

3 лекция

Расчёты на прочность. Жёсткость. Износостойкость. Теплостойкость. Коррозионная стойкость. Виброустойчивость. Устойчивость. Основные этапы проектирования. Чертежи

2. Расчёт на прочность при переменных регулярных напряжениях

Циклом называют замкнутую однократную смену напряжений, проходящих непрерывный ряд значений.

Время T , в течение которого протекает один цикл, называют **периодом**.

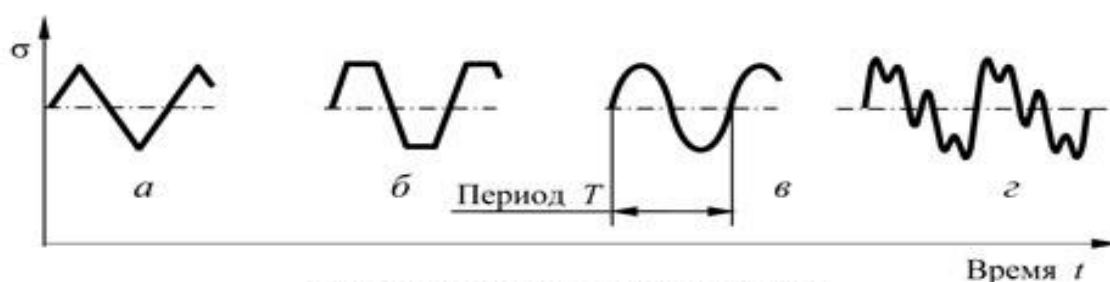


Рис. 9.1. Виды циклов напряжений:
 а – треугольный; б – трапецидальный; в – гармонический;
 г – результат сложения трех гармонических циклов с различной частотой и амплитудой

Максимальное напряжение цикла σ_{\max} – наибольшее по алгебраическому значению напряжение цикла.

Минимальное напряжение цикла σ_{\min} – наименьшее по алгебраическому значению напряжение цикла.

Среднее напряжение цикла σ_m – постоянная составляющая цикла напряжений, равная алгебраической полусумме максимального и минимального напряжений цикла:

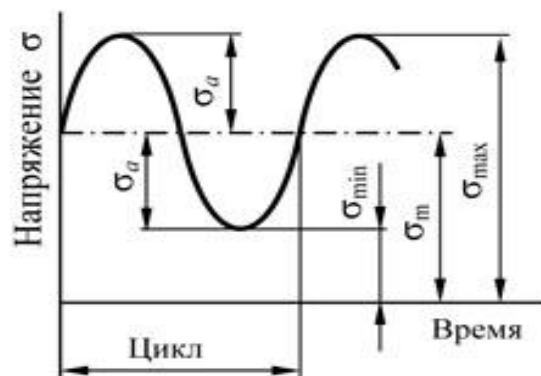


Рис. 9.2. параметры цикла напряжений

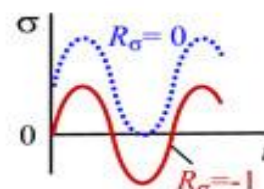
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Амплитуда напряжений цикла σ_a – наибольшее числовое положительное значение переменной составляющей цикла, равной алгебраической полуразности:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

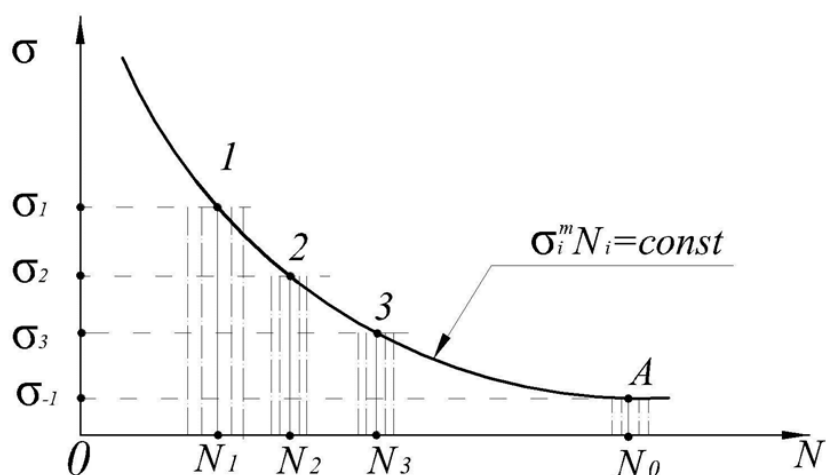
Коэффициент асимметрии цикла напряжений R_σ – отношение минимального напряжения цикла к максимальному $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

При испытаниях на выносливость наиболее употребительны симметричный и отнулевой циклы.



