точки C на площадке с нормалью \vec{n} ,

$$\sigma_n = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta F}$$

и касательное напряжение, действующее в окрестности точки C на площадке с нормалью \vec{n} по направлению \vec{t} ,

$$\tau_{nt} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta F}.$$

лы, которые действуют по сечению, принадлежащему части тела A , равны по величине и противоположны по направлению внутренним силам, которые действуют по сечению, принадлежащему части тела B .

Внутренние силы, действующие в сечении, можно привести к одной точке (обычно к центру тяжести сечения), в результате чего на каждой

Касательное напряжение имеет два индекса — нормали и касательной к площадке.

Рассмотрим площадку с нормалью \vec{n} , взятую в окрестности некоторой точки деформируемого тела (рис. 1.5, а). Полное напряжение в общем случае не совпадает с направлением нормали. Его проекции на направление нормали \vec{n} и касательной обозначим соответственно σ_n и τ_{nt} , тогда

$$|\sigma_n|^2 = \sigma_n^2 + \tau_{nt}^2.$$

Если известны проекции σ_{nx} , σ_{ny} , σ_{nz} на координатные оси x , y , z полного напряжения, действующего на площадке (рис. 1.5, б), то оно может быть выражено так:

$$|\sigma_n|^2 = \sigma_{nx}^2 + \sigma_{ny}^2 + \sigma_{nz}^2.$$

Если нормаль к площадке составляет с координатными осями x , y , z углы α , β , γ , то нормальную составляющую напряжений σ_n можно найти через проекции полного напряжения на координатные оси x , y , z (см. рис. 1.5):

$$\sigma_n = \sigma_{nx} \cos \alpha + \sigma_{ny} \cos \beta + \sigma_{nz} \cos \gamma.$$

При повороте площадки напряжение изменяется.

Для полной характеристики напряженного состояния в окрестности точки тела необходимо знать напряжения на трех взаимно перпендикулярных площадках, проведенных через эту точку (рис. 1.5, в—з).

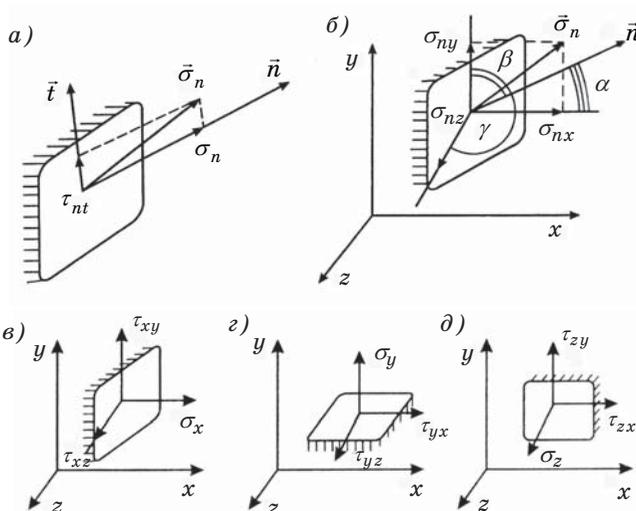


Рис. 1.5

На рис. 1.5, *в* площадка перпендикулярна к оси x . Нормальное напряжение σ_x на этой площадке параллельно оси x , а касательные τ_{xy} , τ_{xz} — параллельны осям y и z соответственно.

На рис. 1.5, *г* площадка перпендикулярна к оси y . Нормальное напряжение σ_y здесь параллельно оси y , а касательные τ_{yx} , τ_{yz} — осям x , z .

На рис. 1.5, *д* площадка перпендикулярна к оси z . Нормальное напряжение σ_z здесь параллельно оси z , а касательные τ_{zx} , τ_{zy} — осям x , y .

Девять напряжений σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{zy} — составляющие полных напряжений, действующих на трех ортогональных площадках, которые проходят в окрестности некоторой точки твердого деформированного тела, подчиняются п р а в и л у з н а к о в, которое гласит:

Если внешняя нормаль к площадке совпадает с положительным направлением оси координат, то положительные составляющие напряжений направлены в положительную сторону осей координат. Если внешняя нормаль к сечению направлена в сторону, противоположную положительному направлению оси координат, то положительные составляющие напряжений направлены в стороны, противоположные соответствующим направлениям осей координат.

