

# МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ И СВАРКА

Блок 1. Основы проектирования

Блок 2. Балочные конструкции

Блок 3. Центрально-сжатые колонны

Модуль 1

# ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. [Общая характеристика металлических конструкций](#)
2. [Состав и свойства строительных сталей](#)
3. [Основные этапы проектирования строительных конструкций. Нагрузки и воздействия](#)
4. [Основы расчёта металлических конструкций по предельным состояниям](#)
5. [Сварные соединения. Конструктивные требования и расчёт](#)
6. [Болтовые соединения. Конструктивные требования и расчёт](#)

Блок 1

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

- [Понятие о несущих конструкциях и несущих системах зданий и сооружений](#)
- Требования к несущим конструкциям, учитываемые при проектировании
- Преимущества и недостатки металлических конструкций
- Область применения металлических конструкций
- Краткий исторический обзор развития металлических конструкций

# Понятие о несущих конструкциях зданий и сооружений

Продукцией строительного производства являются здания и сооружения.

**Здания** – наземные строительные объекты, связанные с пребыванием людей.

Понятие «сооружения» является более широким и включает как здания, так и специальные виды сооружений, предназначенных для выполнения задач технических (**инженерные сооружения** – мосты, трубы, резервуары и т.д.) или эстетических (**архитектурные сооружения**).

Здания и сооружения состоят из отдельных **конструктивных элементов** (конструкций), которые можно разделить на **несущие** и **ограждающие**.

Некоторые элементы сочетают эти две функции (как правило, неэффективно).

## Конструктивные элементы (конструкции) зданий и сооружений

### Несущие

воспринимают и передают действующие на них нагрузки  
(колонны, балки, фермы и т.д.)

### Ограждающие

отделяют помещения друг от друга и от окружающей среды  
(окна, двери, перегородки и т.д.)

В курсе «Строительные конструкции» рассматриваются вопросы проектирования **несущих** конструкций.

**Проектирование** включает две составляющие – **расчёт** и **конструирование**.



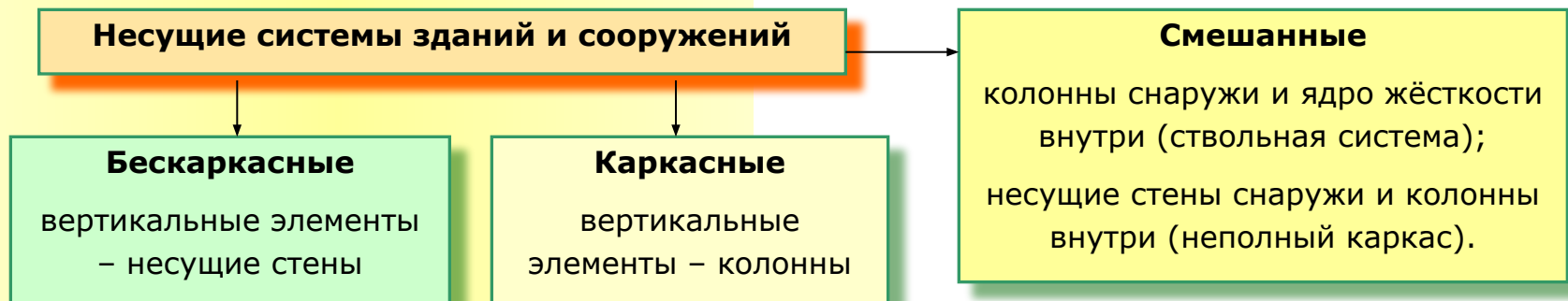
# Материалы для несущих конструкций и виды несущих систем зданий и сооружений

В зависимости от применяемых конструкционных материалов различают

- **бетонные и железобетонные конструкции;**
- **металлические конструкции (стальные и алюминиевые);**
- **конструкции из дерева и пластмасс;**
- **каменные и армокаменные конструкции.**

Современные конструкции часто выполняются **композиционными**, то есть из двух и более материалов, что позволяет с наибольшей эффективностью использовать их свойства.

- 4 Взаимосвязанная совокупность несущих конструкций здания (сооружения) называется его **несущей**, или **конструктивной**, системой.



# Требования к несущим конструкциям, учитываемые при проектировании

## (1) Технические

Восприятие и передача конструкцией действующих нагрузок при сохранении прочности, жёсткости и устойчивости с необходимой надёжностью и долговечностью

**Локальные разрушения** отдельных конструкций не должны приводить к **прогрессирующему разрушению** всего сооружения

### Требования к несущим конструкциям

## (2) Экономические

Обеспечение наименьшей стоимости, трудо- и **энергоёмкости** изготовления, монтажа и эксплуатации конструкции

## (3) Технологические

Согласованность конструктивных решений с технологией изготовления, транспортировки, монтажа и эксплуатации конструкции

## (4) Эстетические

Создание благоприятного впечатления о прочности конструкции, архитектурная выразительность

## (5) Экологические

Непричинение вреда окружающей среде, **возможность вторичного использования материалов по окончании срока службы** конструкции

# Особенности обеспечения экономических требований

Технические и экономические требования во многом являются противоречивыми: нередко сокращение расхода материала снижает не только стоимость, но и надёжность конструкции.

Проектирование несущих конструкций неизбежно связано с выбором компромисса между экономичностью и рисками.

Поиск наиболее экономичного конструктивного решения достигается сравнением различных вариантов (**вариантное проектирование**) или поиском оптимального соотношения параметров в пределах одного варианта (**оптимальное проектирование**).

**Концентрация материала** – сосредоточение массы в отдельных конструктивных элементах, воспринимающих значительные усилия.

**Снижение веса** конструкций приводит к уменьшению нагрузки на них и нижележащие конструкции.

**Унификация** – приведение к единообразию размеров и форм конструктивных элементов.

## Обеспечение экономичности конструктивных решений

Совершенствование методов расчёта

Применение рациональных конструктивных форм, концентрация материала

Снижение веса конструкций

Унификация и типизация

# Сравнение эффективности конструкций из различных материалов

Преимущества и недостатки металлических конструкций можно выявить в сравнении с конструкциями из других материалов.

| Показатели                        | Виды конструкций             |                                     |                                                                      |                      |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------|
|                                   | железобетонные               | металлические                       | деревянные                                                           | каменные             |
| Лёгкость                          | тяжёлые                      | лёгкие                              | средние                                                              | очень тяжёлые        |
| Огнестойкость<br>(без огнезащиты) | высокая                      | неогнестойкие                       | огнестойки, но возгораемы                                            | очень высокая        |
| Атмосферостойкость                | достаточная                  | склонность к коррозии               | подверженность гниению                                               | достаточная          |
| Химическая стойкость              | в ряде случаев недостаточная | слабая                              | весьма высокая                                                       | достаточная          |
| Эксплуатационные расходы          | почти отсутствуют            | необходимость периодической окраски | необходимость восстановления защитных покрытий против гниения и огня | почти отсутствуют    |
| Ремонтопригодность                | трудности в усилении         | высокая                             | высокая                                                              | трудности в усилении |

# Сравнение лёгкости конструкционных материалов

**Лёгкость** конструкций количественно характеризуется отношением расчётного сопротивления **R** к удельному весу **γ** материала.