Переменные нагрузки при регулярном (стационарном) режиме вызывают в деталях переменные напряжения. Многочисленные эксперименты показали, что *вид кривой нагружения* не имеет определяющего влияния на прочность и в ходе обработки результатов измерений нагрузок и напряжений полученные кривые представляют в виде синусоиды. При этом оперируют вышеприведёнными определениями и терминами.

Расчёт выполняют на основании кривой Велера (кривая усталости), которая отражает зависимость между действующим максимальным переменным напряжением и числом циклов нагружений до разрушения. Она позволяет определить **длительный предел выносливости σ_{lim}** – **наибольшее напряжение, которое с заданной вероятностью неразрушения образцы выдерживают практически неограниченное число циклов** (при симметричном цикле σ_{-1} , отнулевом σ_0 , асимметричном σ_R).



На кривой для ряда материалов есть точка перегиба с координатами: N_0 – базовое число циклов нагружения и после точки А вправо идёт горизонтальная прямая (для стали обычно $N_0 \geq 10^7$);

σ_{lim} – длительный предел выносливости (на рис. $\sigma_{lim} = \sigma_{-1}$, цикл симметричный).

Если $N \geq N_0$, то предельным напряжением является длительный предел выносливости σ_{lim} .

Если $N < N_0$, то предельным напряжением является ограниченный предел выносливости $\sigma_j > \sigma_{lim}$ при числе циклов $N_j < N_0$. (на рис. соответственно σ_1 и N_1 , σ_2 и N_2 , σ_3 и N_3)

Следует отметить, что не все материалы имеют длительный предел выносливости и тогда оперируют участком кривой с ограниченными пределами выносливости в приемлемом диапазоне циклов нагружения.

На основании кривой Велера при числе циклов нагружения $N_j < N_0$ определяют ограниченный предел выносливости, который является предельным напряжённым состоянием.

$$\sigma_j^m N_j = \sigma_{lim}^m N_0$$

$$\sigma_j = \sigma_{lim} \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_j}} = \sigma_{lim} K_L \leq \sigma_T(\sigma_{0,2})$$

Здесь $K_L = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_j}}$ – коэффициент долговечности, ≥ 1 но $\leq D$, так как кривая Велера имеет ограничение по величине напряжения.

K_L учитывает срок службы и возможность повышения допускаемых напряжений для кратковременно работающих деталей – полностью используем свойства материала!

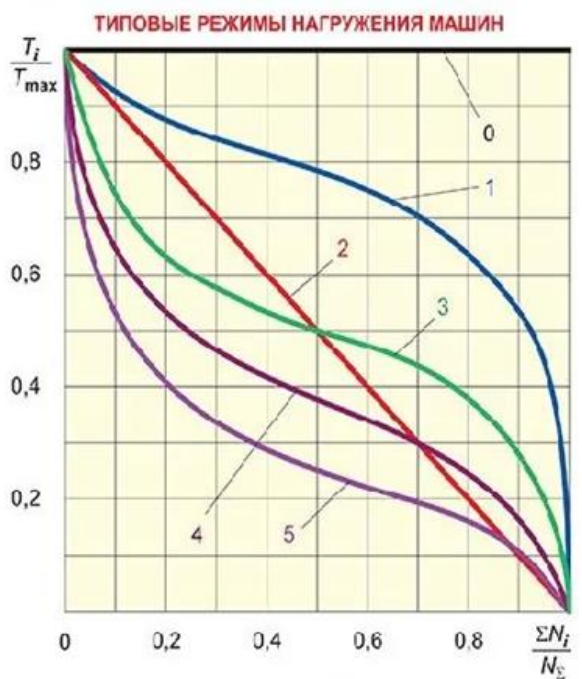
Условие прочности $\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_j}{[S]} = \frac{\sigma_{lim}}{[s]}$