Напряженное состояние в окрестности тела характеризуется девятью составляющими напряжений, которые обычно записывают в виде тензора напряжений

$$T = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix},$$

и называют компонентами тензора.

Тензор — это форма записи, выражающая линейное преобразование трехмерного пространства в некоторой системе координат. Число компонент тензора определяет его ранг.

1.4. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Тело под воздействием прикладываемых к нему сил меняет свои форму и размеры — деформируется. При этом изменяется относительное расположение отдельных его частиц, вследствие их перемещения в пространстве.

Если рассматривать абсолютно жесткое тело, как это делается в теоретической механике, то при перемещении точек тела не меняется их взаимное расположение, т. е. тело не деформируется.

Итак, перемещения не всегда сопровождаются деформацией. Однако деформация тела невозможна без перемещений его точек.

Выделим в твердом теле точку A (рис. 1.6, a). Пусть под действием внешних сил эта точка займет положение B . Отрезок AB называют вектором полного упругого перемещения и обозначают \vec{u} . Проекции вектора полного упругого перемещения на оси декартовой системы координат x, y, z обозначают соответственно u_x, u_y, u_z и называют составляющими перемещений этой точки.

Деформация считается упругой, если исчезает после устранения вызвавшей ее силы, и остаточной — в противном случае. Свойство элемента конструкции проявлять упругую деформацию называют упругостью, остаточную деформацию — пластичностью.

Свойства упругости и пластичности являются относительными, а не абсолютными. Например, одна и та же стальная пластина в зависимости от приложенной силы может после сгиба выпрямиться полностью либо получить

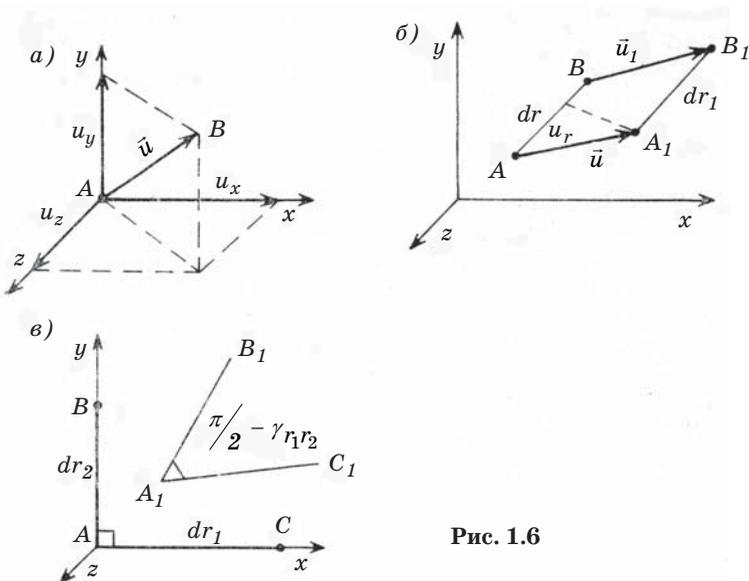


Рис. 1.6

прогиб, который полностью не исчезнет после устранения силы. Значит, при малых деформациях она упруга, а при больших — пластична.

В прикладной механике деформация — количественная мера изменения размеров в окрестности точки. Различают два вида деформации тела: относительное удлинение в окрестности точки и относительный сдвиг.

Относительную линейную деформацию (рис. 1.6, б) характеризует величина $\varepsilon_r = (d_{r1} - d_r)/d_r$ — относительное удлинение в окрестности точки A по направлению r . Относительное удлинение будем считать положительным, если бесконечно малые отрезки увеличиваются по длине.

Чтобы раскрыть понятие относительной угловой деформации и рассмотрим прямой угол, образованный в недеформированном теле двумя отрезками AB и AC (рис. 1.6, в). После нагружения тела внешними силами этот угол изменяется, принимая значение $\pi/2 - \gamma_{r_1 r_2}$. Величину, равную изменению прямого угла после нагружения между двумя взаимно перпендикулярными направлениями называют относительным сдвигом, углом сдвига или просто сдвигом и обозначают $\gamma_{r_1 r_2}$. Относительный сдвиг считается положительным, если прямой угол уменьшается.