Чем больше это отношение, тем легче конструкция.

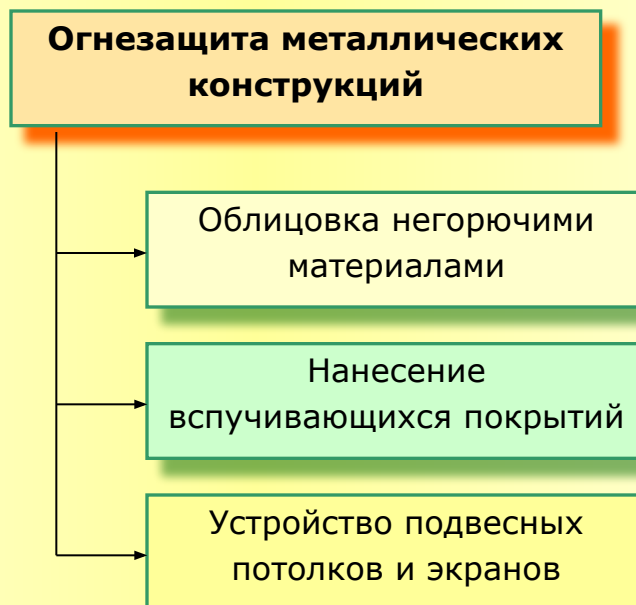
Наиболее лёгкими являются металлические конструкции;  
деревянные оказываются тяжелее примерно **в 1,5...2 раза**,  
железобетонные – **в 4...10 раз**;  
каменные – **в 20...40 раз**.

| Материал                               | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Удельный<br>вес <b>γ</b> ,<br>кН/м <sup>3</sup> | Расчётное<br>сопротивление<br><b>R</b> , МПа | <b>R/γ · 10<sup>3</sup></b> , м |
|----------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| Сталь обычной прочности С245           | 7850                            | 78,5                                            | 230                                          | 2,93                            |
| Сталь повышенной прочности С375        | 7850                            | 78,5                                            | 325                                          | 4,14                            |
| Алюминиевый сплав упрочнённый 1915Т    | 2750                            | 27,5                                            | 200                                          | 7,27                            |
| Бетон класса В30                       | 2400                            | 24                                              | 17                                           | 0,71                            |
| Древесина (сосна) 2-го сорта           | 600                             | 6                                               | 13                                           | 2,16                            |
| Кладка из кирпича М100 на растворе М25 | 1800                            | 18                                              | 1,3                                          | 0,072                           |

# Методы повышения долговечности и огнестойкости металлических конструкций

**Огнестойкость** незащищённых металлических конструкций невелика: при пожаре они теряют несущую способность уже через **12...15 мин.**

Для повышения огнестойкости предусматривают **огнезащиту** конструкций, действие которой основано на замедлении прогрева металла.



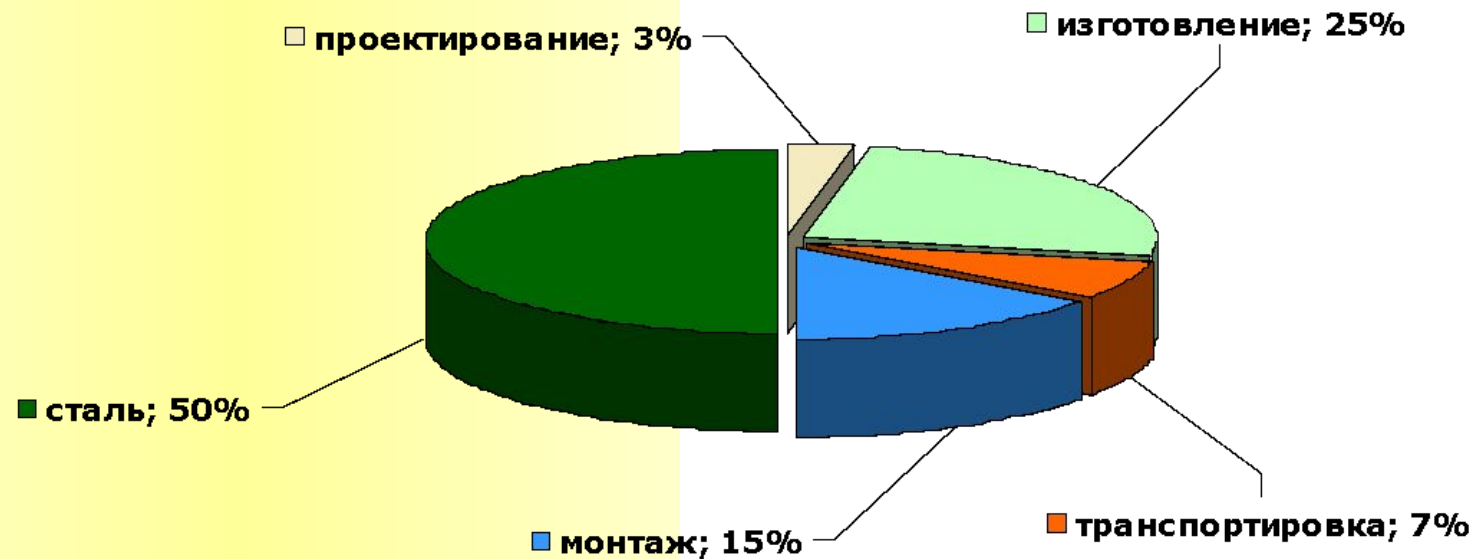
Во влажной среде сталь подвергается коррозии.

## Повышение атмосферной и химической стойкости стальных конструкций



# Структура стоимости стальных конструкций

Наиболее значительную часть стоимости металлических конструкций составляет стоимость материала.



Стоимость конструкций из различных материалов во многом определяется рыночной ситуацией.

