

ИНЖЕНЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ



ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИИ
Инженерные конструкции рассчитывают на **силовые воздействия по методу предельных состояний**, который характеризуется четким установлением предельных состояний конструкции и введением системы расчетных коэффициентов, учитывающих изменчивость различных факторов.

Предельными называют состояния, при которых конструкция:

1. теряет способность сопротивляться внешним нагрузкам и воздействиям,
2. получает недопустимые деформации или местные повреждения, т. е. перестает удовлетворять требованиям, предъявляемым к ней в процессе эксплуатации или возведения.

*Нормальной эксплуатацией считается постоянный процесс бесперебойной работы конструкции или сооружения, осуществляемый без ограничений в соответствии с предусмотренными в нормах или заданиях на проектирование условиями.

Предельные состояния подразделяют на две группы:

первая группа — по потере, несущей способности или непригодности к эксплуатации;

вторая группа — по непригодности к нормальной эксплуатации*.

Расчеты по первой группе предельных состояний производят:

1. потерю устойчивости положения формы (расчет на общую и местную устойчивость тонкостенных элементов);
2. потерю устойчивости положения конструкций (расчет на опрокидывание и скольжение);
3. разрушение под совместным воздействием силовых факторов и неблагоприятных влияний внешней среды.
4. чтобы предотвратить хрупкое, вязкое, усталостное и иного характера разрушение (расчет по прочности).

Расчеты по второй группе предельных состояний должны предотвратить:

1. чрезмерные перемещения (прогибы, осадки, углы поворота, амплитуды колебаний),
2. образование или чрезмерное раскрытие трещин, в железобетонных конструкциях в зависимости от категории требований к их трещиностойкости.

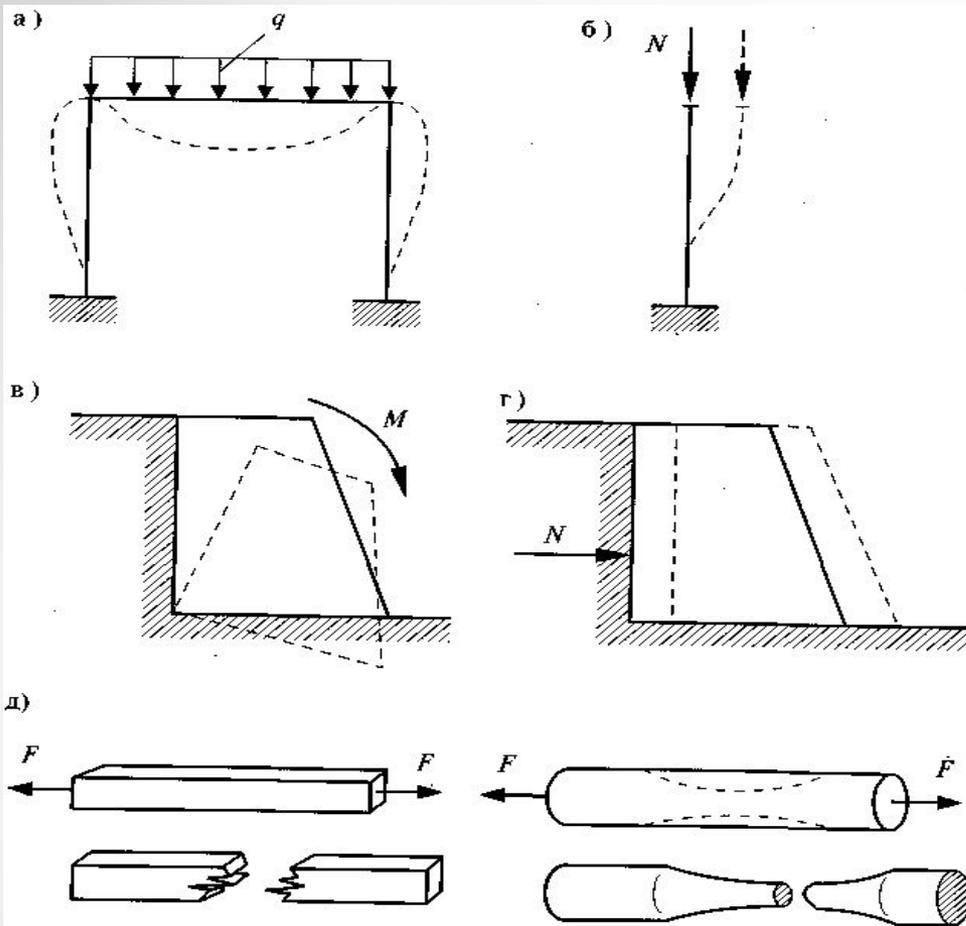


Рис. Предельные состояния первой группы:

а), б) потеря общей устойчивости; в), г) потеря устойчивости положения;