3. Расчёт на прочность при переменных нерегулярных напряжениях

Выполняют определением эквивалентного числа циклов нагружений N_E через суммарное число циклов $N_{СУММ}$ и коэффициент режима K_{HE}

$$N_E = N_{СУММ} \cdot K_{HE} \quad K_L = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_E}}$$

а) с приведением соответствующего нагружения к типовому



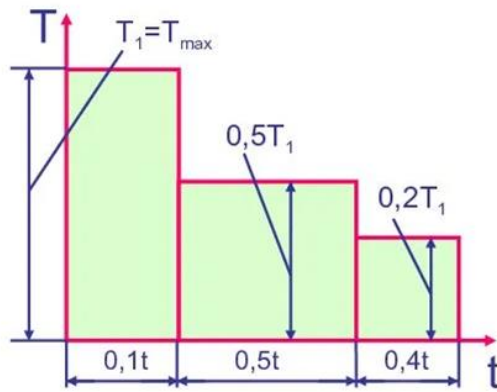
0 - постоянный; 3 - средний нормальный;
 1 - тяжелый; 4 - легкий;
 2 - средний равновероятный; 5 - особо легкий.

T_i - текущая нагрузка;
 T_{max} - наибольшая длительно действующая нагрузка;
 ΣN_i - суммарное число циклов при i -ом нагружении;
 N_{Σ} - суммарное число циклов нагружений всех уровней.

Значения коэффициента k_{HE} для типовых режимов нагружения

Постоянный –	$k_{HE} = 1.$
Тяжелый -	$k_{HE} = 0,5.$
Средний равновероятный –	$k_{HE} = 0,25.$
Средний нормальный-	$k_{HE} = 0,18.$
Легкий -	$k_{HE} = 0,125.$
Особо легкий -	$k_{HE} = 0,063.$

б) с определением K_{HE} по ступенчатой циклограмме



Ступенчатая циклограмма

$$k_{HE} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{T_i}{T_{\max}} \right)^3 \cdot \frac{t_i}{t_{\Sigma}}$$

$$k_{HE} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{T_i}{T_{\max}} \right)^3 \cdot \frac{t_i}{t_{\Sigma}} =$$

$$= 1^3 \cdot 0,1 + 0,5^3 \cdot 0,5 +$$

$$+ 0,2^3 \cdot 0,4 = 0,166.$$

4. Расчёт по коэффициенту запаса прочности (проверочный расчёт)

Выполняется при наличии полных данных по конструкции детали (рабочий чертёж или готовое изделие – размеры, шероховатость, концентраторы напряжений, упрочнения...) и нагружении (усилия и моменты, величина, характер и места приложения. Строится пространственная схема нагружения; схема нагружения в плоскостях H, V, W; эпюры изгибающих моментов в плоскостях H и V и суммарного, крутящего момента). Определяется действительный коэффициент запаса и сравнивается с допускаемым.

Условие прочности
$$S = \frac{s_{\sigma} \cdot s_{\tau}}{\sqrt{s_{\sigma}^2 + s_{\tau}^2}} \geq [S]$$

где $s, [s]$ — действительный и допускаемый коэффициенты запаса;

s_{σ}, s_{τ} — коэффициенты запаса по нормальным и касательным напряжениям (находят по зависимостям сопромата; учитывают концентраторы и другие факторы). Например, для реверсивного вала:

$$s_{\sigma} = \sigma_{-1} / (\sigma_{\alpha} K_{\sigma D} + \psi_{\sigma} \sigma_m),$$

$$s_{\tau} = \tau_{-1} / (\tau_{\alpha} K_{\tau D} + \psi_{\tau} \tau_m).$$

Сопоставление результатов испытаний на усталость гладких образцов и деталей машин из того же материала, при неприменении упрочнения, показывает снижение нагрузочной способности деталей. **Влияют на прочность и учитываются при проектировании ...**