# Преимущества и недостатки металлических конструкций

## Стальные конструкции

### [+]

- Высокая прочность при небольшой собственной массе
- Высокая индустриальность и скорость монтажа; удобство изготовления и усиления
- Непроницаемость для жидкостей и газов

### [-]

- Подверженность коррозии, необходимость антикоррозионной защиты
- Низкая огнестойкость, необходимость огнезащиты
- Высокая стоимость

## Алюминиевые конструкции

### [+] по сравнению со стальными

- Более лёгкие
- Более высокая коррозионная стойкость (в 10...20 раз выше)
- Не создают искр при ударе

### [-] по сравнению со стальными

- Повышенная деформативность (модуль упругости в 3 раза меньше)
- Более низкая огнестойкость
- Более высокая стоимость



# Область применения стальных и алюминиевых конструкций

## Область применения стальных конструкций

Эффективность применения несущих **стальных** конструкций повышается с **увеличением пролётов и высоты** (этажности) сооружений, а также **возрастанием нагрузок** на них.

Применение **алюминиевых** конструкций в качестве несущих оправдано только в исключительных случаях, например, для грузоподъёмного оборудования.

### В зданиях

- **Каркасы одноэтажных промышленных зданий** (ОПЗ), в том числе из быстровозводимых лёгких металлических конструкций (ЛМК)
- **Каркасы многоэтажных и высотных зданий**
- **Большепролётные покрытия** общественных и специальных промышленных зданий (спортивные сооружения, рынки, выставочные павильоны, ангары)

### В сооружениях

- **Мосты, эстакады**
- **Башни и мачты**
- **Листовые конструкции** (резервуары, газгольдеры) – благодаря непроницаемости
- **Конструкции подъёмно-транспортного оборудования** (краны)
- **Специальные конструкции** (радиотелескопы и др.)

## Тестовые вопросы (1-2)

### Недостатки стальных конструкций

Выберите правильные ответы

- ☐ Большой собственный вес
- ☐ Малая индустриальность
- ☐ Подверженность коррозии
- ☐ Слабая огнестойкость
- ☐ Высокая стоимость
- ☐ Трудности при усилении

---

### Наиболее значительную часть стоимости металлических конструкций составляют расходы на

Выберите правильный ответ

- ☐ Проектирование
- ☐ Изготовление
- ☐ Транспортировку
- ☐ Монтаж
- ☐ Материал

# Краткий исторический обзор развития металлических конструкций



## Бруски из кованого железа (до конца 18 в.)

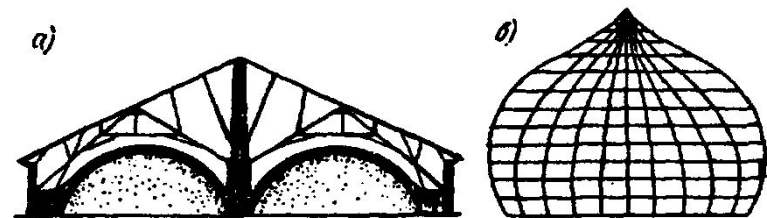
Применение металлических конструкций в строительстве всегда определялось уровнем развития металлургии и металлообработки.

Простейшие конструкции из железа были известны ещё в глубокой древности.

До конца 18 века в строительстве применялись кованые бруски из кричного железа, соединённые на замках и скрепах горновой сваркой.

Первоначально их использовали только в качестве затяжек каменных сводов, а с 17 века – также в качестве наклонных стропил и элементов каркасов куполов.

В России железные затяжки куполов использовались с 12-го века (Успенский собор во Владимире, 1158).



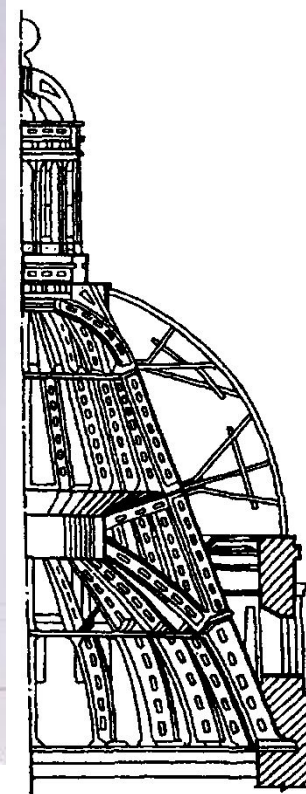
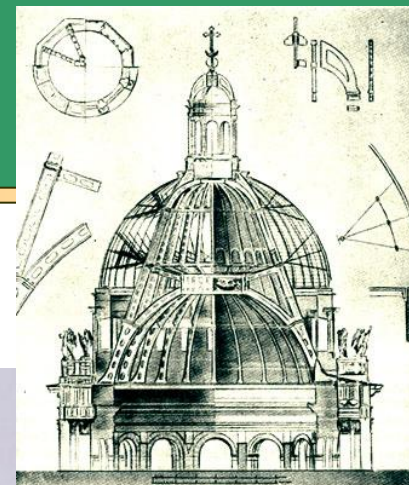
## Чугунные конструкции (18 – 19 век)

В начале 18 века был освоен процесс чугунного литья. С этого момента и до конца 19 века чугун применялся для строительства мостов и конструкций перекрытий.

Купол Исаакиевского собора в Петербурге (40-е годы 19 в.) собран из чугунных косяков.

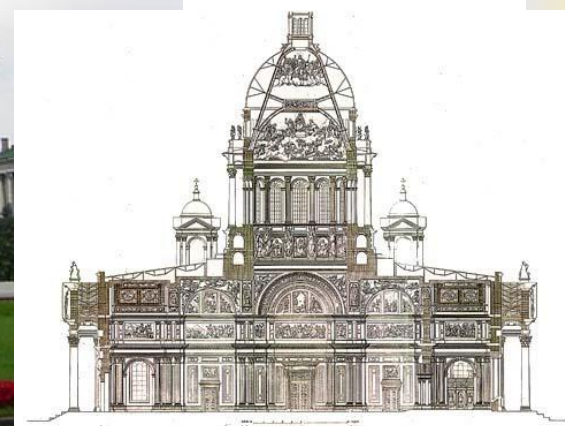
Перекрытие Зимнего дворца (1837 г.) выполнено в виде треугольных железочугунных ферм пролётом 12,9 м.

Николаевский мост в Петербурге с восемью арочными пролётами от 33 до 47 м (50-е годы 19 в.) является самым крупным чугунным мостом мира.





## Купол Исаакиевского собора (40-е г. 19 века)



## Развитие промышленного производства стали, зарождение науки о металлоконструкциях (19-й век)

В 1784 г. Г. Кортон (Англия) было предложено заменить кричный процесс получения железа более совершенным – пудлингованием.

