

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. СТАЛЬ КАК МАТЕРИАЛ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	5
2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ. НАГРУЗКИ. НОРМАТИВНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ .....	8
3. РАБОТА И РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	14
4. РАБОТА И РАСЧЕТ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	27
5. РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	57
Библиографический список.....	58

## ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для изучения теоретических основ работы стальных конструкций. Пособие содержит методические рекомендации к выполнению курсового проекта, а также указания по расчету и проектированию основных несущих конструкций балочной клетки рабочей площадки.

Издание может использоваться не только при разработке курсового проекта, но и при проведении практических занятий по металлическим конструкциям.

### 1. СТАЛЬ КАК МАТЕРИАЛ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Сталь* — поликристаллический материал, состоит из большого числа кристаллов или зерен, произвольно ориентированных относительно друг друга. Каждый кристалл (зерно) обладает анизотропными свойствами, однако наличие в стали множества мелких и по-разному ориентированных зерен ведет к тому, что в среднем по всем направлениям сталь имеет одинаковые свойства. Зерна, образующие сталь, делятся на феррит, цементит и перлит.

Зерна *феррита* занимают основной объем стали и состоят из чистого железа. *Цементит* — карбид железа  $FeC_3$ , *перлит* — смесь феррита и цементита. Феррит пластичный и относительно малопрочный материал, цементит хрупкий и прочный, а перлит обладает промежуточными свойствами. Наличие таких разных по свойствам зерен в структуре стали проявляется в ее работе под нагрузкой.

Значительное влияние на структуру, а значит, и на механические свойства стали оказывает скорость остывания. При быстром охлаждении зерна очень мелкие, прочность стали становится больше, но пластичность ее при этом снижается. Быстрое охлаждение стали называется *закалкой*. Для увеличения пластичности закаленной стали ее нагревают до температуры выше  $700\text{ }^{\circ}C$ , выдерживают некоторое время, а затем охлаждают с контролируемой скоростью. При этом снижаются напряжения между зернами, пластичность стали увеличивается, а прочность незначительно снижается. Эта термическая процедура называется *отпуск*.

Испытание стальных образцов на растяжение показало, что при нагружении до напряжений, равных пределу пропорциональности, сталь работает упруго в соответствии с законом Гука, после снятия нагрузки на этой стадии деформации исчезают. С ростом напряжений выше предела пропорциональности начинают происходить сдвиги в отдельных зернах феррита, пропорциональность между деформациями и напряжениями нарушается. На этой стадии развитию плоскостей сдвига по всему образцу препятствуют более прочные зерна перлита и цементита. Дальнейшее увеличение напряжений ведет к тому, что плоскости сдвига пронизывают все сечение. Деформации при этом растут без увеличения напряжений. На диаграмме появляется площадка текучести, длина которой составляет от 1,5 до 2,5 %. Площадка текучести ограничивается из-за того, что развитие плоскостей сдвига сдерживается на границах зерен. Ограничение распространения плоскостей сдвига требует для роста деформаций увеличения напряжений, а на диаграмме появляется участок, называемый *стадией самоупрочнения*. При приближении напряжений к временному сопротивлению в растягиваемом образце возникает утонение (шейка). При дальнейшем росте напряжений именно в шейке и происходит разрыв растягиваемого образца.

По прочности стали делят на 3 группы: обычной прочности (предел текучести до  $29\text{ кН/см}^2$ ); повышенной прочности (предел текучести от 29 до  $40\text{ кН/см}^2$ ); высокой прочности (предел текучести больше  $40\text{ кН/см}^2$ ). На рис. 1.1 показана диаграмма работы стали на растяжение.



Рис. 1.1. Диаграмма работы стали:  
 $\sigma_{вр}$  — временное сопротивление стали;  $\epsilon_{ост}$  — остаточная деформация

Для определения механических свойств стали проводят испытания образцов на растяжение. При испытании образцов из стали *обычной прочности* на диаграмме деформация — напряжение после упругого участка, где справедлив закон Гука, при напряжениях, равных пределу текучести, наблюдается площадка текучести, где деформации растут без увеличения напряжений. Протяженность площадки текучести для таких сталей достигает 2,5 %. При достижении напряжениями в образце временного сопротивления происходит разрыв стали. Удлинение при разрушении достигает 25 %. Стали обычной прочности весьма пластичны. Помимо протяженной площадки текучести для них характерна значительная разница между пределом текучести и временным сопротивлением, которое составляет 0,6...0,7. Стали обычной прочности хорошо свариваются и имеют невысокую коррозионную стойкость.