д) хрупкое, вязкое или иного характера разрушение

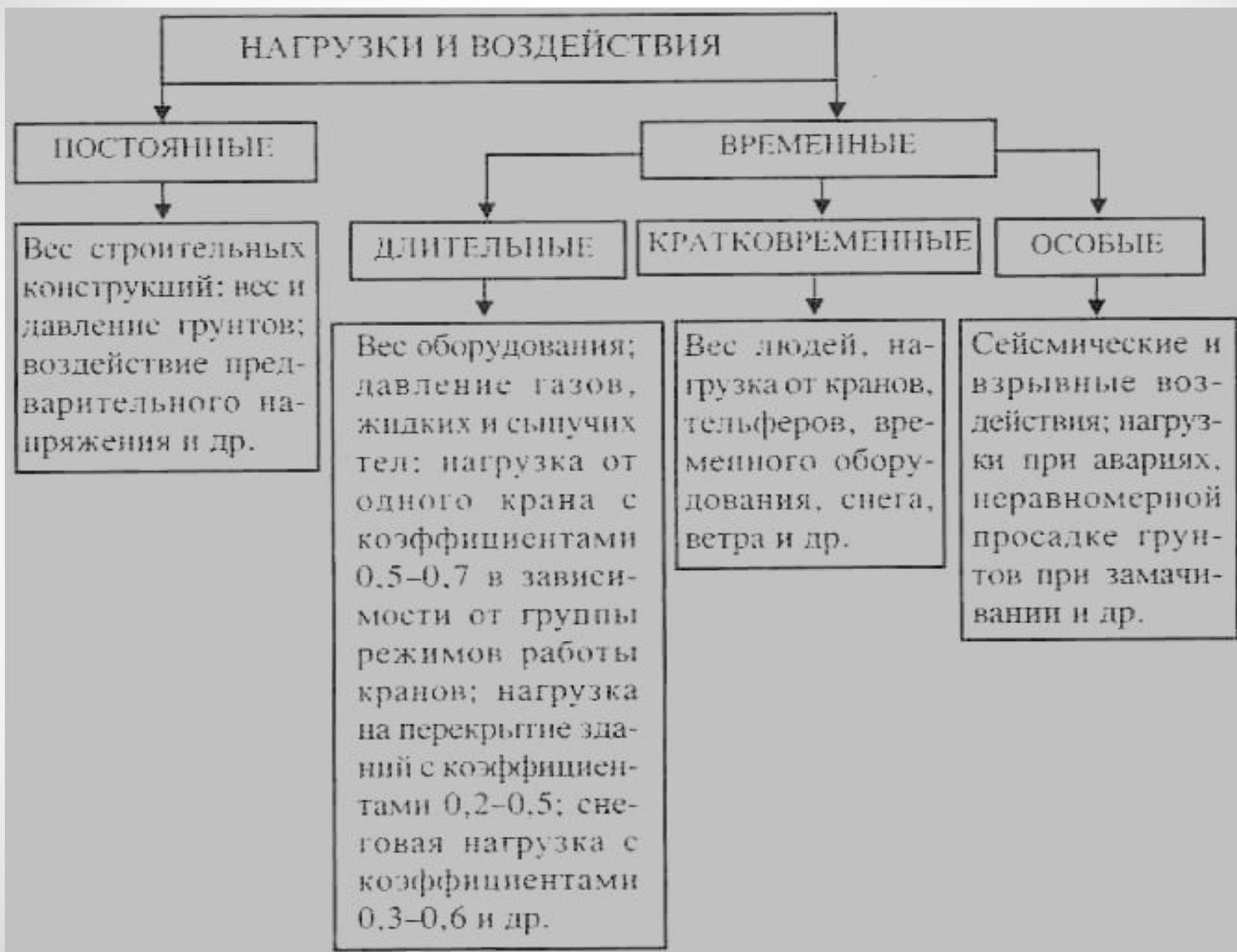
Наступление того или иного предельного состояния зависит от следующих **основных факторов:**

- величины внешних нагрузок и воздействий,
- механических характеристик материалов,
- условий работы конструкций и материалов.

Нагрузки и воздействия

При расчете конструкций их принимают по СНиП 2.01.07--85, а для гидротехнических сооружений, кроме того, по СНиП 2.06.01—86 и СНиП 2.06.04—82.

- 1. Постоянные нагрузки** - собственный вес конструкции (сооружения), вес, давление грунтов. В гидротехнических сооружениях учитывают давление воды при нормальном подпорном уровне, вес технологического оборудования, расположения которого не меняется.
- 2. Временные длительные нагрузки и воздействия** - вес стационарного оборудования (станки, насосы и т. п.); давления жидкостей в емкостях и трубопроводах; нагрузки от людей и оборудования на перекрытия зданий, от мостовых и подвесных кранов (вертикальные нагрузки), от веса снега и от температурных климатических воздействий; воздействия влажности и др.
- 3. Кратковременные нагрузки и воздействия** - нагрузки от подвижного подъемно-транспортного оборудования; снеговые, также от мостовых и подвесных кранов; ветровые и гололедные нагрузки; вес людей, деталей, материалов; волновые, ледовые и другие нагрузки на гидросооружения; нагрузки, возникающие при изготовлении, перевозке и монтаже элементов конструкций, и др.
- 4. Особые нагрузки** - сейсмические и взрывные воздействия; нагрузки и воздействия, вызываемые неисправностью или поломкой оборудования; воздействия неравномерных деформаций основания, сопровождающиеся коренным изменением структуры грунта; ледовые нагрузки при прорыве заторов; дополнительное гидростатическое давление воды при форсированном уровне в гидросооружениях и т. п.