В 30-х годах 19 века появляются заклёпочные соединения.

Во второй половине 19 века были разработаны основные способы промышленного производства литой стали: бессемеровский, (1856), мартеновский (1864), томасовский (1878).

С их внедрением получило развитие производство листовых, уголковых и двутавровых прокатных профилей.

В этот период возникает наука о металлических конструкциях.

Сталь постепенно вытесняет чугун из строительных конструкций.

В 1889 г. для Всемирной выставки в Париже возводится Эйфелева башня высотой 300 м

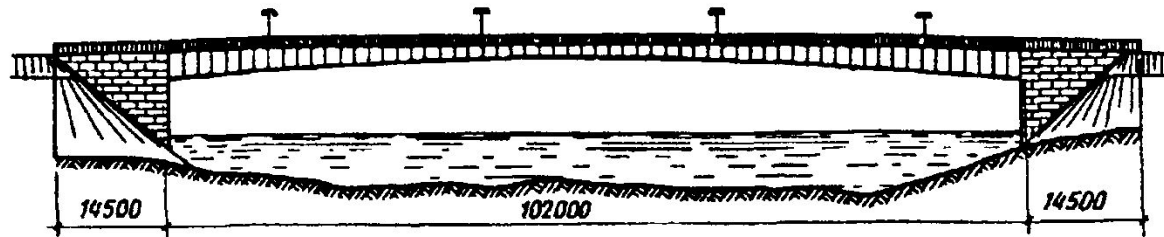


# Развитие мостостроения

В связи с ростом железных дорог интенсивно развивается металлическое мостостроение.

Разработанные в мостостроении принципы проектирования переносятся на промышленные и гражданские объекты.