Стали *повышенной прочности* — это или низколегированные стали, или термоупрочненные углеродистые стали. Они менее пластичны. Площадка текучести у них 1...1,5 %, отношение предела текучести к временному сопротивлению 0,7...0,8. Сталь имеет высокую ударную вязкость, что позволяет успешно использовать ее при пониженных температурах эксплуатации.

Стали *высокой прочности* легированные и, как правило, термообработанные. Эти стали могут вообще не иметь площадки текучести на диаграмме растяжения. Для нормирования предела текучести используется напряжение, при достижении которого остаточная деформация составляет 0,2 %. Отношение предела текучести к временному сопротивлению составляет 0,8...0,9, что требует расчета этих сталей только в упругой стадии.

Увеличение содержания углерода в стали ведет к росту ее прочности, но снижает ее пластические свойства и свариваемость. В строительных сталях содержание углерода ограничено величиной 0,22 %, что позволяет ее надежно сваривать, а сами строительные стали — это малоуглеродистые стали.

Кроме основных элементов (железа и углерода) в состав стали входят и другие компоненты. В зависимости от влияния на свойства стали химические элементы делятся на *легирующие добавки* и *вредные примеси*.

В качестве легирующих добавок используются кремний (С), марганец (Г), медь (Д), хром (Х), никель (Н), ванадий (Ф), молибден (М), алюминий (Ю), азот (А). Буквы, указанные в скобках, применяются для условного обозначения легирующего элемента в марке стали. Стали, в состав которых входят легирующие элементы, называются *легированными*.

Основное назначение легирующих элементов — улучшить механические свойства стали. Чаще всего они увеличивают ее прочность. Некоторые элементы, увеличивая прочность, снижают пластичность (например кремний, марганец, медь). Ряд элементов используется для увеличения коррозионной стойкости стали. Азот в виде химических соединений с легирующими элементами (нитридами) способствует получению мелкозернистой структуры стали и улучшению механических характеристик.

Вредными примесями являются азот в несвязанном состоянии, кислород, водород, которые повышают хрупкость стали. Сера, образуя легкоплавкое сернистое железо, способствует образованию трещин при повышенной температуре (красноломкость). Фосфор образует твердый раствор с ферритом, повышая хрупкость стали при пониженных температурах (хладноломкость). Однако при наличии алюминия фосфор может играть легирующую роль, повышая коррозионную стойкость.

Еще одной особенностью легированных сталей является их худшая свариваемость. Для оценки свариваемости легированной стали используют углеродный эквивалент, который позволяет привести содержание легирующих элементов к углероду. По величине углеродного эквивалента можно сделать вывод о том, как будет свариваться легированная сталь.

Сталь выплавляется в мартеновских печах и кислородных конвертерах. Второй способ выплавки значительно дешевле и производительнее. Мартеновская и конверторная стали имеют одинаковое качество, их используют в большинстве строительных конструкций. Наиболее качественную сталь получают в электропечах, но это самая дорогая сталь, она применяется только для очень ответственных элементов конструкций.

В зависимости от того, как сталь ведет себя при кристаллизации, она бывает кипящая, спокойная и полуспокойная.

*Кипящая* сталь при разливке в изложницы кипит из-за интенсивного выделения растворенных в ней газов. Такая сталь более загрязнена и неоднородна. Наиболее неоднородна головная часть слитка, в ней наблюдается концентрация вредных примесей и углерода. Головную часть слитка (примерно 5 % от общей массы), насыщенную примесями и дефектами, не используют, а отрезают и направляют на переплавку. Кипящие стали плохо сопротивляются хрупкому разрушению и склонны к старению. В связи с такими свойствами кипящей стали ее не используют для ответственных конструкций.

Для повышения качества стали ее раскисляют, вводя в расплав кремний, алюминий или марганец, которые связывают кислород и образуют многочисленные очаги кристаллизации, следствием чего является мелкокристаллическая структура стали. Раскисленные стали не кипят при разливке и называются *спокойными*. Для обеспечения гарантированных свойств стали от слитка отрезают примерно 15 %. Спокойные стали более однородные и менее хрупкие, чем кипящие, хорошо свариваются и сопротивляются динамическим воздействиям. Такие стали дороже, чем кипящие, и используются для ответственных конструкций.

Промежуточное положение между кипящими и спокойными сталями занимают *полуспокойные*, которые раскисляются меньшим количеством раскислителя, что и определяет их свойства.