Величины нагрузок, устанавливаемые нормами (например, **СНиП 2.01.07—85**) называют **нормативными**.

Для постоянных нагрузок они принимаются

- по *проектным значениям геометрических и*
- *конструктивных параметров и*
- *по нормативным* значениям удельного веса материала; для атмосферных нагрузок (ветровой, снеговой, волновой, ледовой и др.) по средним из ежегодных неблагоприятных значений и т. п.

Отклонение нагрузок в сторону от их нормативных значений вследствие изменчивости нагрузок от условий нормальной эксплуатации учитывают *коэффициентами надежности по нагрузке* (γ_f), которые зависят

- от назначения сооружения и
- рассматриваемого предельного состояния.

Расчетные нагрузки

Расчетные нагрузки и воздействия принимаемые в расчетах и получаемые умножением их нормативных значений на соответствующие коэффициенты надежности по нагрузке, например

$$g = g_n \times \gamma_f$$

При расчете на **прочность и устойчивость** (по первой группе предельных состояний) коэффициенты надежности по нагрузке принимают:

- от **веса конструкций** γ_f — 1,1 ($\gamma_f = 1,05$ для металлических конструкций и массивных железобетонных гидросооружений);
- от **веса изоляционных, выравнивающих и отделочных слоев** (утеплителя, засыпки и т. п.), выполняемых в заводских условиях $\gamma_f = 1,2$, на строительной площадке $\gamma_f = 1,3$;
- от **давления грунтов** в природном залегании = 1,1, насыпных = 1,15, от веса снега $\gamma_f = 1,4$ или 1,6; от ветрового давления $\gamma_f = 1,4$; от гидростатического и волнового давления воды $\gamma_f = 1$; от давления льда $\gamma_f = 1,1$; от кранов $\gamma_f = 1 > 1$ и т. д.

В зависимости от состава учитываемых нагрузок различают;

- **основные сочетания**, состоящие из постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок;
- **особые сочетания**, состоящие из постоянных, временных длительных, возможных кратковременных и одной из особых нагрузок.

Вероятность одновременного появления наибольших значений нагрузок или усилий учитывается коэффициентом сочетаний

γ_{lc}

При расчете конструкций на основные сочетания, включающие только одну кратковременную нагрузку, коэффициент сочетаний $\gamma_{lc} = 1$.

При расчете на основные сочетания, включающие две временные нагрузки или более, расчетные величины длительных нагрузок или усилий умножают на коэффициент $\gamma_{lc} = 0,95$, а кратковременных - на $\gamma_{lc} = 0,9$.

Нормативные сопротивления

Нормативные сопротивления R_n . Устанавливаемые нормами проектирования, они являются основными характеристиками *сопротивления материалов силовым воздействиям*.

За нормативное сопротивление принимают наименьшее контролируемое значение *временного сопротивления* или предела текучести материала, определяемое с учетом статистической изменчивости прочности:

$$R_n = R_m (1 - \chi \nu),$$

где R_m — среднее значение показателя прочности;

ν — коэффициент вариации прочности (изменчивости);

$\chi = 1,64$ — число «стандартов», оценивающее вероятность повторения наименьшего контролируемого значения прочности не более чем у 5 % испытанных образцов.

Расчетные сопротивления

Расчетные сопротивления R . Это сопротивления, принимаемые при расчетах конструкций и получаемые делением нормативного сопротивления на *коэффициент надежности по материалу.*

Коэффициент надежности по материалу учитывает возможные отклонения сопротивлений материалов в неблагоприятную сторону от нормативных значений в зависимости от свойств материалов, изменчивости прочностных показателей.

При расчетах по первой группе предельных состояний коэффициент надежности по материалу принимают:

- для стального проката $\gamma_m = 1,025..1,15$;
- для бетона $\gamma_{bc} — 1,3$ (при сжатии) и $\gamma_{bt} = 1,5$ (при растяжении);
- для арматуры $\gamma_s — 1,05... 1,20$;
- для древесины $\gamma_t — 1,7...5,5$.

- Особенности действительной работы и предельных состояний материалов, конструкций и сооружений в целом, имеющие систематический характер, но не отражаемые в расчетах прямым путем, учитывают *коэффициентами условий работы γ* , величины которых установлены СНиПом.