Балочный мост



Арочный мост

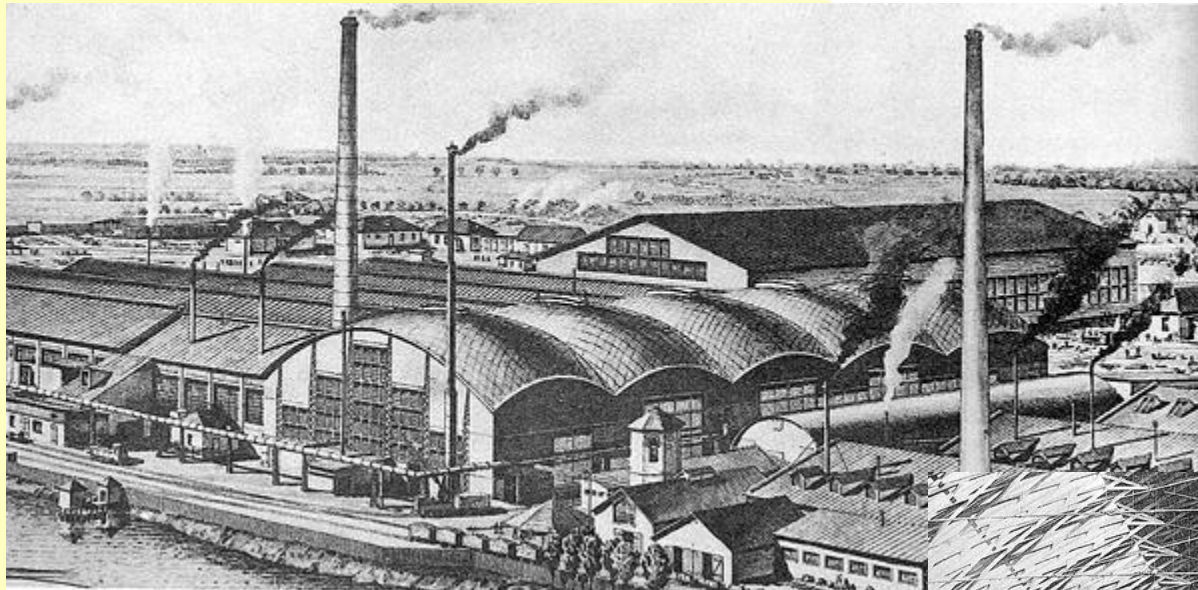


Висячий мост

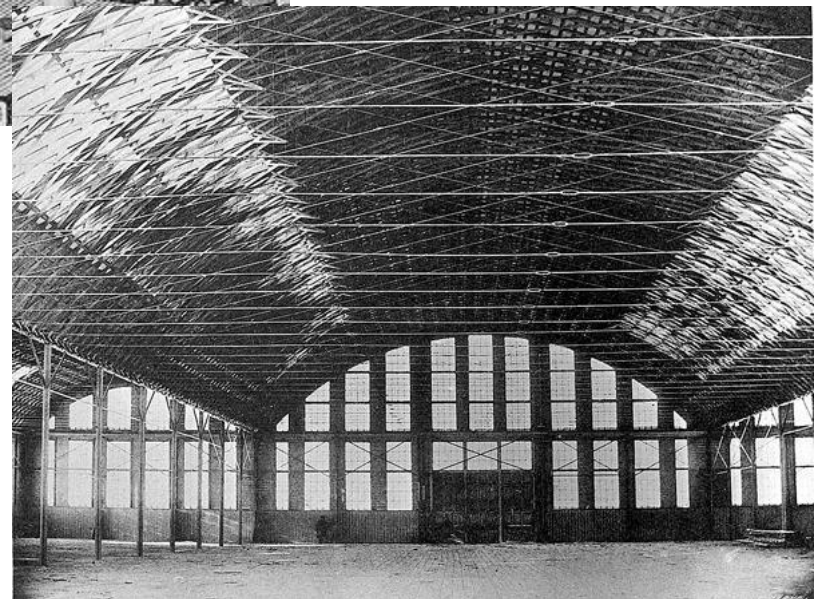




## Проекты В.Г. Шухова (1853-1939)

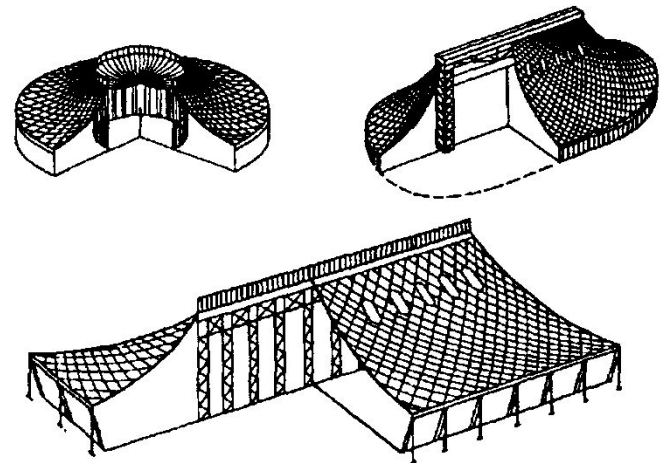
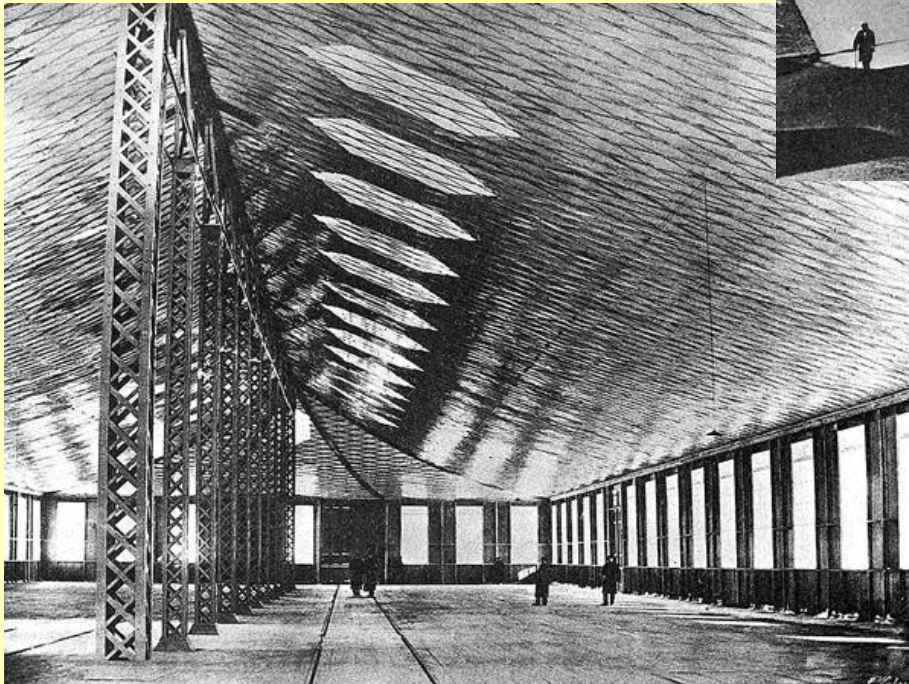


Покрытие завода в г. Выкса – первая пространственная конструкция (сетчатая оболочка)



## Проекты В.Г. Шухова (1853-1939)

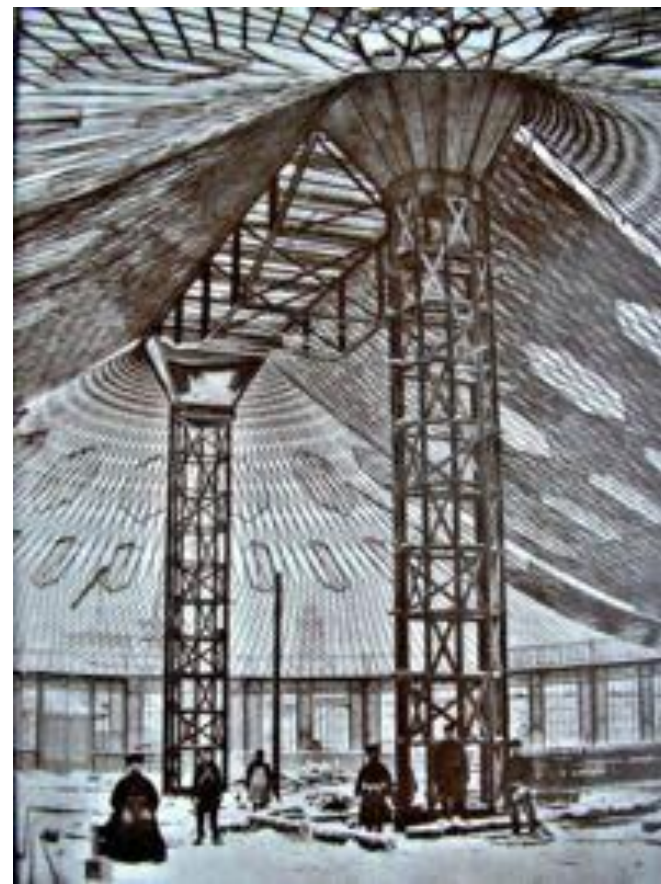
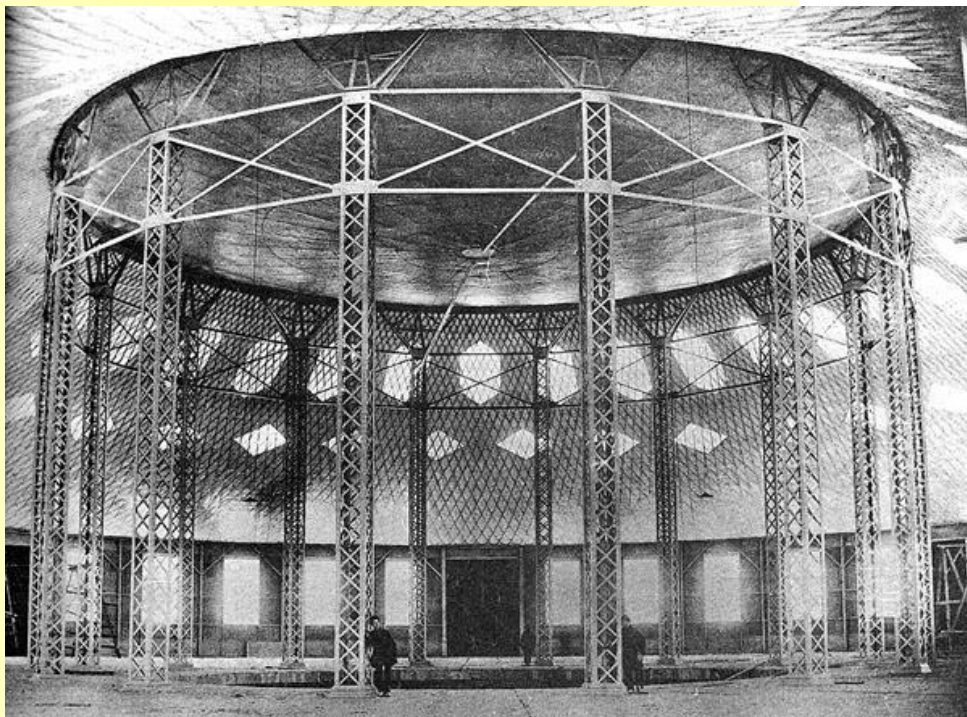
Первые висячие сетчатые покрытия были представлены на Всероссийской промышленной выставке (Нижний Новгород, 1896 г.)