В стальных конструкциях при эксплуатации возникают напряжения, которые можно классифицировать следующим образом:

- 1) основные напряжения — напряжения от расчетных нагрузок, полученные расчетом принятой расчетной схемы конструкции. Используются при проектировании конструкции;
- 2) дополнительные напряжения — возникают в элементах конструкций из-за наличия дополнительных связей, не учтенных в расчетной схеме, и отличия фактической конструкции от идеализированной расчетной схемы. Дополнительные напряжения при правильно выбранной расчетной схеме, как правило, невелики. При допустимости пластических деформа-

ций эти напряжения не учитываются, а при расчете с учетом возможного хрупкого разрушения их необходимо учитывать. Учет дополнительных напряжений для некоторых конструкций, где их влиянием пренебречь нельзя, осуществляется за счет использования коэффициента условий работы конструкции. Учитывают эти напряжения в нормах расчета и при определении коэффициента продольного изгиба, что обусловлено более ранним наступлением пластических деформаций;

3) местные напряжения — действуют на отдельных ограниченных участках конструкции. В конструкциях бывают 2 вида таких напряжений: 1) возникающие в результате локального силового воздействия (например сосредоточенная сила на балку) и учитываемые при проектировании конструкции; 2) возникающие при концентрации напряжений и не учитываемые при нормальной температуре и статической нагрузке;

4) начальные напряжения — действуют в конструкции из-за пластических деформаций, возникающих при прокатке, сварке, сборке и монтаже. Эти напряжения уравновешены в конструкции, влияют на ее деформации, а из-за развития пластических деформаций их влияние на прочность конструкции не учитывается. При расчете конструкций на устойчивость остаточные напряжения учитывают при нормировании коэффициента продольного изгиба;

5) предварительные напряжения — действуют в ненагруженной конструкции из-за ее предварительного напряжения. При расчете эти напряжения учитываются.

Сложное напряженное состояние возникает при действии двух или трех главных напряжений. При данном состоянии пластические деформации наступают при напряжениях, отличных от предела текучести одноосного напряжения. Так, при двухосном напряжении однозначные напряжения в двух направлениях вызывают повышение предела текучести и снижают пластичность металла. При разнозначных напряжениях предел текучести уменьшается, а пластичность металла увеличивается.

Для оценки влияния сложного напряженного состояния используются разные теории прочности. Для металла как упругопластического материала наиболее справедлива четвертая, или энергетическая, теория прочности:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2))},$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — нормальные напряжения;  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  — касательные напряжения в точке.

## **2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ. НАГРУЗКИ. НОРМАТИВНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

В процессе проектирования строительных конструкций выполняется их расчет. Цель расчета — обоснование сечений элементов, проверка прочности, устойчивости и жесткости конструкции. Конструкция должна полностью удовлетворять всем эксплуатационным требованиям. При расчете конструкций необходимо выполнение противоречивых требований. С одной стороны, конструкция должна быть экономичной (минимальный расход металла, низкие трудоемкость, стоимость изготовления и монтажа), с другой — должна иметь высокую надежность в течение всего периода эксплуатации с учетом конкретных условий работы, определенные резервы, учитывающие возможное случайное превышение нагрузок, неблагоприятное отклонение свойств материалов, а также отличие действительной работы конструкции от теоретической модели.

Расчет конструкций производят с использованием положений сопротивления материалов, теории упругости и строительной механики. Расчетом получают внутренние усилия и перемещения, возникающие в конструкции от приложенных к ней нагрузок. С развитием

вычислительной техники и численных методик можно рассчитать любую, даже самую сложную, конструкцию.

Для успешного расчета необходимо создать расчетную схему, близкую к рассчитываемой конструкции, и правильно задать нагрузки, действующие на нее, а после расчета — оценить усилия (напряжения) и перемещения. Кроме того, необходимо обеспечить требуемую надежность конструкции в течение всего срока эксплуатации. Все эти вопросы решаются выбором соответствующей методики расчета.

Исторически первым был *метод расчета по допускаемым напряжениям*, суть которого состоит в том, чтобы напряжения в элементах конструкции не превышали допускаемого напряжения

$$\sigma_n \leq [\sigma] = \sigma_T / k ,$$

где  $\sigma_n$  — напряжения в элементе конструкции;  $\sigma_T$  — предел текучести;  $k$  — коэффициент запаса.