Относительные линейные и угловые деформации в направлении координатных осей x, y, z обозначают $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$, а изменение углов между этими отрезками: $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$. Величины $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{zy}$ называют составляющими деформации в окрестности точки деформируемого твердого тела. Составляющие деформации принято записывать в виде тензора деформации

$$D = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix}.$$

Тензор деформаций полностью характеризует деформацию тела в окрестности точки.

В пределах малых удлинений для подавляющего большинства материалов справедлив закон Гука, который

устанавливает прямую пропорциональность нормального напряжения σ_n относительному удлинению ε_n :

$$\sigma_n = E\varepsilon_n. \quad (1.2)$$

Коэффициент пропорциональности E называют м о д у л е м н о р м а л ь н о й у п р у г о с т и, а коэффициент пропорциональности касательного напряжения и относительного сдвига G — м о д у л е м у п р у г о с т и п р и с д в и г е.

Взятое по модулю отношение поперечного относительного сжатия тела к продольному относительному удлинению ν в пределах действия закона Гука называют к о э ф ф и ц и е н т о м П у а с с о н а.

Модуль нормальной упругости E , модуль упругости при сдвиге G и коэффициент Пуассона ν определяют экспериментально.

Величины E и G выражают в паскалях (Па).

Удлинение Δl твердого тела длиной l связано с воздействием температуры соотношением

$$\Delta l = \alpha l T,$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения.

Если относительное перемещение элементов изделия происходит без деформации, то такую конструкцию называют г е о м е т р и ч е с к и и з м е н я е м о й; если оно имеет место только при деформации элементов — г е о м е т р и ч е с к и н е и з м е н я е м о й.

1.5. МАССОВЫЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИИ

Сопrotивление конструкции различным видам деформации зависит не только от материала, из которого она изготовлена, ее размеров, но также и от массовых характеристик, формы поперечных сечений и их расположения относительно направления действия нагрузки, т. е. геометрических характеристик сечения.

К массовым характеристикам относятся масса тела и момент инерции тела.

М а с с а т е л а — мера его инерционных и гравитационных свойств. В прикладной механике масса тела принята равной сумме масс всех его малых частей и не зависящей от скорости его движения. Инертность тела проявля-

ется в том, что под действием внешних сил оно изменяет свое движение, постепенно приобретая конечное ускорение. Единица измерения массы — килограмм (кг).

М а с с о в ы й м о м е н т и н е р ц и и т е л а относительно оси — мера инертности тела во вращательном движении вокруг этой оси. Массовый момент инерции тела вычисляют по формуле:

$$I = \int_m r^2 dm,$$

где I — единица измерения момента инерции, килограмм-метр в квадрате ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$); r — расстояние элементарной массы до оси; dm — элементарная масса.

Величину $\sqrt{I/m}$ называют **р а д и у с о м и н е р ц и и т е л а** относительно соответствующей оси.

Основными геометрическими характеристиками сечения тела являются: площадь поперечного сечения, статический момент площади, осевой момент инерции сечения, момент сопротивления сечения, центробежный момент инерции сечения, полярный момент инерции сечения, радиус инерции.

С т а т и ч е с к и й м о м е н т S_y (S_z) площади F относительно оси y (z) (рис. 1.7, а) представляют интегралом, взятым по рассматриваемой площади:

$$S_y = \int_F z dF; S_z = \int_F y dF,$$

где y и z — координаты центра тяжести элементарной площадки; dF — элементарная площадка.

Единица измерения статического момента площади сечения — метр в кубе (м^3).

Статические моменты площади сечения относительно осей, проходящих через центр тяжести сечения (центральных осей), равны нулю.

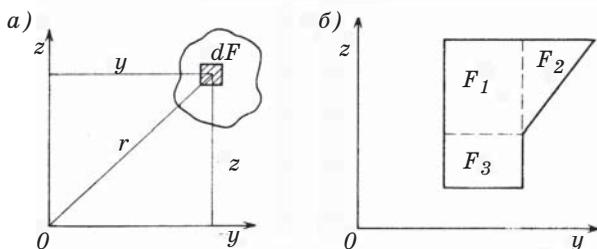


Рис. 1.7

В практических расчетах при определении статических моментов редко возникает необходимость в интегрировании. Сложное сечение разбивают на ряд простых: прямоугольник, треугольник, круг и т. д. (рис. 1.7, б). Поскольку $F = F_1 + F_2 + \dots + F_i + \dots + F_n$, пользуясь свойством определенного интеграла, можно записать:

$$S_y = \int_F z dF = \int_{F_1} z dF + \int_{F_2} z dF + \dots + \int_{F_n} z dF,$$

