

ЛЕКЦИЯ 2

ТЕМА 3

КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И РАСЧЕТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

При конструировании работоспособность деталей обеспечивают выбором соответствующего материала, рациональной конструктивной формой и расчетом размеров по одному или нескольким критериям (прочность, жесткость, устойчивость, износостойкость и виброустойчивость), которые отражают физические явления при работе (характер разрушения или вид отказа). Выбор того или иного критерия для данной детали зависит от её функционального назначения и условий работы. Например, для крепежных винтов главным критерием является прочность, а для ходовых винтов – износостойкость, жесткость и прочность, для валов – прочность и жесткость.

3.1. Прочность

Прочность – способность детали сопротивляться разрушению или возникновению недопустимых остаточных деформаций при воздействии внешних нагрузок.

Прочность является главным критерием работоспособности для деталей машин. Поломка детали может привести к выходу из строя всей машины или даже к аварии. Разрушение детали происходит либо вследствие потери статической прочности, либо в связи с потерей сопротивления усталости.

Потеря статической прочности обычно связана со случайными перегрузками, неучтенными при расчете, или со скрытыми дефектами детали (раковины, трещины и т.п.), не обнаруженными при изготовлении. Усталостные поломки вызываются длительным воздействием переменных напряжений, величина которых превышает характеристики усталостной прочности материала детали, например, предел выносливости σ_{-1} .

Кроме указанных поломок деталей зачастую имеет место местное разрушение их поверхностей от воздействия контактных напряжений — так называемое явление выкрашивания поверхностного слоя или питтинг (например, на дорожках качения подшипников, на рабочих поверхностях зубьев колес и т.п.).

Задача обеспечения необходимой прочности состоит в том, чтобы по действующим нагрузкам и условиям эксплуатации определить материал, размеры, форму и технологию изготовления детали, исключая возможность возникновения преждевременных разрушений или появления недопустимых остаточных деформаций.

Все расчеты на прочность производят обычно в 2 этапа: **проектировочный расчет**, выполняемый по номинальным (т.е. без учета эффекта концентрации и др.) эксплуатационным напряжениям в качестве предварительного для получения основных размеров, необходимых при конструировании, и **проверочный расчет**, целью которого является определение действующих (фактических) запасов прочности детали в опасных сечениях. Данный вид расчета учитывает в явной форме все основные факторы, влияющие на прочность: концентрацию напряжений, отличие размеров деталей от опытных образцов, качество поверхностей, наличие упрочнений и др., а поэтому он более точен.

При проектировочном расчете оценку прочности детали проводят путем сравнения расчетных (номинальных) напряжений σ и τ с допускаемыми $[\sigma]$ и $[\tau]$:

$$\sigma \leq [\sigma]; \quad \tau \leq [\tau].$$

В проверочных расчетах прочность детали оценивают, сопоставляя коэффициент запаса прочности S с допускаемым $[S]$, согласно условию

$$S \leq [S].$$

Расчет на прочность различных типов машин имеет свои особенности. Общим для всех расчетов на прочность является

выбор допускаемых напряжений $[\sigma]$ и запасов прочности $[S]$. Общий вид соотношения для определения допускаемых напряжений можно выразить следующим образом:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{[S]},$$

где σ_{lim} — **предельное напряжение**, т.е. такое, при котором материал разрушается или в нем возникают недопустимые остаточные деформации. Данное напряжение принимают в зависимости от характеристики материала (хрупкий или пластичный) и его механических свойств (пределов прочности σ_B , текучести σ_T и выносливости σ_{-1}), а также от характера действующих напряжений (постоянные или переменные).

Для определения допускаемого коэффициента запаса прочности $[S]$ применяют экспериментальный (табличный) и дифференциальный методы выбора.

Экспериментальный (табличный) способ, как правило, используется для данной отрасли промышленности и типовых деталей. Экспериментально полученные значения коэффициентов запаса сведены в таблицы справочников.