Напряжения в конструкции определялись от нормативной нагрузки, т.е. нагрузки, действующей при нормальных условиях эксплуатации. Предел текучести определяется его значением, установленным в технических условиях на поставку металла. Коэффициент запаса назначался с учетом опыта проектирования и эксплуатации. Для металлических конструкций он составлял 1,8...2,0. Существенным недостатком данной методики является непонятная природа коэффициента запаса.

В 1955 г. был разработан *метод расчета конструкций по предельным состояниям*. Главное в этой методике — учет изменчивости свойств материала и действующей на конструкцию нагрузки. Вместо единственного коэффициента запаса введен ряд коэффициентов, значения которых обоснованы методами математической статистики.

*Предельным состоянием* конструкции называется такое состояние, при котором она перестает удовлетворять эксплуатационным требованиям.

Предельные состояния разделяют на 2 группы:

- первая группа включает предельные состояния, которые ведут к полной непригодности к эксплуатации конструкций, оснований (зданий или сооружений в целом) или к полной (частичной) потере несущей способности зданий и сооружений в целом;
- вторая группа включает предельные состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций (оснований) или уменьшающие долговечность зданий (сооружений) по сравнению с предусматриваемым сроком службы.

Предельные состояния *первой группы* характеризуются:

- разрушением любого характера (например пластическим, хрупким, усталостным) (1a);
- потерей устойчивости формы, приводящей к полной непригодности к эксплуатации (1b);
- потерей устойчивости положения (1c);
- переходом в изменяемую систему (1d);
- качественным изменением конфигурации (1e);
- другими явлениями, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации (например чрезмерными деформациями в результате ползучести, пластичности, сдвига в соединениях, раскрытия трещин, а также образованием трещин) (1f).

Предельные состояния *второй группы* характеризуются:

- достижением предельных деформаций конструкций (например предельных прогибов, поворотов) или предельных деформаций основания (2a);
- достижением предельных уровней колебаний конструкций или оснований (2b);
- образованием трещин (2c);
- достижением предельных раскрытий или длин трещин (2d);
- потерей устойчивости формы, приводящей к затруднению нормальной эксплуатации (2e);

- другими явлениями, при которых возникает необходимость временного ограничения эксплуатации здания или сооружения из-за неприемлемого снижения их срока службы (например коррозионные повреждения) (2f).

Первое предельное состояние возникает при нарушении условия

$$N \leq [N],$$

где  $N$  — усилие, возникающее в элементе от внешних воздействий;  $[N]$  — предельное усилие, выдерживаемое элементом.

При наступлении первого предельного состояния эксплуатация конструкции полностью прекращается из-за ее возможного обрушения. За все время службы сооружения первое предельное состояние не должно быть достигнуто. Поэтому  $N$  — это максимально возможная величина усилия, определенная от максимально возможной нагрузки на конструкцию, а  $[N]$  — минимально возможная несущая способность элемента.

Предельное состояние второй группы возникает при нарушении условия

$$f \leq [f],$$

где  $f$  — перемещения конструкции от эксплуатационной нагрузки;  $[f]$  — допустимые по условиям эксплуатации конструкции перемещения.

Второе предельное состояние более мягкое, его достижение не ведет к разрушению конструкции. Расчет на второе предельное состояние ведут от нормативных нагрузок.

Важным является правильное определение нагрузок, действующих на конструкцию. Принципиальная особенность нагрузок — их изменчивость. Несмотря на случайный характер, нагрузки в методе предельных состояний используются в виде детерминированных вполне определенных значений. Для расчета по методу предельных состояний используют 2 значения нагрузки — нормативное и расчетное.

*Нормативная нагрузка* характерна для любого воздействия. Для собственного веса конструкции нормативная нагрузка определяется ее весом по проектным данным. Нормативная нагрузка от оборудования и транспортных средств назначается по их паспортным данным. Атмосферные воздействия специально исследуются и назначаются так, чтобы за весь период эксплуатации нагрузка на сооружение не имела более неблагоприятное значение, чем та, которая была принята при проектировании.

В качестве *расчетной нагрузки* принимается значение, как правило, превышающее значение нормативной нагрузки. В некоторых случаях в качестве расчетной принимается не большее, а меньшее значение (например при оценке устойчивости положения высотных сооружений, расчете анкерных болтов и т.п.).

Расчетная и нормативная нагрузки связаны простой зависимостью

$$\gamma_f = F / F_n,$$

где  $\gamma_f$  — коэффициент надежности по нагрузке;  $F$  — расчетная нагрузка;  $F_n$  — нормативная нагрузка.

Для назначения коэффициента надежности по нагрузке проводят натурные наблюдения за изменчивостью нагрузки. На основании наблюдений для разных нагрузок установлены законы их изменения.