откуда

$$S_y = \sum_{i=1}^n S_{yi} = \sum_{i=1}^n F_i z_i.$$

Аналогично

$$S_z = \sum_{i=1}^n F_i y_i.$$

О с е в ы е м о м е н т ы и н е р ц и и с е ч е н и я I_y , I_z , ц е н т р о б е ж н ы й м о м е н т и н е р ц и и I_{yz} и п о л я р н ы й м о м е н т и н е р ц и и I_p представляют интегралы по площади

$$\begin{aligned} I_y &= \int_F z^2 dF; & I_z &= \int_F y^2 dF; \\ I_{yz} &= \int_F yz dF; & I_p &= \int_F r^2 dF, \end{aligned}$$

где r — расстояние от центра тяжести сечения элементарной площадки до начала координат.

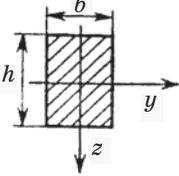
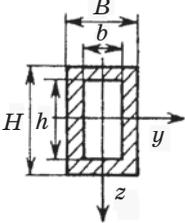
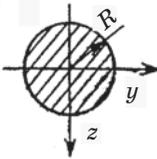
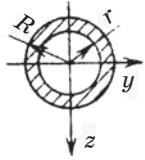
Единица измерения моментов инерции сечения — метр в четвертой степени (м^4).

Моменты инерции сечения называются ц е н т р а л ь н ы м и, если оси, относительно которых они вычислены, проходят через центр тяжести сечения.

Подынтегральные выражения осевого и полярного моментов инерции положительны при любом положении координатных осей, и поэтому эти моменты всегда больше нуля.

Центробежный момент инерции сечения I_{yz} может быть и положительным, и отрицательным, и равным нулю. Расстояние r (см. рис. 1.7, а) связано с координатами y и z центра тяжести элементарной площадки dF равенством $r^2 = y^2 + z^2$, поэтому

Т А Б Л И Ц А 1.1

Сечение	I_y	I_z
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{b^3h}{12}$
	$\frac{BH^3/12 - bh^3/12}{H/2}$	$\frac{B^3H/12 - b^3h/12}{B/2}$
	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{\pi R^4}{4}$
	$\frac{\pi R^4}{4} \left(1 - \frac{r^4}{R^4}\right)$	$\frac{\pi R^4}{4} \left(1 - \frac{r^4}{R^4}\right)$

$$I_p = \int_F r^2 dF = \int_F (y^2 + z^2) dF = \int_F y^2 dF + \int_F z^2 dF.$$

Отсюда полярный момент инерции сечения равен сумме осевых моментов инерции этого $S_p = S_z + S_y$.

Момент сопротивления сечения $W_{и}$, $W_{к}$ характеризует способность тела сопротивляться изгибу или кручению в рассматриваемом сечении. Момент сопротивления равен осевому или полярному моменту инерции, деленному на расстояние от оси (или центра тяжести сечения) до наиболее удаленной точки сечения. Единица измерения момента сопротивления сечения — метр в кубе (m^3).

Значения осевого момента инерции для наиболее часто встречающихся сечений приведены в табл. 1.1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Основные понятия прикладной механики	4
1.1. Цели и задачи	—
1.2. Внешнее воздействие (сила)	5
1.3. Внутренние силы. Напряжения	7
1.4. Перемещения и деформации	10
1.5. Массовые и геометрические характеристики конструкции	13
1.6. Механизмы	17
2. Типовые конструкции электронной техники. Материалы. Внешние воздействия	23
2.1. Типовые конструкции	—
2.2. Физико-механические характеристики материалов	35
2.2.1. Классификация материалов	—
2.2.2. Механические свойства материалов	37
2.2.3. Конструкционные материалы	53
2.2.4. Полупроводниковые и диэлектрические материалы	55
2.3. Точность изготовления деталей электронной аппаратуры	63
2.3.1. Допустимые отклонения размеров гладких элементов деталей и посадки, образуемые при соединении этих элементов	—
2.3.2. Допуски формы и расположения поверхностей	71
2.3.3. Шероховатость поверхностей	74
2.3.4. Рекомендации по выбору посадок, полей допусков и шероховатости поверхностей	77
2.4. Влияние технологии изготовления и сборки деталей узлов на механическое состояние изделий	79
2.5. Влияние испытаний и эксплуатации на состояние изделий	80
3. Моделирование. Расчетные схемы конструкций изделий	83
3.1. Кинематические расчетные схемы	84
3.2. Статические расчетные схемы	88
3.3. Динамические расчетные схемы	93
4. Основные уравнения механики твердого деформируемого тела	106
4.1. Общие сведения	—
4.2. Напряжения на наклонной площадке (формулы Коши)	—
4.3. Дифференциальные уравнения равновесия (уравнения Навье). Свойство парности касательных напряжений	109
4.4. Нормальные и касательные напряжения на произвольно ориентированных площадках	111
4.5. Главные площадки и главные напряжения. Экстремальные значения нормальных напряжений. Кубическое уравнение	113