1) размеры — учитываются коэффициентом влияния абсолютных размеров сечения (он же масштабный фактор) $\varepsilon_{\sigma} \leq 1$ и $\varepsilon_{\tau} \leq 1$, значение снижается с ростом размеров. В расчетах ε_{σ} и ε_{τ} соответственно вводят в суммарный коэффициент влияния всех факторов на сопротивление усталости $K_{\sigma D}$ и $K_{\tau D}$, который относят как множитель к напряжению амплитуды цикла σ_{α} и τ_{α} :
 – для нормальных напряжений $K_{\sigma D} = (k_{\sigma} / \varepsilon_{\sigma} + k_F - 1) / k_v$,
 – для касательных — $K_{\tau D} = (k_{\tau} / \varepsilon_{\tau} + k_F - 1) / k_v$;

2) форма — учитывается эффективным коэффициентом концентрации напряжений k_{σ} и k_{τ} , ≥ 1 . В расчётах вводят в $K_{\sigma D}$ и $K_{\tau D}$ (одним из первых

обратил внимание на проблему формы и концентрации напряжений в деталях машин и вопрос о влиянии абсолютных размеров на прочность Сидоров А.И.) ;

3) состояние поверхности (в порядке снижения предела выносливости: полирование, шлифование, обработка резцом, после прокатки, коррозия в пресной воде, коррозия в морской воде) — учитывается коэффициентом влияния шероховатости k_F . В расчётах вводят в суммарный коэффициент влияния всех факторов на сопротивление усталости $K_{\sigma D}$ и $K_{\tau D}$;

4) упрочняющая технология (механическое упрочнение: дробеструйная обработка, обкатка роликами или шариками, чеканка галтелей ударным инструментом, гидрополирование...; термическая и химико-термическая обработка: поверхностная закалка, цементация, азотирование, цианирование...) — учитывается коэффициентом $k_v, \geq 1$. В расчётах вводят в суммарный коэффициент влияния всех факторов на сопротивление усталости $K_{\sigma D}$ и $K_{\tau D}$;

5) чувствительность материала к асимметрии цикла напряжений — учитывается коэффициентом $\psi, < 1$. В расчётах относят как сомножитель к среднему напряжению цикла σ_m, τ_m и соответственно получаем $\psi_\sigma \cdot \sigma_m, \psi_\tau \cdot \tau_m$.

5. Расчёт при пиковых нагрузках

Допускаемые напряжения принимают из условия неразрушения, как часть предела прочности для хрупких материалов, или недопущения остаточных деформаций как часть предела текучести для пластичных. Ограничивают и величину контактных напряжений с учётом термообработки и твёрдости поверхности.

Жёсткость – способность детали (системы) сопротивляться действию нагрузок с наименьшими деформациями (Орлов, с. 203).

Условие жёсткости:

$$\text{прогиб } y \leq [y] \quad \text{угол закручивания } \varphi \leq [\varphi]$$

С тенденцией уменьшения размеров и массы за счёт применения высокопрочных материалов, значение жёсткости возрастает, так как нормальная работа сопряжённых в машине элементов возможна при определённых величинах упругой деформации, и нередко не прочность, а жёсткость диктует размеры и форму деталей.

Следует помнить, что угол закручивания и прогиб обратно пропорциональны четвёртой степени диаметра, а напряжения – кубу, то есть при кручении и изгибе материал надо размещать дальше от нейтральной оси, что находит своё отражение в применении прокатного профиля, полых валов и оболочек. В кубе снижается прогиб при уменьшении плеча силы и следует сокращать осевые размеры. Также имеют значительные преимущества по жёсткости ферменные конструкции по сравнению с балочными.

Износостойкость – способность сопротивляться изнашиванию, то есть процессу постепенного разрушения *при трении* рабочих поверхностей деталей. Износ ведёт к изменению размеров и формы мест сопряжений, увеличению зазоров и потере точности, росту динамической нагрузки, снижению КПД и надёжности. Установлено, что до 90% всех машин выходит из строя в результате изнашивания.

А) ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ наблюдают изнашивание:

1. Абразивное, когда поверхности при относительном движении взаимодействуют друг с другом и с абразивными частицами, имеет место срез микровыступов и их многократное деформирование, которое завершается усталостным разрушением. Уменьшают абразивное изнашивание повышением твёрдости, разделением поверхностей смазкой с её очисткой, снижением удельного давления q Н/мм².

2. Водородное (тормозные диски, барабаны, колодки, фрикционные муфты и т.д.) – выделяемый при трении водород (разложение нефтепродуктов, деструкция пластмасс) адсорбирует на поверхности, проникает при высокой температуре в материал и вызывает охрупчивание, появление множества трещин в контактной зоне и переход поверхностного слоя в порошкообразное состояние (установлено Гаркуновым Д.Н.).

3. Молекулярно-механическое или заедание – при высоких контактных напряжениях разрушаются защитные масляные и окисные плёнки и поверхности схватываются за счёт сил молекулярного сцепления. Схватывание наблюдается:

а) в форме малоинтенсивного переноса материала,

б) в наиболее опасной аварийной форме – *задир*, когда имеет место мгновенное сваривание в зоне контакта с последующим вырыванием частиц из поверхности при относительном движении.

Предупреждают подбором материала, повышают твёрдость, ограничивают контактные напряжения и скорость скольжения, применяют покрытия (Zn+Cr, Cd+Cr, Cu, Co, Zn и т.д.) и противозадирные масла, в том числе на основе дисульфида молибдена.

4. Коррозионно-механическое – детали снаружи корродируют и при относительном движении поверхностей контакта идёт непрерывное механическое разрушение постоянно возобновляющихся окисных плёнок. Разновидность – *фреттинг-коррозия* (англ. *fret* – разъедать, подтачивать), когда при колебательных относительно малых 0,025...2,5 мм смещениях без смазки на поверхностях сопряжений образуются мелкие ямки и продукты коррозии не удаляются из зоны контакта, а работают как абразив. Наблюдают в заклёпочных, прессовых, резьбовых, шлицевых и другие соединениях. Носит прогрессирующий характер. В качестве защиты – уменьшение относительных смещений, упрочнение зон контакта, применение мягких гальванических покрытий.

Для ограничения интенсивности изнашивания при трении скольжения допустимое удельное давления $[q]$ и произведение его на относительную скорость скольжения $[qv]$ принимают по аналогичным, хорошо себя зарекомендовавшим конструкциям:

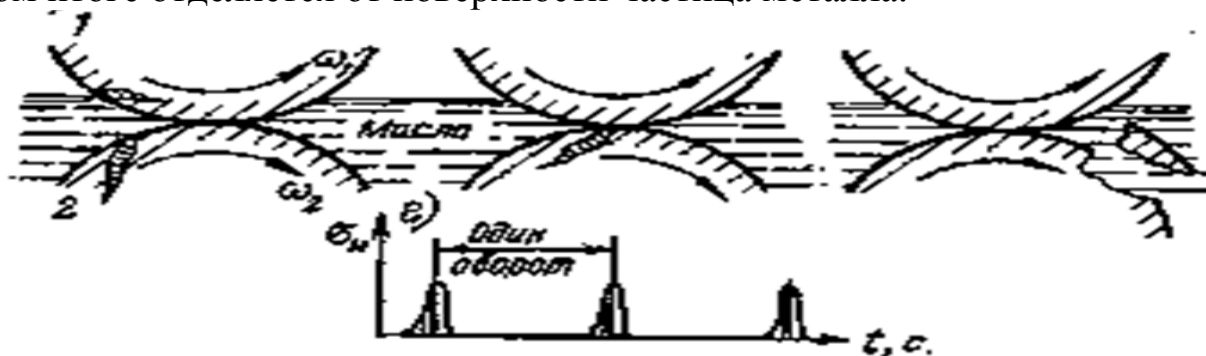
$$q \leq [q] \frac{H}{\text{мм}^2} \quad qv \leq [qv] \frac{H \cdot \text{м}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}} \quad .qv f \leq [qv f] \frac{H \cdot \text{м}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}$$

где f - коэффициент трения.

Следует отметить, что в сопряжениях деталей машин наряду с основным видом изнашивания присутствуют, как правило, и другие.