Для большинства нагрузок характерна зависимость от очень многих случайных факторов, поэтому для описания закона изменения нагрузок часто используют закон распределения Гаусса или закон нормального распределения плотности вероятности значения нагрузок (рис. 2.1):

$$p(F) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F-F_m)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное или стандартное отклонение;  $F_m$  — среднее значение нагрузки или математическое ожидание.

На кривой Гаусса максимум соответствует математическому ожиданию величины, т.е. наиболее часто наблюдаемому значению. Если принять математическое ожидание в качестве нагрузки, то обеспеченность нагрузки составит 0,5, т.е. в 50 % случаев нагрузка на конструкцию не превысит принятое значение. Этого совершенно недостаточно, чтобы обеспечить надежную эксплуатацию конструкции, поэтому для назначения расчетной нагрузки задаются требуемой обеспеченностью нагрузки, а затем определяют величину нагрузки, удовлетворяющую этим требованиям.

Обеспеченность нагрузки может быть определена так:

$$\omega(F_p) = 1 - P(F_p),$$

где  $P(F_p)$  — вероятность появления нагрузки величиной, превышающей  $F_p$ ,

$$P(F_p) = \int_{F_p}^{\infty} p(F) dF.$$

От величины принятой обеспеченности зависит значение расчетной нагрузки. При очень большой обеспеченности нагрузка будет большой (при обеспеченности 1 величина нагрузки стремится к бесконечности), что экономически нецелесообразно. В качестве обеспеченности в методе предельных состояний принято значение 0,99865, удовлетворяющее условиям обеспечения надежности эксплуатации и экономичности конструкции. Выбор этой величины соответствует отклонению от математического ожидания примерно в  $3\sigma$ . Таким образом, при назначении расчетных нагрузок обеспечивается надежность по нагрузке в 0,99865. Расчетная нагрузка может быть больше или меньше нормативной в зависимости от того, большая или меньшая нагрузка опасны для конструкции. Величина коэффициента надежности по нагрузке  $\gamma_f$  назначается в строительных нормах и определяется видом нагрузки.

В зависимости от продолжительности действия нагрузки делятся на:

*постоянные* — действуют весь период эксплуатации сооружения: собственный вес конструкций; вес грунта в насыпках; гидростатическое давление; предварительное напряжение;

*временные* — меняются в процессе эксплуатации. В зависимости от продолжительности действия временные нагрузки делятся на длительные и кратковременные.

К *длительным* нагрузкам нормы относят: вес временных перегородок, подливок и подбетонок под оборудование; вес стационарного оборудования; вес жидкостей и твердых тел, заполняющих оборудование; давление газа, жидкости, сыпучих тел в емкостях и трубопроводах; избыточное давление или разрежение при вентиляции шахт; нагрузки на перекрытия от складированных материалов и стеллажного оборудования в складских помещениях, холодильниках, зерно-, книгохранилищах, архивах и т.п.; температурные технологические воздействия от стационарного оборудования; вес слоя воды на водонаполненных покрытиях; вес отложений производственной пыли; полезную нагрузку на перекрытия с пониженным нормативным значением; вертикальные нагрузки от опорных и подвесных мостовых кранов с пониженным нормативным значением; снеговые нагрузки с пониженным нормативным значением, полученным умножением полного значения на коэффициент 0,7; температурные климатические воздействия с пониженными нормативными значениями; воздействия, вызванные

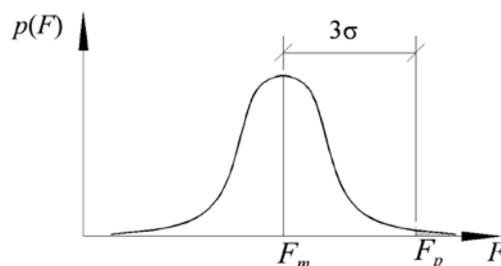


Рис. 2.1. Кривая распределения нагрузки:  
 $F_p$  — расчетная нагрузка

деформациями основания без коренного изменения структуры грунта, а также оттаиванием вечномерзлых грунтов; воздействия из-за усадки, ползучести, изменения влажности материала.

К *кратковременным* нагрузкам нормы относят: нагрузки от оборудования при его пуске, остановке и испытании, а также при его перестановке и замене; вес людей, ремонтных материалов при обслуживании и ремонте оборудования; полезную нагрузку на перекрытия зданий с полным нормативным значением; нагрузки от подъемно-транспортного оборудования; снеговые нагрузки с полным нормативным значением; температурные климатические воздействия с полным нормативным значением; ветровые нагрузки; гололедные нагрузки.