Коэффициенты условий работы учитывают

- *влияние температуры, влажности и агрессивности среды;*
- *длительности действия нагрузки;*
- *условия, характер и стадию работы конструкции;* приближенность расчетных схем и др.
- При благоприятных условиях работы $\gamma > 1$, а при неблагоприятных $\gamma < 1$.

Степень капитальности сооружений, значимость последствий наступления тех или других предельных состояний, определяемая материальным и социальным ущербом, учитывается в расчетах **коэффициентом надежности по назначению γ_n** . Его значение зависит от класса ответственности зданий.

- Для I класса - объекты особо важного народнохозяйственного значения $\gamma_n = 1$;
 - для сооружений II класса (важные народнохозяйственные объекты) $\gamma_n = 0,95$;
 - для сооружений III класса (имеющих ограниченное народнохозяйственное значение) $\gamma_n = 0,9$;
 - для временных сооружений со сроком службы до 5 лет $\gamma_n = 0,8$.
- Гидротехнические сооружения по капитальности** делятся на четыре класса, для которых коэффициенты надежности по назначению составляют:
- 1 класс — 1,25;
 - 2 класс — 1,2;
 - 3 класс — 1,15;
 - 4 класс — 1,1.

На коэффициент γ_n следует делить **предельные значения несущей способности** или **расчетные сопротивления**, предельно допустимые деформации и величины раскрытия трещин либо **умножать величины расчетных нагрузок или усилия**.

При расчете конструкций **по первой группе предельных** состояний (по несущей способности) условие прочности с учетом рассмотренных расчетных коэффициентов можно представить в общем виде:

$$\sum N_n \gamma_f \gamma_{lc} \leq \Phi \left[S; \frac{R_n}{\gamma_m} \frac{\gamma}{\gamma_n} \right],$$

где $\sum N_n \gamma_f \gamma_{lc}$ — расчетное усилие, полученное от различных нагрузок со своими коэффициентами надежности по нагрузкам и сочетаний;

Φ — функция несущей способности;

S — геометрические характеристики сечения.

Смысл этой формулы состоит в том, что наибольшее внешнее расчетное усилие не должно превышать наименьшую несущую способность.

Основное условие для расчета конструкций по **второй группе предельных состояний** — по перемещениям

$$\Delta \leq f \frac{1}{\gamma_n} ,$$

где Δ — перемещения от расчетных нагрузок с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 1$; f — предельная нормативная величина перемещений. Железобетонные конструкции, кроме того, в зависимости от категории требований к их трещиностойкости рассчитывают по образованию трещин

$$T \leq T_{crc} \frac{1}{\gamma_n}$$

или по их раскрытию

$$a_{crc} \leq [a_{crc}] \frac{1}{\gamma_n} .$$

Расчет по предельным состояниям конструкции в целом, а также отдельных ее частей должен производиться для всех стадий: изготовления, транспортирования, возведения и эксплуатации. В зависимости от применяемых материалов и функционального назначения конструкций и сооружений их проектирование производится по соответствующим СНиП или другим нормативным документам.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

СТАЛИ, ИХ СОСТАВ И СВОЙСТВА

Материалами для инженерных металлических конструкций являются прокатная сталь, стальное литье и алюминиевые сплавы. Наиболее часто (более 95%) применяют прокатную сталь.

Сталь — это *сплав железа с углеродом* и незначительным количеством примесей (которые попадают из руды или образуются в процессе выплавки) и легирующих добавок (которые вводят для улучшения свойств стали).

Стали подразделяются на *углеродистые и легированные*.

Углеродистые стали в зависимости от содержания углерода делят на: малоуглеродистые (0,09... 0,23% углерода), среднеуглеродистые (0,24...0,5% углерода) и высокоуглеродистые (0,51...1,2% углерода).

В инженерных конструкциях применяют в основном *малоуглеродистую сталь*, обладающую *большой пластичностью и хорошей свариваемостью*.

Механические свойства стали

Эти свойства стали определяют такие показатели, как прочность, упругость и пластичность, а также склонность к хрупкому разрушению, которое косвенно оценивается ударной вязкостью.

Прочность стали определяется сопротивляемостью материала внешним силовым воздействиям.

Упругость характеризуется свойством материала восстанавливать свою первоначальную форму после снятия внешних нагрузок.

Пластичность — свойство материала не возвращаться в свое первоначальное состояние после снятия внешних нагрузок, т. е. получать остаточные деформации.

Хрупкость характеризуется разрушением материала при малых деформациях.