Б) В УСЛОВИЯХ ПРЕОБЛАДАНИЯ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ НАД СКОЛЬЖЕНИЕМ при наличии жидкой смазки наблюдают (подшипники качения, зубчатые колёса...):

1. Усталостное выкрашивание поверхности или питтинг (англ. *pit* – яма, углубление). Под действием переменных контактных напряжений на небольшой глубине образуются начальные трещины, ориентированные при выходе на поверхность по вектору силы трения скольжения, и их дальнейшему развитию (по Трубину Г.К.) способствует масло. В более неблагоприятных условиях оказывается отстающая поверхность из-за начального попадания в зону контакта выхода трещины – края смыкаются, масло запирается и оказывает расклинивающее действие, трещина растёт и в конечном итоге отделяется от поверхности частица металла.



Выкрашивание может быть

- ограниченным, когда нагрузка первоначально концентрируется на малой площади и в работе постепенно выравнивается пластическим деформированием при твёрдости поверхности $HВ < 350$,

- прогрессирующим, если возникает при нормальном начальном прилегании поверхностей при твердости $HВ < 350$ или невозможно завальцовывание углублений при твёрдости $HВ > 350$ – края обламываются.

В отличие от объёмного усталостного разрушения с мгновенной поломкой детали выкрашивание сопровождается увеличением шума и постепенным ростом вибрации и динамических нагрузок – деталь может продолжать работать некоторое время.

С ростом твёрдости контактная выносливость повышается.

Оценку несущей способности при усталостном выкрашивании производят по допускаемым контактным напряжениям, то есть решение задачи переносят в область контактной выносливости, и условие контактной прочности:

$$\sigma_H \leq [\sigma]_H = \frac{\sigma_{H \text{ lim}} \cdot K_{HL}}{[s]_H}$$

(индекс «Н» означает, что напряжения относятся к поверхности).

2. При значительной нагрузке возможна местная пластическая деформация в виде обмятия с искажением формы (подобно раскатыванию теста), а также отслаивание верхнего термообработанного слоя.

В целом вопросами контактного взаимодействия твёрдых тел при относительном смещении занимается **триботехника** (греч. *tribos* – тереть). Одним из направлений создания практически безизносных пар является использование процесса избирательного переноса, когда на поверхностях контакта образуется защитная плёнка с граничным слоем, обладающим свойством непрерывно самовосстанавливаться за счёт материала смазки, рабочих поверхностей, сопутствующих и присадочных элементов (например, Cu+Fe+масло+фреон).

Не теряет своей перспективности применение жидкостного трения (основатель теории Петров Н.П., 1883 г.), когда поверхности полностью разделены слоем смазки и непосредственно не соприкасаются, а коэффициент трения становится очень малым (примерно 0,005). Задача заключается в конструировании надёжного узла с гарантированным обеспечением режима жидкостного трения с подачей чистой смазки.

Выигрыш даёт и режим полужидкостного трения при условии постоянной очистки смазки.

Теплостойкость – способность выдерживать нагрузку при высокой температуре. При повышении температуры выше определённого значения снижается прочность материала и появляются:

– *ползучесть* или крип (англ. *creep* – ползти) – непрерывная деформация при напряжениях значительно ниже предела текучести (сталь и чугун свыше 300°);

– *релаксация напряжений* (англ. *relaxion* – ослабление, уменьшение) – падение начальных напряжений до нуля в предварительно затянутых соединениях.

Также смазка теряет несущую и защищающую способность, меняются зазоры в сопряжениях – возможно заклинивание при их уменьшении или растут динамические нагрузки при увеличении, теряется точность работы, снижается коэффициент трения в тормозах, увеличивается интенсивность коррозии.

Применяют теплостойкие материалы и расчёты на прочность и температурные деформации увязывают с тепловыми. Считают, что все потери идут на нагрев и их учитывают через КПД.

Коррозионная стойкость – способность поверхности материала сопротивляться воздействию окружающей среды. Коррозия существенно снижает сопротивление усталости, а также со временем сводит на нет несущую способность соединений и металлоконструкций.

Для защиты применяют покрытия с их обновлением и коррозионно стойкие материалы (нержавеющая сталь, пластмассы).