В моменты экстремальных воздействий на конструкции действуют *особые нагрузки*: сейсмические; взрывные; возникающие при резком нарушении технологического процесса или неисправности оборудования; при деформациях основания из-за коренного изменения структуры грунта (замачивание просадочного грунта) или осадок его в районах горных выработок и карстовых территориях.

На сооружение, как правило, действует не одна, а несколько нагрузок. Для определения наиболее неблагоприятного воздействия необходимо учесть их взаимное действие на конструкцию, т.е. сформировать сочетания нагрузок, действующих на конструкцию. Для учета изменчивости каждая из нагрузок включается в сочетание с коэффициентом сочетания  $\psi$ , который определяется продолжительностью действия нагрузки и видом сочетания. Существует 2 вида сочетаний: *основные* сочетания включают постоянную и одну или несколько временных нагрузок, *особые* — постоянную, одну или несколько временных и одну особую нагрузку. Постоянная нагрузка во всех сочетаниях присутствует с коэффициентом сочетания 1, так как во время эксплуатации здания не меняется. При одной временной нагрузке в сочетании ее величина учитывается с коэффициентом сочетания 1. Если их две и более, то временные нагрузки включаются в сочетание умноженными на коэффициенты сочетаний (см. СП 20.13330.2016 [2]), меньшие единицы.

Кроме факторов, учитывающих природу нагрузки и ее изменчивость, при определении расчетных воздействий на конструкцию учитывают назначение, ответственность и длительность эксплуатации сооружения. Эти факторы плохо поддаются математической оценке, для их учета на практике используют директивно задаваемый коэффициент надежности по назначению  $\gamma_n$ , на который умножают величину нагрузки. Коэффициент надежности по назначению изменяется от 0,8 до 1,25, а для более значимых и ответственных зданий и сооружений этот коэффициент больше.

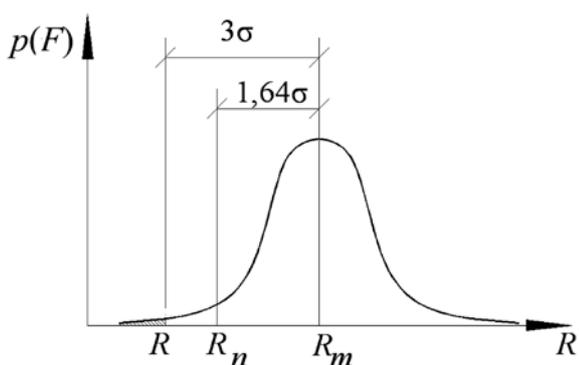


Рис. 2.2. Кривая распределения прочностных свойств стали

позволили выявить законы распределения этих величин. Достаточно точно распределение данных параметров описывается статистическим законом Гаусса, или законом нормального распределения (рис. 2.2).

С учетом сказанного о нагрузке расчетные усилия в элементе конструкции от  $n$  нагрузок можно записать в виде

$$N = \sum_i^n (\gamma_{f_i} \gamma_n \psi_i N_{n_i}),$$

где  $N_{n_i}$  — усилие в элементе от нормативной нагрузки.

Для определения несущей способности элемента необходимо знать прочностные параметры материала. Характерными значениями для металла являются предел текучести и временное сопротивление. Многочисленные испытания

При назначении нормативных сопротивлений принимается обеспеченность предела текучести и временного сопротивления 0,95 (95 % испытанных образцов имеют предел текучести и временное сопротивление не меньше установленного нормативного сопротивления). Указанная обеспеченность нормативного сопротивления достигается при уменьшении его значения относительно математического ожидания на величину  $1,64\sigma$ . Нормативные сопротивления обозначаются так:  $R_{yn}$  — предел текучести,  $R_{un}$  — временное сопротивление.

Нормативное сопротивление имеет обеспеченность, недостаточную для надежной работы конструкции. Кроме того, на величины предела текучести и временного сопротивления оказывают влияние место и способ выплавки стали, а также состав сырья. Для назначения расчетных сопротивлений, используемых при расчете по первому предельному состоянию, накапливают данные различных производителей стали за длительный промежуток времени и после обработки получают закон распределения, который позволяет назначить расчетные сопротивления с требуемой обеспеченностью. Как и для нагрузки, обеспеченность расчетных сопротивлений устанавливается на уровне 0,99865, что соответствует отклонению в  $3\sigma$  (три стандартных отклонения). Переход от нормативных к расчетным сопротивлениям осуществляется следующим образом:

$$R_y = R_{yn} / \gamma_m; \quad R_u = R_{un} / \gamma_m,$$

где  $\gamma_m$  — коэффициент надежности по материалу.