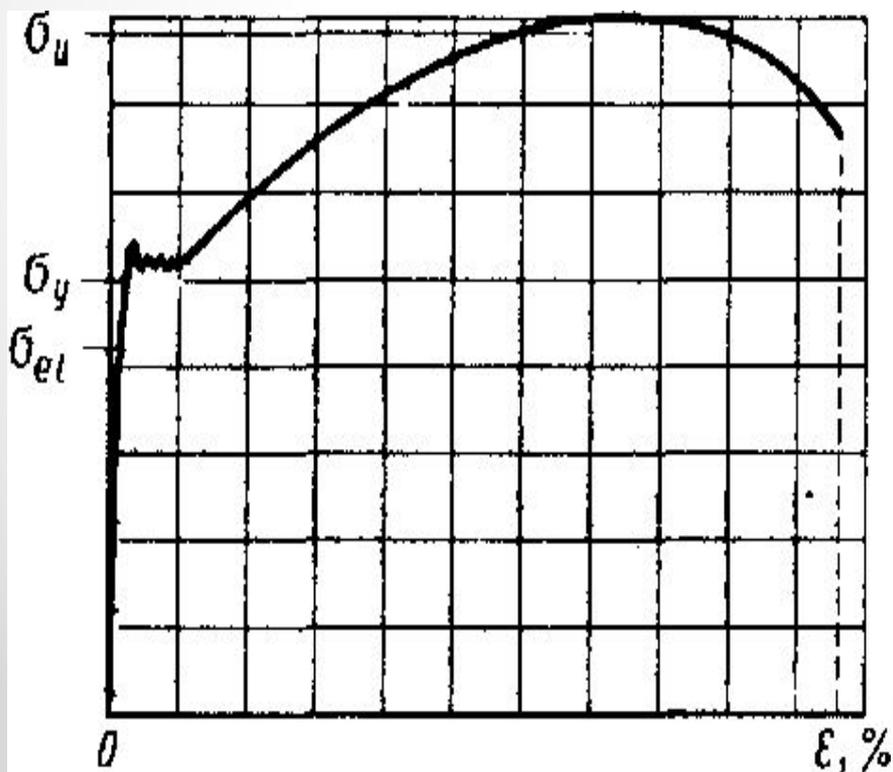
Важнейшими показателями механических свойств стали являются:

предел текучести (σ_y),

временное сопротивление (предел прочности — σ_u),

относительное удлинение (ε).

Предел текучести и временное сопротивление характеризуют *прочность стали*, относительное удлинение — *пластические свойства стали*.



До достижения стандартным образцом из малоуглеродистой стали напряжений, равных *пределу текучести*, материал работает *практически упруго*. Затем в нем развиваются большие деформации при постоянном напряжении. В результате образуется *площадка текучести* (горизонтальный участок диаграммы на рис

Обозначение марок малоуглеродистой стали

Например, ВСтЗспб, ВСтЗГпсб, 18сп, 18Гпс.

Буква В указывает, что сталь поставляется с гарантиями механических свойств и химического состава, **буквы Ст — сталь, цифра 3 — условный порядковый номер** марки малоуглеродистой стали. Марки стали различаются в зависимости от химического состава и механических свойств от Ст0 до Ст5.

В инженерных конструкциях применяется сталь **СтЗ**, которая имеет достаточно **высокий предел текучести, пластична, хорошо сваривается**. Степень раскисления стали обозначается индексами «сп» (спокойная), «пс» (полуспокойная) и «кп» (кипящая). Для обозначения **полуспокойной стали** с повышенным содержанием **марганца добавляют букву Г**.

Последняя цифра указывает **катеорию стали**. Стали марок 18сп и 18пс поставляются по группе В (цифра **18 показывает среднее содержание углерода в сотых долях процента**; остальные обозначения те же).

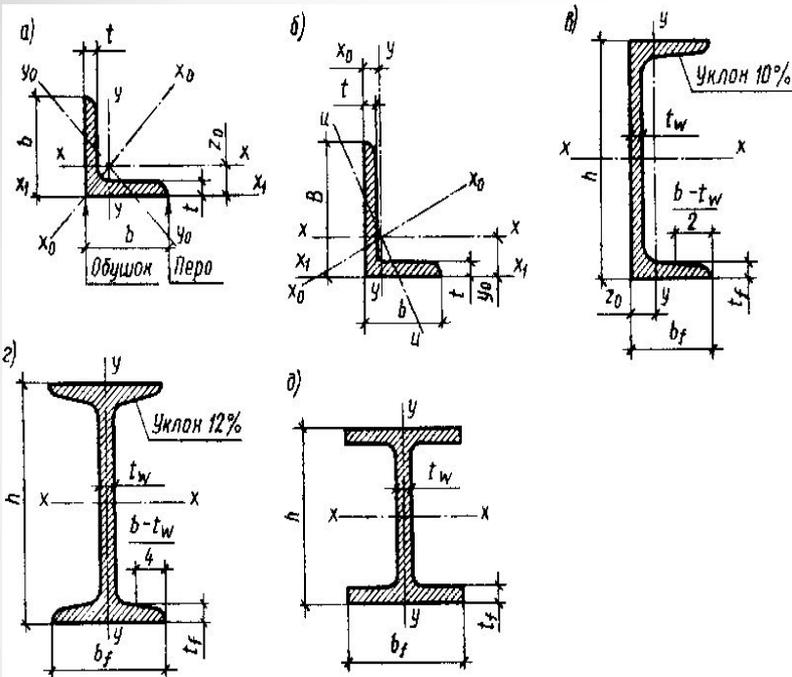
Для гидротехнических сооружений, мостов и других особо ответственных конструкций предназначены малоуглеродистые **стали марки М16С** (по ГОСТ 6713—75*) и **марки 16Д** (по ГОСТ 6713—75*)..