## Проекты В.Г. Шухова (1853-1939)

Висячие сетчатые покрытия на  
Нижегородской выставке (1896 г.)

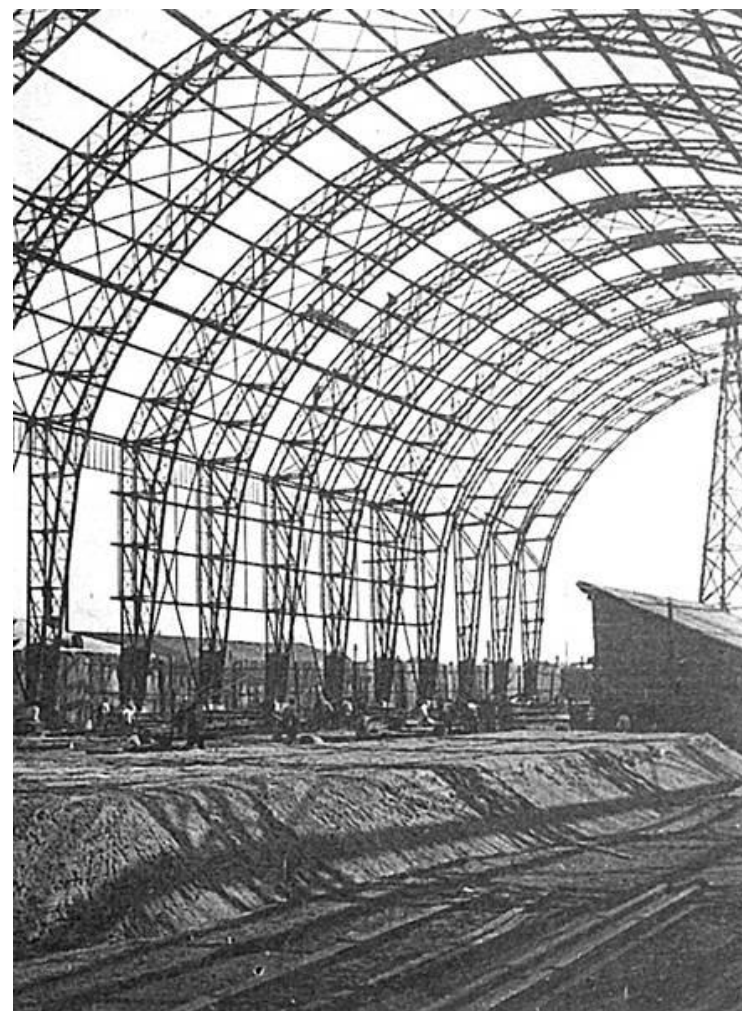
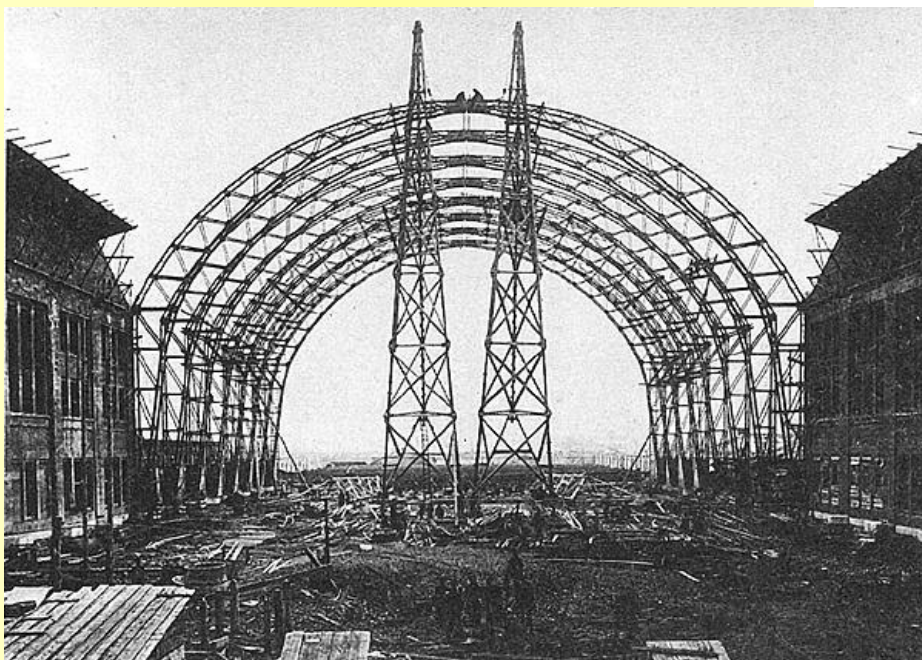




## Проекты В.Г. Шухова (1853-1939)

В 1914 г. по проекту В.Г. Шухова была построена рамно-арочная конструкция дебаркадера Киевского вокзала в Москве.

В.Г. Шухов также спроектировал арочные покрытия ГУМа, Петровского пассажа, гостиницы «Метрополь».





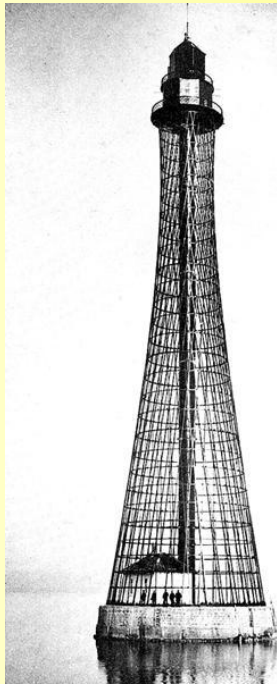
## Проекты В.Г. Шухова (1853-1939)

Рамно-арочная конструкция дебаркадера  
Киевского вокзала в Москве (1914 г.)

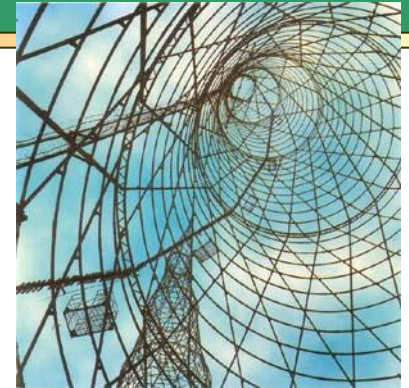


# Проекты В.Г. Шухова (1853-1939)

Плавучие маяки



Сетчатые гиперболоидные башни различного назначения



Шаболовская башня в Москве (1922 г.)