Виброустойчивость – есть способность работать в заданном диапазоне скоростей без недопустимых колебаний, которые вызывают дополнительные переменные напряжения с возможностью усталостного разрушения, снижают качество работы машин, возрастает шум. Особенно опасно явление резонанса.

Повышают уравновешенность и увеличивают или уменьшают жёсткость, избегают резонансных частот или быстро их проходят, применяют гасители колебаний (они же демпфирующие устройства).

Устойчивость – способность сохранять исходную форму при действии сжимающих сил. В инженерной практике ограничивают величину напряжений сжатия с учётом материала.

Основные этапы проектирования. Чертежи

Удовлетворение требований к ДМ необходимо обеспечить в процессе проектирования, который включает:

1. Анализ ситуации, постановка задачи и разработка вариантов.
2. Уяснение принципа работы с выявлением ОКР и построение расчётной схемы с приемлемым упрощением:
 - а) формы детали;
 - б) соединений с другими деталями;
 - в) передачи нагрузок.
3. Определение характера и величины действующих сил и моментов.
4. Выбор материала.
5. Назначение допускаемых напряжений, удельных давлений, прогибов...
6. Расчёт по ОКР с определением размеров несущих элементов (есть подход, когда эти размеры назначают конструктивно с учётом рекомендаций, опыта, целесообразности...).
7. Предварительная разработка конструкции деталей и сборочного чертежа – эскизная компоновка со взаимоувязкой размеров.
8. Проверочные расчёты – обязательны, а в ряде случаев доводят конструкцию до разрушения со снятием параметров.

9. При необходимости возвращение к началу и повтор до получения приемлемых результатов.

10. Разработка чертежей (общего вида с таблицей составных частей изделия, сборочных, рабочих) и спецификаций

ЧЕРТЁЖ ОБЩЕГО ВИДА – должен давать полное представление о конструкции изделия, взаимодействии основных частей, принципе работы и является основой для разработки сборочных чертежей и рабочих чертежей деталей.

ЧЕРТЁЖ СБОРОЧНЫЙ – сборочная единица, узел, соединение... — должен раскрывать конструкцию, давать полное представление о расположении и взаимной связи её составных частей, с возможностью осуществления сборки и контроля.

РАБОЧИЙ ЧЕРТЁЖ ДЕТАЛИ – должен содержать все сведения для изготовления и контроля и соответствовать требованиям:

- разрабатывается в масштабе на формате с основной надписью;
- выполняется необходимое для полного понимания число видов (проекций), разрезов, сечений, выносных элементов, полностью раскрывающих форму изделия и составляющих конструкции: пазов, проточек, отверстий, фасок, галтелей, шлиц...;
- даются размеры в **миллиметрах** габаритные, всех конструктивных элементов (про- установка должна облегчать применение размеров при последующем изготовлении, например для вала со ступенями предпочтителен отсчёт длин участков от торцов), справочные;
- приводятся предельные отклонения размеров в буквенно-цифровом написании (на свободные размеры — в технических требованиях) и численное значение в миллиметрах;
- проставляется шероховатость поверхностей (преобладающая шероховатость — вверху чертежа справа);
- обозначаются базы, предельные отклонения формы и расположения поверхностей;
- приводятся сведения о материале, термической обработке, покрытии, отделке;
- оформляется предусмотренное стандартом на поле чертежа (например, таблица с параметрами для зубчатого и червячного колёс, червяка, звёздочки; диаграмма нагрузка-деформация для пружины);
- даются текстовые записи: технические требования над штампом — заголовок не пишут, пункты со сквозной нумерацией, с кратким текстом и каждый с новой строки; пояснения на поле чертежа и другие данные.

ВНИМАНИЕ !

Конспект аккуратно переписывается, прорабатывается, дополняется по рекомендуемой литературе и показывается на практическом занятии.

Также по учебно-методическому пособию «Детали машин и основы конструирования. Тестовые задания по вводной части» прорабатываются Блоки 8.2,9,10,11,12 согласно указаний ПРЕДИСЛОВИЯ. Проработанное также показывается на практическом занятии (*далее будет проведено контрольное тестирование*).