4.6. Определение главных напряжений и главных площадок в частном случае. Наибольшее значение касательного напряжения . . .	116
4.7. Связь между деформациями и перемещениями в окрестности точки. Дифференциальные уравнения Коши	118
4.8. Уравнения совместности деформаций	123
4.9. Линейные и угловые деформации в произвольном направлении	126
4.10. Закон Гука	127
4.11. Связь между составляющими деформаций и составляющими напряжений в окрестности точки тела	130
5. Исследование элементов конструкций по стержневой расчетной схеме	133
5.1. Внутренние усилия в сечении стержней	—
5.1.1. Дифференциальные зависимости между силами при различных видах нагружения	136
5.1.2. Общие принципы построения эпюр внутренних сил	138
5.2. Расчет на прочность по стержневой схеме	143
5.2.1. Элементарное решение дифференциальных уравнений равновесия твердого деформируемого тела	—
5.2.2. Связь между составляющими тензора напряжений и составляющими внутренних сил в поперечном сечении стержня	144
5.2.3. Напряжение в стержне, нагруженном по торцам . . .	145
5.2.4. Напряжения при осевом растяжении (сжатии). Концентрация напряжений	149
5.2.5. Расчет на прочность при кручении стержней	151
5.2.6. Расчет напряжений при чистом изгибе	153
5.2.7. Напряжения при плоском поперечном изгибе. Формула Журавского	154
5.2.8. Уравнение нейтральной линии. Сложный изгиб	159
5.2.9. Совместное действие изгиба с кручением	160
5.3. Расчет жесткости по стержневой схеме	161
5.3.1. Расчет перемещений при чистом изгибе	162
5.3.2. Приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня	166
5.3.3. Расчет перемещений при кручении круглых стержней	171
5.3.4. Расчет перемещений в стержнях по методу начальных параметров	177
5.3.5. Потенциальная энергия стержня в общем случае нагружения	181
5.3.6. Теорема Кастильяно	183
6. Исследование элементов конструкций по расчетной схеме оболочки	188
6.1. Тонкостенные конструкции электронных изделий и устройств	—
6.2. Общие сведения об оболочках. Допущения и гипотезы	195
6.3. Расчет симметричных оболочек по безмоментной теории . . .	199
6.4. Расчет осесимметричной пластины при больших перемещениях	202
6.5. Расчет осесимметричных гибких оболочек	212
6.6. Расчет цилиндрических оболочек при симметричном нагружении	227