## Empire State Building (New York, 1931)

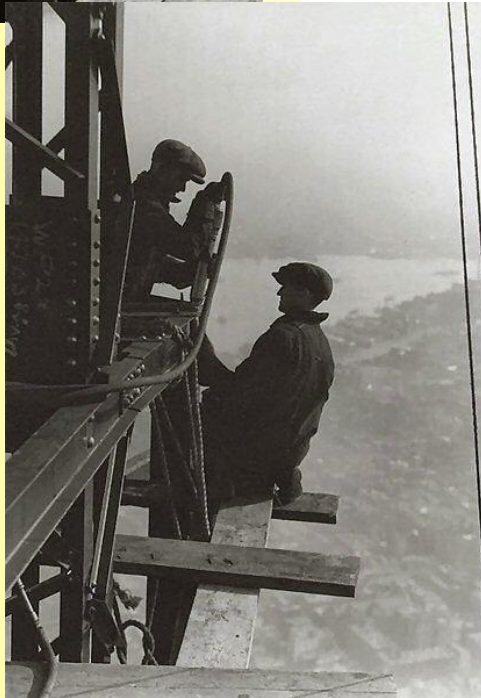
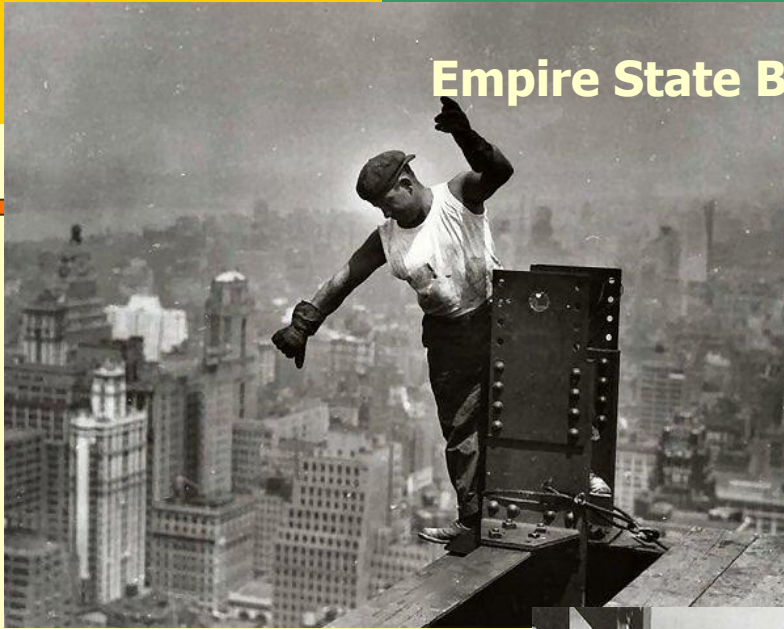
В США было развёрнуто высотное строительство. Первое многоэтажное здание (8 этажей) со стальным каркасом было построено в 1891 г. в Чикаго.

А уже в 1931 г. в центре Нью-Йорка за 15 месяцев был построен «Эмпайр Стейт» высотой 312 м с причальной башней для дирижаблей высотой 62 м.





## Empire State Building (New York, 1931)





## Empire State Building (New York, 1931)



Идёт  
строительство  
«Эмпайр Стейт» -  
«восьмого чуда  
света»





**Висячий мост «Золотые ворота»  
(Сан-Франциско, 1937),  
средний пролёт 1237 м**



«Golgen Gate»

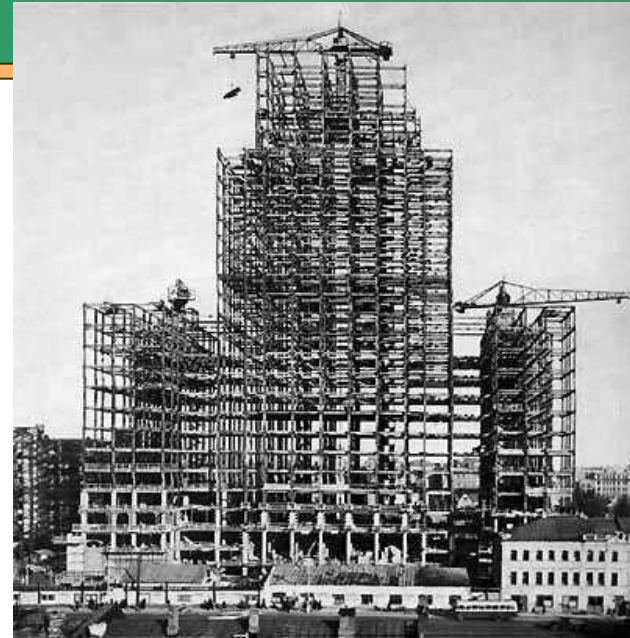
[www.toddadams.net](http://www.toddadams.net)

## Развитие металлоконструкций в сер. 20 в.

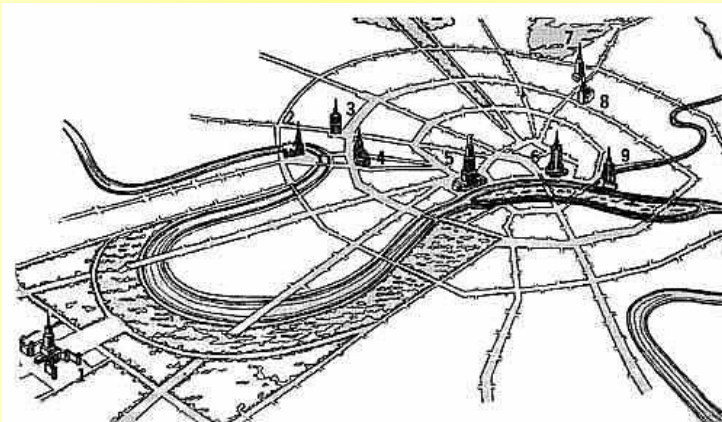
В 40-х годах 20-го века заклёпочные соединения почти полностью заменяются сварными – более лёгкими, технологичными и экономичными.

Дальнейшее развитие металлоконструкций связано с увеличением пролётов и этажности сооружений, возрастанием нагрузок на них.

Внедряются стали повышенной прочности, разрабатываются облегчённые металлические конструкции, совершенствуются методики расчёта и конструирования.