СОРТАМЕНТ СТАЛЕЙ

В инженерных конструкциях сталь применяют в виде прокатных изделий, получаемых с металлургических заводов и имеющих различную форму поперечного сечения.

Листовая сталь распространена наиболее широко. Она часто составляет 40...60 % массы всего сооружения. Некоторые конструкции (составные балки, листовые оболочки и др.) почти целиком выполняют из листовой стали. Причиной такого широкого применения листа является неограниченная возможность создания любых профилей необходимых размеров, мощности и конфигурации сечения путем сварки листов.

Прокатные профили



Угловые профили (рис. а, б) широко применяют для несущих элементов, работающих на *осевые силы*, в качестве связующих элементов.

Более экономичны уголки с меньшими толщинами полок.

Уголки -двух типов: *равнополочные и неравнополочные*.

Двутавры, используемые в инженерных конструкциях, прокатываются двух типов: *обыкновенные и широкополочные*.

Балки двутавровые – основной балочный профиль, работают на изгиб, чем и определяется их конфигурация (рис. г). Балки двутавровые широкополочные высотой до 1000 мм имеют параллельные грани полок (рис. д). Выпускают трех типов: *нормальные двутавры (Б), широкополочные двутавры (Ш) и колонные двутавры (К)*. Из широкополочных двутавров путем разрезки стенки в продольном направлении получают *тавровые профили*.

Швеллер отличается от двутавра сдвинутой к краю полок стенкой. Он прокатывается двух типов с уклоном внутренних граней полок (рис. в) и с параллельными гранями полок.

Трубы стальные бывают бесшовные **горячекатаные и электросварные.**

Трубы менее подвержены коррозии, чем фасонные профили, благодаря чему их часто применяют в гидротехническом строительстве.

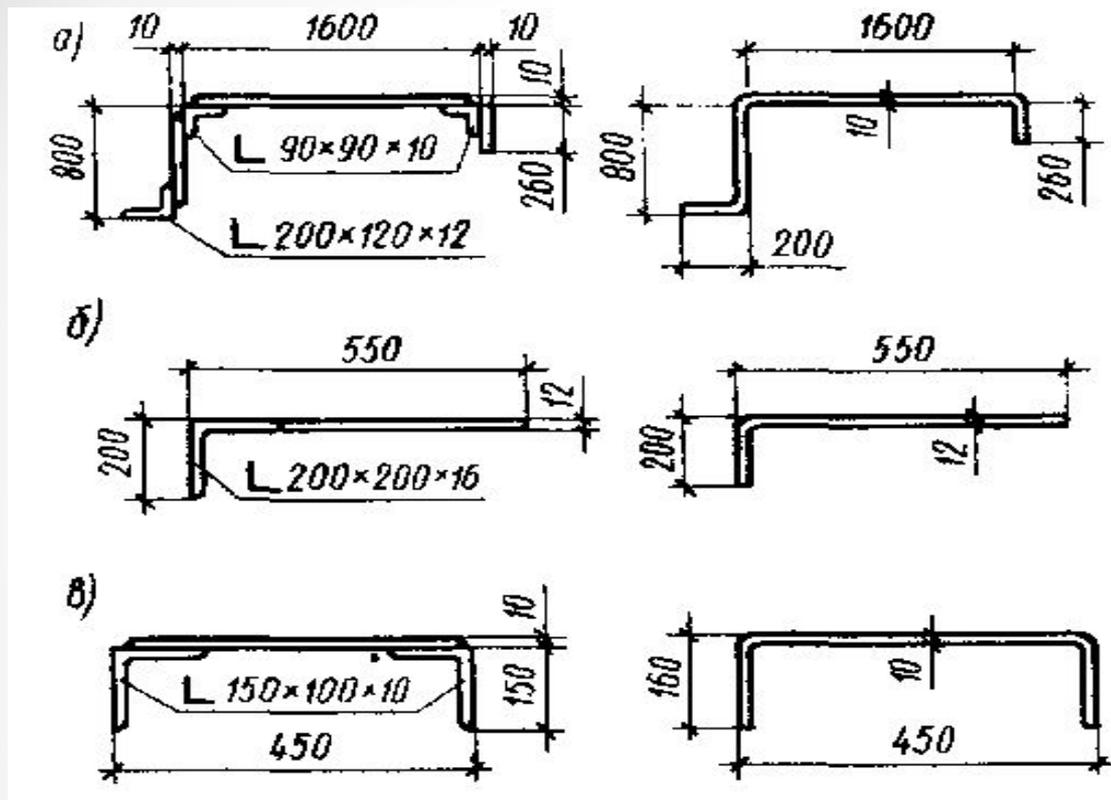
Кроме перечисленных основных профилей в инженерных конструкциях применяют

сталь квадратную;

сталь круглую;

также ряд других профилей.