6.7. Расчет прямоугольных пластин	233
7. Расчет напряжений в конструкциях при температурном воздействии	241
7.1. Теория термоупругости	—
7.2. Основные уравнения термоупругости	242
7.3. Температурные напряжения в стержневых конструкциях	245
7.4. Температурные напряжения в осесимметричных цилиндрических составных конструкциях	250
8. Расчет конструкций при динамическом воздействии	258
8.1. Динамические воздействия	—
8.2. Расчет напряжений в элементах конструкций при ударе	260
8.2.1. Динамические напряжения при продольной деформации стержня	—
8.2.2. Динамические напряжения при поперечном ударе. Влияние массы стержня на напряжения при ударе	264
8.2.3. Динамические напряжения при кручении стержня	266
8.3. Колебания механических систем приборов и устройств	267
8.3.1. Собственные колебания. Динамическая расчетная схема с одной степенью свободы	269
8.3.2. Вынужденные колебания. Динамическая расчетная схема с одной степенью свободы	273
8.3.3. Собственные колебания. Динамическая расчетная схема с одной степенью свободы и линейным демпфирующим элементом	275
8.3.4. Вынужденные колебания. Динамическая расчетная схема с одной степенью свободы и линейным демпфирующим элементом	278
8.3.5. Собственные частоты и формы колебаний. Динамическая расчетная схема с конечным числом степеней свободы	282
8.4. Колебания динамических систем с распределенными параметрами	284
8.4.1. Поперечные колебания стержня с бесконечным числом степеней свободы	285
8.4.2. Расчет частоты собственных колебаний гибкой осесимметричной оболочки	295
8.4.3. Расчет прочности при колебаниях элементов конструкций	297
9. Оценка прочности элементов конструкций	300
9.1. Общие сведения	—
9.2. Особенности разрушения хрупких материалов	301
9.3. Усталостное разрушение конструкций	305
9.4. Теории прочности	309
10. Механизмы приборов и систем	312
10.1. Механизмы зубчатых передач	—
10.1.1. Эвольвентное зацепление. Основные параметры	—
10.1.2. Конструкция и материал зубчатых колес	316
10.1.3. Цилиндрические прямозубые зубчатые передачи	318
10.1.4. Конические зубчатые передачи	326

10.1.5. Планетарные механизмы	331
10.1.6. Волновые зубчатые редукторы приборов	336
10.1.7. Червячные передачи	338
10.1.8. Точность зубчатых и червячных передач	345
10.2. Фрикционные передачи и вариаторы	350
10.3. Передачи гибкой связью	357
10.4. Кулачковые механизмы	360
10.5. Валы и опоры механизмов	371
10.5.1. Общие сведения	—
10.5.2. Валы	372
10.5.3. Опоры с трением качения (подшипники качения)	375
10.5.4. Опоры с трением скольжения (подшипники скольжения)	379
10.5.5. Способы уменьшения трения в опорах	381
10.6. Кинематика промышленных роботов и манипуляторов	—
10.6.1. Определение координат точки незамкнутой пространственной системы в неподвижной системе координат	385
10.6.2. Определение линейных скоростей и ускорений точки звена незамкнутой пространственной системы в абсолютной системе координат	392
10.6.3. Определение угловых скоростей и ускорений звеньев незамкнутой пространственной системы в абсолютной системе координат	394
10.6.4. Кинематический анализ манипуляторов	395
11. Физическое моделирование элементов конструкций	399
Приложение 1. Методические указания к решению задач	406
П1.1 Анализ напряженно-деформированного состояния при растяжении-сжатии элементов конструкции, рассматриваемых по стержневой расчетной схеме	—
П1.2. Анализ напряженно-деформированного состояния при кручении элементов конструкции, рассматриваемых по стержневой расчетной схеме	410
П1.3. Анализ напряженно-деформированного состояния при плоском поперечном изгибе элементов конструкции, рассматриваемых по стержневой расчетной схеме	413
Приложение 2. Методические указания к лабораторным работам	418
Р а б о т а 1. Определение механических характеристик материалов	—
Р а б о т а 2. Испытание различных материалов на сжатие	422
Р а б о т а 3. Определение упругой постоянной материала — коэффициента Пуассона	425
Р а б о т а 4. Определение упругих постоянных материала динамическим методом	427
Р а б о т а 5. Определение нормальных напряжений в балке при плоском поперечном изгибе	430
Р а б о т а 6. Внецентренное растяжение полосы	434
Р а б о т а 7. Исследование концентрации напряжений	436
Р а б о т а 8. Определение перемещений при плоском поперечном изгибе балок	439
Р а б о т а 9. Определение передаточного числа редуктора	442

Работа 10. Определение коэффициента полезного действия редуктора	444
Приложение 3. Задания на курсовое проектирование	448
Задание 1. Расчет прочности корпуса и выводов металлокерамического полупроводникового прибора	–
Задание 2. Расчет прочности металлического корпуса со стеклянным изолятором и выводов полупроводникового диода	449
Задание 3. Расчет прочности металлического корпуса и выводов интегральной схемы	450
Задание 4. Расчет прочности металлокерамического корпуса и выводов интегральной микросхемы	451
Задание 5. Расчет прочности металлокерамического корпуса и выводов интегральной микросхемы	453
Задание 6. Расчет прочности металлокерамического корпуса и выводов интегральной микросхемы	454
Литература	457