Дифференциальный метод определения допускаемых запасов, предложенный советским ученым Л.И. Одингом, учитывает следующее:

$$[S] = [S_1] \cdot [S_2] \cdot [S_3].$$

Здесь $[S_1] = 1,0 \dots 1,5$ — коэффициент, учитывающий достоверность определения расчетных нагрузок и напряжений; $[S_2] = 1,2 \dots 2,5$ — коэффициент, учитывающий разброс механических свойств материала; $[S_3] = 1,0 \dots 1,5$ — коэффициент, учитывающий принятый уровень надежности. Значения указанных коэффициентов устанавливаются на основе обобщения опыта эксплуатации машин в данной отрасли.

Выбор коэффициента запаса прочности является весьма ответственной задачей. Расчет в предположении неблагоприят-

ных сочетаний характеристик материала, нагрузок и т.п. может приводить к ненужному утяжелению конструкций. Поэтому в настоящее время интенсивно развиваются расчеты по **заданной вероятности безотказной работы**.

3.2. Жесткость

Жесткость — способность деталей противостоять воздействию внешних нагрузок без изменения формы и размеров в недопустимых пределах.

Количественной характеристикой жесткости является **коэффициент жесткости**, который численно равен нагрузке, вызывающей единичную деформацию:

$$C = \frac{F}{f},$$

где F и f — обобщенные нагрузка и деформация.

Обратной величиной коэффициенту жесткости является **коэффициент податливости**, численно равный деформации, вызываемой единичной нагрузкой:

$$\lambda = \frac{1}{C}.$$

Во многих случаях расчеты на жесткость являются в числе основных (обязательных). Так, при расчете механических передач особое внимание уделяется жесткости длинных валов, так как недостаточная изгибная жесткость таких валов приводит к неравномерному распределению нагрузки по длине зубьев колес и перекосу в опорах.

Для примера на рис. 2.1 показано (в относительных единицах) изменение прочности балки (напряжения σ) и её жесткости (деформации прогиба f) в зависимости от длины ℓ при одинаковых поперечном сечении и воздействующей силе F . Видно, что при увеличении длины балки в 2 раза её прочность уменьшается в 2 раза, а жесткость — в 8 раз.

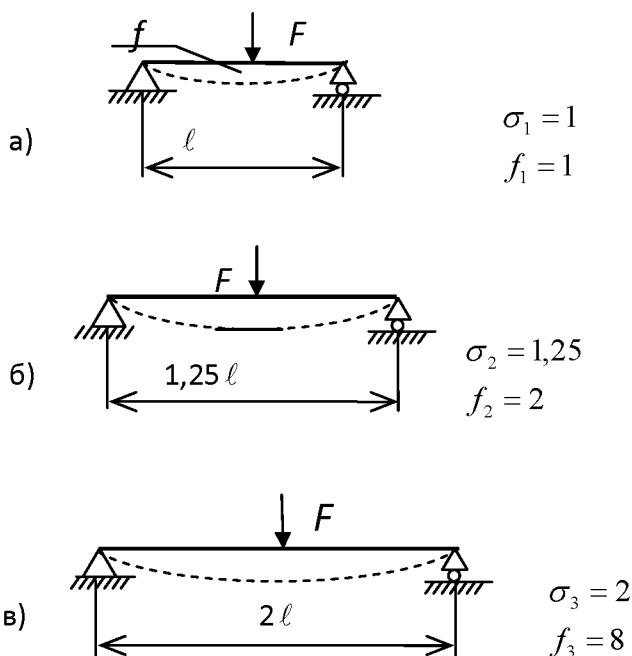


Рис. 2.1. Иллюстрация изменения прочности и жесткости балки в зависимости от её длины

Значение расчетов на жесткость возросло в связи с уменьшением массы и габаритов конструкций за счет внедрения высокопрочных сталей, которые обладают повышенными характеристиками прочности (σ_B и σ_{-1}), а модуль упругости E (характеристика жесткости) остался почти неизменным. Особенно это актуально для изделий аэрокосмической отрасли. При этом требуемую жесткость деталей стараются обеспечивать не увеличением их размеров, а за счет выбора рациональных конструктивных схем и придания рациональной формы.