Для упрощения расчетной схемы, учета факторов, не имеющих аналитического описания, приближенного учета динамической нагрузки, и учета влияния несовершенств вводят коэффициент условия работы  $\gamma_c$ , на который умножают расчетные сопротивления.

Рассмотрим условие проверки первого предельного состояния на примере стержня, растягиваемого силой  $N$ . Усилие в стержне можно представить в виде

$$N = \gamma_f \gamma_n \psi N_n,$$

где  $N_n$  — усилие в стержне от нормативной нагрузки.

Несущая способность стержня

$$[N] = AR_{yn}\gamma_c / \gamma_m,$$

где  $A$  — площадь поперечного сечения.

После подстановки условие для проверки первого предельного состояния выглядит так:

$$\gamma_f \gamma_n \psi N_n \leq AR_{yn}\gamma_c / \gamma_m.$$

Разделив левую и правую части неравенства на  $A$  и выполнив простейшие преобразования, получим

$$\sigma_n \leq R_{yn}\gamma_c / (\gamma_m \gamma_f \gamma_n \psi),$$

где  $\sigma_n = N_n / A$ .

Приближенно можно считать, что

$$R_{yn} \approx \sigma_T,$$

тогда

$$\sigma_n \leq \sigma_T / k,$$

где  $k = \gamma_m \gamma_f \gamma_n \psi / \gamma_c$ .

Таким образом, в отличие от метода расчета по допускаемым напряжениям в методе расчета по предельным состояниям коэффициент запаса разбит на составляющие, природа которых может быть достаточно полно изучена, эти коэффициенты по мере совершенствования методики расчета могут корректироваться.

Наступлению предельного состояния соответствует равенство левой и правой частей предельного неравенства ( $N = [N]$ ), т.е. одновременное совпадение двух случайных величин, имеющих высокую обеспеченность. С учетом этого надежность конструкции даже в предельном состоянии высока и составляет не менее  $1 - 0,00135^2 = 0,9999982$ .

### 3. РАБОТА И РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основным нормативным документом для расчета и проектирования стальных конструкций является СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», в котором: дана классификация конструкций в зависимости от напряженно-деформированного состояния, типа конструкций, условий эксплуатации, действующих нагрузок; представлены рекомендации по проверке прочности и устойчивости конструкций и их элементов, сварных и болтовых соединений, а также конструктивные требования; содержатся справочные данные по прочностным свойствам стали и элементов соединений, коэффициенты для расчета устойчивости и проверки прочности с учетом развития пластических деформаций.

*Балки* — стержневые элементы, работающие на изгиб. Для металлических балок характерно то, что их длина значительно превосходит высоту сечения. Балки широко используются в перекрытиях и покрытиях зданий и сооружений, а также в качестве несущих конструкций рабочих площадок и подкрановых конструкций.

Основные типы сечений балок: *двутавр, швеллер, квадратные и прямоугольные коробчатые сечения*. Для оценки эффективности применения материала в балках используют ядровое расстояние  $\rho = W / A$ . Чем больше величина  $\rho$ , тем эффективнее используемое сечение. Двутавровые и швеллерные сечения имеют большее ядровое расстояние по сравнению с аналогичными по несущей способности сплошными (круглыми или прямоугольными) и поэтому получили наибольшее распространение при изгибе в одной плоскости. Коробчатые сечения эффективны при изгибе в двух плоскостях и действии крутящих нагрузок.

По *способу изготовления* балки могут быть прокатными, составными (сварными или на высокопрочных болтах), гнутыми и гнутосварными, прессованными. *Прокатные* балки наиболее просты и технологичны, но имеют ограниченные размеры, они менее экономичны, так как сечения относительно толстостенные из-за ограничений прокатки. *Составные* сечения можно делать практически любых размеров, такие балки имеют меньший расход металла, но более трудоемки. *Гнутые и гнутосварные* профили широко применяются в качестве прогонов кровли и фахверковых ригелей. *Прессованные* балки выполняются из алюминиевых сплавов и применяются в ограждающих конструкциях.