гнутые профили (рис.)



Сложные составные профили, замененные гнутыми: а — закладные части и облицовка пазов гидротехнических затворов; б — закладные части обратного пути гидротехнического затвора; в — ветвь колонии промышленного здания

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ. РАСЧЕТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Металлические конструкции рассчитывают на все виды *силовых воздействий по методу предельных состояний*.

За нормативное сопротивление металла R_{ynj} , принимают наименьшее значение *предела текучести*, т. е. $R_{yn} = \sigma_y$.

Для хрупких металлов, а также конструкций, работающих на растяжение за *величину нормативного сопротивления* R_{un} принимают наименьшее значение *временного*

сопротивления на разрыв (предел прочности), т.е. $R_{un} = \sigma_u$.

Расчетное сопротивление R_y или R_u (по пределу текучести или по временному сопротивлению) определяют делением нормативного на коэффициент надежности по материалу $\gamma_m > 1$. γ_m меняется от 1,025 до 1,15.

ЦЕНТРАЛЬНО-РАСТЯНУТЫЕ И ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Центрально-растянутые элементы. Основная проверка для центрально-растянутых элементов - *проверка прочности*, относящаяся к первой группе предельных состояний.

Напряжения в центрально-растянутом элементе

$$\sigma = N/A_n < R_y \gamma_c$$

где N — усилие в элементе от расчетных нагрузок;

A_n — площадь поперечного сечения проверяемого элемента за вычетом ослаблений (площадь сечения нетто);

R_y — расчетное сопротивление;

γ_c — коэффициент условий работы.

Расчет на *прочность растянутых элементов* конструкций из стали с отношением $R_u/\gamma_u > R_y$, эксплуатация которых возможна и после достижения металлом предела текучести, выполняют по формуле

$$\sigma = N/A_n < R_y \gamma_c / \gamma_u$$

γ_u — коэффициент надежности.

● **Центрально-сжатые элементы.** Эти элементы рассчитывают по первой группе предельных состояний, при этом для коротких элементов, длина которых превышает наименьший поперечный размер не более чем в 5...6 раз, проверяют прочность по формуле (3.1), а для длинных гибких элементов — устойчивость по формуле

$$\sigma = N/A\varphi \leq R_y\gamma_c,$$

где A — площадь поперечного сечения брутто; φ — коэффициент продольного изгиба, определяемый из табл. 3.3 в зависимости от гибкости элемента λ .

Учитывая традиционное соотношение размеров элементов в металлических конструкциях, основной является проверка устойчивости.

На работу сжатых элементов оказывают влияние случайные эксцентриситеты, возникающие во всех элементах реальных конструкций.

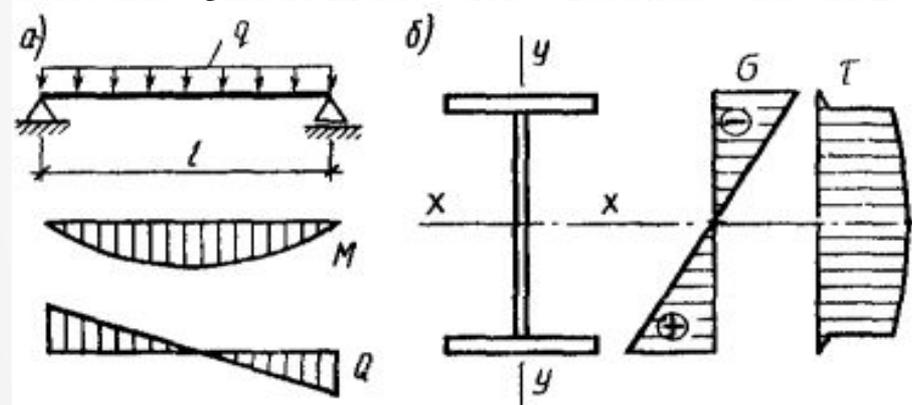
Происхождение этих эксцентриситетов разнообразно: ими могут быть эксцентриситеты в приложении нагрузки, начальные прогибы (погнутости) и т. п. За счет эксцентриситетов практически все элементы, кроме сжатия, работают и на изгиб. Влияние случайных эксцентриситетов на работу элементов разной гибкости оценено методами математической статистики.

Таким образом, несущая способность сжатого элемента исчерпывается в результате того, что напряжения в нем достигли критического значения. Проверка устойчивости центрально-сжатого элемента сводится к сравнению напряжений, равномерно распределенных по сечению, с критическим вычисленным с учетом случайных эксцентриситетов: $\sigma = N/A \leq \sigma_{cr}$. Чтобы не вычислять

ИЗГИБАЕМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Изгибаемые элементы рассчитывают по первой группе предельных состояний, когда проверяют их прочность и устойчивость, и по второй группе предельных состояний, когда проверяют их жесткость (прогиб). Расчеты на прочность и устойчивость ведут по расчетным нагрузкам, а расчет на прогиб — по нормативным.