Для показанных на рис 2.2 схем нагружения балок можно видеть, что деформация прогиба f_1 для двухопорной балки (рис.2.2, а) в 16 раз меньше деформации f_2 для консольно нагруженной балки (рис. 2.2, б).

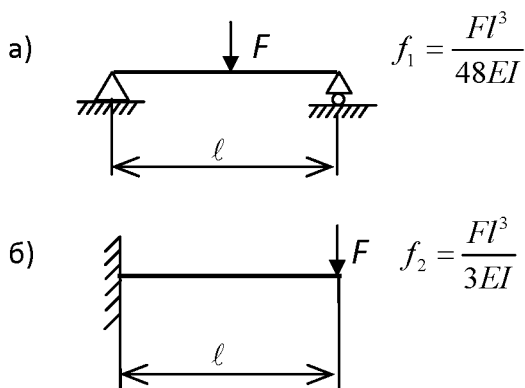


Рис. 2.2. Иллюстрация изменения жесткости балки в зависимости от способа её закрепления

Общая схема расчета на жесткость состоит в определении деформаций деталей и сравнении их с допускаемыми величинами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta l &\leq [\Delta l] && \text{— при растяжении;} \\ f &\leq [f] \\ \Theta &\leq [\Theta] \end{aligned} \right\} \text{— при изгибе;}$$

$$\varphi \leq [\varphi] \quad \text{— при кручении.}$$

Удлинение Δl , прогиб f и угол поворота сечения Θ , угол закручивания φ определяют по формулам сопротивления материалов, а допускаемые величины $[\Delta l]$, $[f]$, $[\Theta]$, $[\varphi]$ устанавливают экспериментально или из опыта эксплуатации — по условиям незадевания деталей, допустимыми перекосами зубчатых колес, колец подшипников и т.п.

3.3. Статическая устойчивость

Статическая устойчивость — способность конструкции сохранять определенную начальную форму упругого равновесия при действии внешних нагрузок. Это критерий работоспособности для длинных и тонких стержней, работающих на сжатие, или

тонких пластин, нагруженных силами, действующими в их плоскости (например, створки сопла авиационного газотурбинного двигателя).

3.4. Виброустойчивость

Виброустойчивость — способность конструкции работать в заданных условиях эксплуатации без недопустимых колебаний.

Вибрации (колебания) вызывают дополнительные переменные напряжения в элементах конструкции и могут приводить к усталостным разрушениям. Зачастую вибрации снижают качество работы машин, например металлорежущих станков. Кроме того, вибрации могут оказывать вредное влияние на здоровье человека. С увеличением скоростей движения расчет на виброустойчивость является необходимым.

Особенно опасным является возникновение **резонансных колебаний**, которые могут приводить к разрушению деталей или машины в целом. Условие отсутствия резонанса:

$$\lambda_c \neq \lambda_g,$$

т.е. частота собственных колебаний λ_c элементов конструкции не должна совпадать с частотой вынужденных колебаний λ_g . Поэтому расчеты на виброустойчивость сводятся к определению частот собственных колебаний механической системы и обеспечению их несовпадения с частотой вынужденных колебаний. На практике выполнение условия виброустойчивости машин достигается различными конструктивными мероприятиями: регулированием массы или коэффициентов жесткости деталей или, например, обеспечением рабочей частоты вращения n_p ротора машины (рис. 2.3) в диапазоне частот, не совпадающем с областью резонансных (критических) частот вращения $n_{кр}$, т.е.

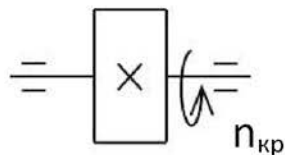


Рис. 2.3. К допустимому диапазону рабочих частот вращения ротора

$$n_p \neq (0,7 \dots 1,3)n_{кр}.$$

Для быстроходных машин особое внимание при конструировании следует уделять виброзащите и демпфированию колебаний. К устройствам для снижения колебаний относят маховики и демпферы различной конструкции, рассеивающие энергию колебаний.