По *схеме статической работы* балки делятся на однопролетные разрезные, консольные и многопролетные неразрезные. *Разрезные и консольные* балки статически определимы, нечувствительны к осадкам опор и изменениям температуры. Наиболее просты в изготовлении и монтаже *однопролетные разрезные балки*. *Неразрезные многопролетные* балки статически неопределимы и имеют меньшую материалоемкость. Неразрезные балки — статически неопределимые конструкции и поэтому чувствительны к осадкам опор и изменению температуры.

Балки часто применяются в виде балочных площадок, в которых балки воспринимают нагрузку, распределенную по площади. В зависимости от компоновки различаются следующие виды балочных площадок (рис. 3.1):

- упрощенная — состоит из балок настила, опирающихся на стены;
- нормальная — включает колонны, опертые на них главные балки, на главные балки опираются балки настила;
- усложненная — в отличие от нормальной на главные балки опираются второстепенные, а на них опираются балки настила.

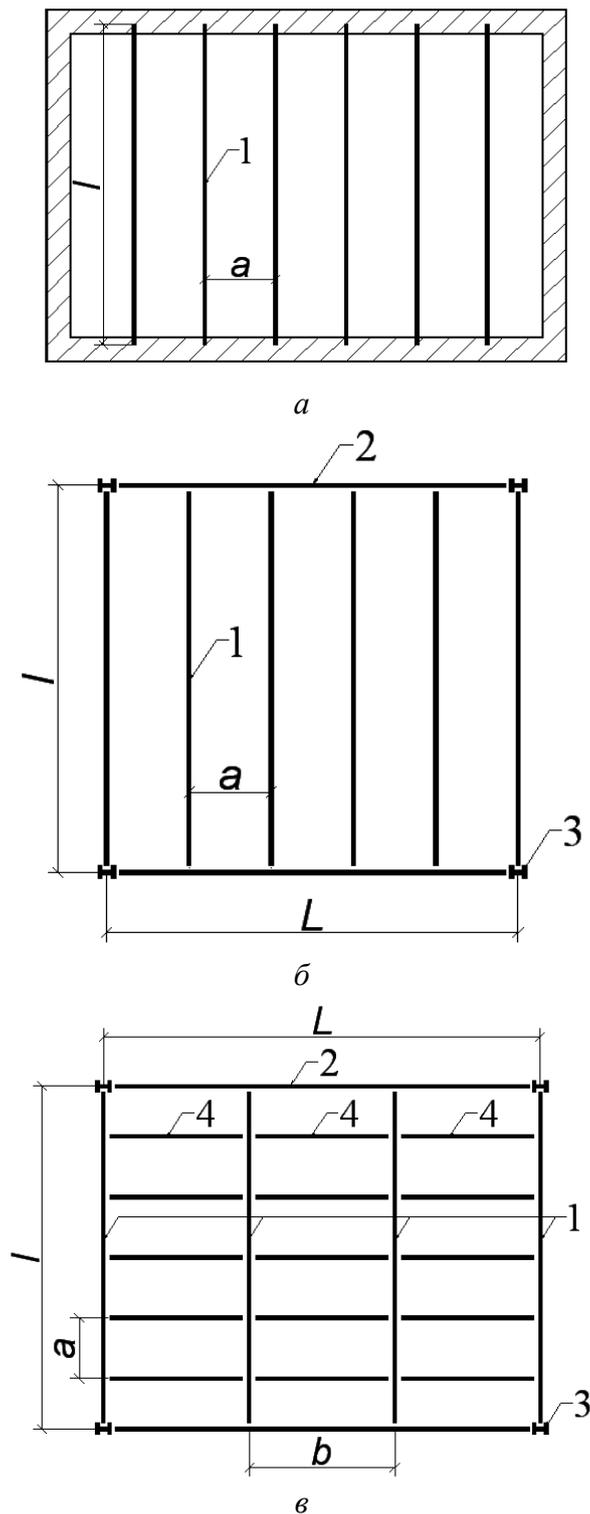


Рис. 3.1. Виды балочных площадок:  
 а — упрощенная; б — нормальная; в — усложненная;  
 1 — балки настила; 2 — главные балки; 3 — колонны; 4 — второстепенные балки

Настилы балочных площадок могут быть стальными из гладких или рифленых листов, а также из сборных железобетонных плит. В последнее время широкое применение получили металлические решетчатые и просечно-вытяжные настилы.

При проектировании балок: определяются нагрузки, действующие на балку, расчетная схема балки и возникающие в ней усилия; проверяются прочность и устойчивость балки в целом, а также элементов и узлов; оценивается жесткость балки. При разработке рабочих

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)