Прочность изгибаемых элементов проверяют по нормальным, касательным и приведенным напряжениям. Если балка работает на изгиб в одной из главных плоскостей



(рис. 3.1, а) в пределах упругости, то в сечениях балки получается треугольная эпюра нормальных напряжений (рис. 3.1, б). Максимальное значение этих напряжений в крайних волокнах

Рис. 3.1. Работа балки на изгиб:

а — расчетная схема и эпюры моментов и поперечных сил; б — поперечное сечение и эпюры нормальных и касательных напряжений

$$\sigma = M/W_{n,\min} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.12)$$

где $W_{n,\min}$ — наименьшее значение момента сопротивления с учетом ослаблений.

Касательные напряжения в изгибаемых элементах проверяют в местах наибольшей поперечной силы Q по формуле

$$\tau = QS/(It) \leq R_s \gamma_c, \quad (3.13)$$

где S — статический момент (брутто) сдвигаемой части сечения относительно нейтральной оси; I — момент инерции брутто всего поперечного сечения; t — толщина элемента в месте, где проверяют касательные напряжения (обычно толщина стенки по нейтральному слою); R_s — расчетное сопротивление на сдвиг.

ВНЕЦЕНТРЕННО РАСТЯНУТЫЕ И ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

● **Внецентренно растянутые элементы.** К ним относят элементы, в которых одновременная работа на растяжение и изгиб может происходить как от внецентренно расположенных растягивающих сил, так и от совместного действия сил, центрально растягивающих элемент, и сил, создающих поперечный изгиб.

Возникающие при этом нормальные напряжения от обоих силовых воздействий суммируются и достигают максимальных значений в наиболее удаленных точках сечения. Во внецентренно растянутых элементах производят проверку прочности:

при изгибе в одной плоскости и растяжении

$$\sigma = N/A_n + M/W_n \leq R_y \gamma_c; \quad (3.21)$$

при изгибе в двух главных плоскостях (косом изгибе) и растяжении

$$\sigma = \frac{N}{A_n} + \frac{M_x}{W_{xn}} + \frac{M_y}{W_{yn}} \leq R_y \gamma_c. \quad (3.22)$$

● **Внецентренно сжатые элементы.** В этих элементах сжимающая сила прикладывается с эксцентриситетом e (рис. 3.3, а). При

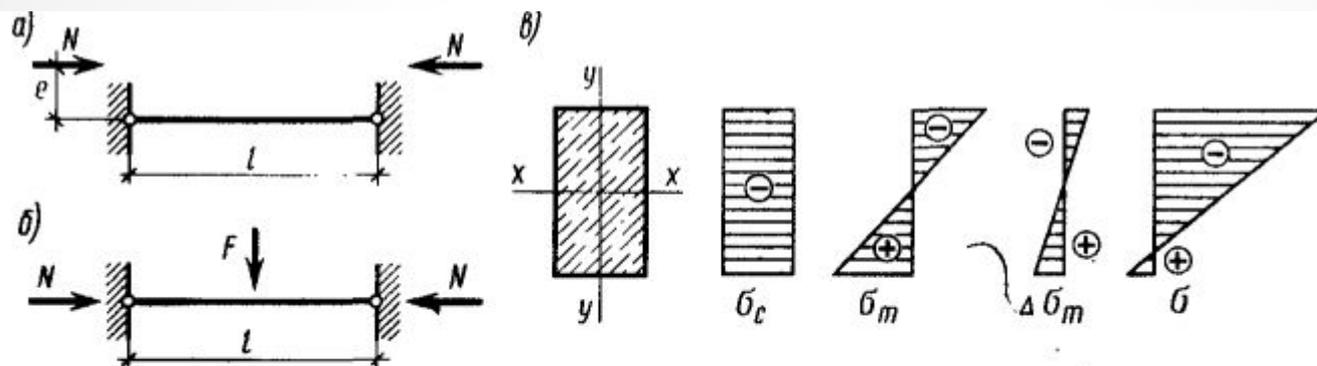


Рис. 3.3. Работа элемента на внецентренное сжатие

одновременном приложении продольной осевой силы и поперечной нагрузки, вызывающей изгиб, стержень будет сжатоизогнутым (рис. 3.3, б).

Проверку устойчивости в плоскости действия момента для элементов постоянного сечения производят по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e A} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.24)$$

где N — продольная сжимающая сила, приложенная с эксцентриситетом $e = M/N$; A — площадь поперечного сечения элемента брутто; φ_e — коэффициент понижения несущей способности внецентренно сжатого элемента вследствие возможности потери устойчивости.