Основными источниками вибраций являются неуравновешенные вращающиеся массы; неточность изготовления узлов, особенно опор; неоднородность материала вращающихся деталей и др.

3.5. Износостойкость

Износостойкость — свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения сопряженных поверхностей.

Работоспособность, надежность, КПД, виброактивность и интенсивность шума, а также другие показатели машин, в большой степени зависят от изнашивания поверхностей деталей, т.е. от процесса постепенного изменения их размеров и формы сопряженных поверхностей в результате работы сил трения, обуславливающей отделение частиц материала или пластическое деформирование.

Трение и изнашивание наносят огромный ущерб народному хозяйству. Установлено, что 70-90% машин выходят из строя в результате изнашивания деталей и только 10-30% — по другим причинам, например из-за поломок, которые, в свою очередь, зачастую являются следствием изменений условий работы, вызванных износом (как результатом изнашивания) сопряженных поверхностей.

Износостойкость деталей зависит от физико-механических свойств материала, термообработки и шероховатости поверхностей, от значений давлений или контактных напряжений, скорости скольжения, наличия смазочного материала в сопряжении, режима работы и др.

Универсального и общепринятого метода расчета на изнашивание в настоящее время пока нет. В большинстве случаев расчет проводят в форме ограничения действующих давлений p в местах контакта деталей или мощности трения $p\nu$:

$$p \leq [p], \quad p\nu \leq [p\nu],$$

где ν – скорость скольжения, $[p]$ и $[p\nu]$ – допускаемые величины, устанавливаемые экспериментально. В отдельных случаях в качестве числовой характеристики используют **интенсивность изнашивания** I_h , которую в общем виде определяют как отношение износа h к пути L_f трения (или к работе сил трения):

$$I_h = \frac{h}{L_f}.$$

3.6. Термостойкость

Термостойкость — способность материала деталей и смазочных жидкостей сохранять необходимые механические и вязкостные свойства при повышенных или пониженных температурах эксплуатации.

Критерий работоспособности деталей при повышенных температурах принято называть **теплостойкостью**. Повышенные температуры в ряде случаев существенно изменяют работоспособность деталей и узлов машин — приводят к разжижению смазки (уменьшению вязкости), обуславливающей появление задиров и заеданий сопряженных поверхностей, вызывают дополнительные термические напряжения, изменение свойств металлов и пластмасс (явление ползучести и релаксации напряжений, отпуск и т.п.), ослабление посадок и др.

Значительные минусовые температуры могут вызвать охрупчивание и явление **хладноломкости** материалов, загустевание смазки и заклинивание движущихся частей машины и т.п.

Пригодность материала деталей для работы при минусовых температурах, особенно в случае ударного или циклического нагружения, определяется ударной вязкостью. Так, например, сталь 3 нельзя использовать при отрицательных температурах $-50\ldots-60^{\circ}\text{C}$, т.к. её ударная вязкость снижается со 100 Дж/см^2 при $t=20^{\circ}\text{C}$ до $5\ldots10 \text{ Дж/см}^2$ при $t=-50^{\circ}\text{C}$.

В промышленности для изготовления деталей машин обычно применяют конструкционные стали с ударной вязкостью $>10 \text{ Дж/см}^2$. А при высоких требованиях к конструкции (например, авиационно-космическая техника) металлические детали, подвергающиеся ударному или циклическому нагружению, должны иметь в диапазоне рабочих температур ударную вязкость не ниже $10\ldots50 \text{ Дж/см}^2$.

Допустимые температуры эксплуатации устанавливаются из опыта или расчетом. Например, при повышенных температурах из решения уравнения теплового баланса (тепловыделение за единицу времени приравнивают теплоотдаче) определяется средняя установившаяся температура t и сравнивается с допустимой $[t]$, т.е. $t \leq [t]$.