Московские «высотки» - начало 50-х годов





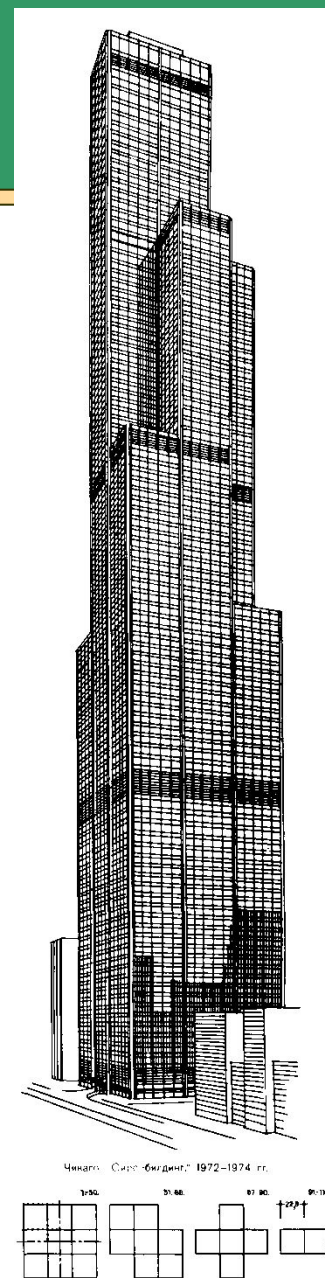
# Высотное строительство из металлоконструкций



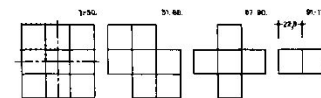
Чикаго, «Сирс-билдинг»  
(1972-1974 г.) 109 этажей,  
высота 445 м.



«Sears Tower»



Чикаго, «Сирс-билдинг», 1972-1974 гг.



## Современное высотное строительство



**Taipei 101 (Тайбэй),  
Тайвань (2003 г.) 101 этаж,  
высота 509 м.**



**Petronas Twin Towers  
(Петронас) Малайзия  
(1988 г.) 88 этажей,  
высота 452 м**

## Тестовые вопросы (3-4)

### Проекты, разработанные В.Г. Шуховым

Выберите правильные ответы

- ☐ Купол Исаакиевского собора в Петербурге
- ☐ Перекрытие Зимнего дворца в Петербурге
- ☐ Покрытие ГУМа
- ☐ Дебаркадер Киевского вокзала в Москве
- ☐ Шаболовская башня
- ☐ Останкинская телевизионная башня

---

### Основные способы промышленного производства стали разработаны

Выберите правильный ответ

- ☐ Во второй половине 17 века
- ☐ Во второй половине 18 века
- ☐ Во второй половине 19 века
- ☐ В первой половине 20 века



Блок 2

## СОСТАВ И СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

- Химический состав и технология производства стали
- Оценка свойств стали
- Диаграмма деформирования стали
- Нормативные и расчётные сопротивления стали
- Маркировка стали
- Выбор марки стали
- Сортамент

# Свойства стали, существенно важные для строительной стали



# Химический состав стали

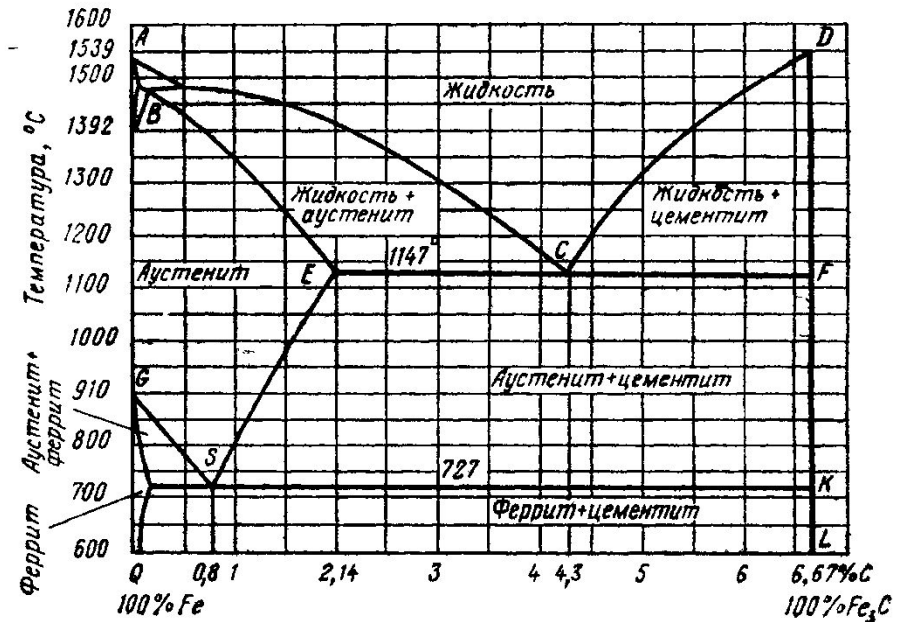
**Сталь** – это сплав железа с углеродом и некоторыми добавками.

Железо обеспечивает высокую пластичность, а углерод (при содержании до 1%) – прочность.

Однако углерод снижает пластичность и ухудшает свариваемость, поэтому его содержание в строительных сталях составляет **не более 0,22%.**

Присутствие в стали **нормальных примесей** (кремний, марганец, фосфор, сера, кислород) вызвано условиями её получения.

Диаграмма состояния сплавов «железо-углерод»



| Содержание углерода                 | Наименование           |
|-------------------------------------|------------------------|
| не более 0,22%                      | строительные стали     |
| не более 0,65%                      | конструкционные стали  |
| 0,65...1,5 %                        | инструментальные стали |
| 2,14...6,67 %<br>(обычно 2,8...4 %) | чугуны                 |



## Вредные примеси и получение стали

**Вредные примеси** – фосфор, сера, атмосферные газы (кислород, водород, азот).

Они ухудшают свариваемость, снижают пластичность стали и её стойкость к хрупкому разрушению.

**Фосфор** повышает хрупкость стали при пониженных температурах (**хладноломкость**).

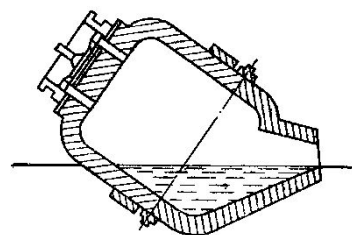
**Сера** способствует образованию трещин при температуре 800...1000° С (**красноломкость**).

Содержание вредных примесей в стали ограничивается. Кроме того, при сварке металл необходимо защищать от воздействия атмосферы.

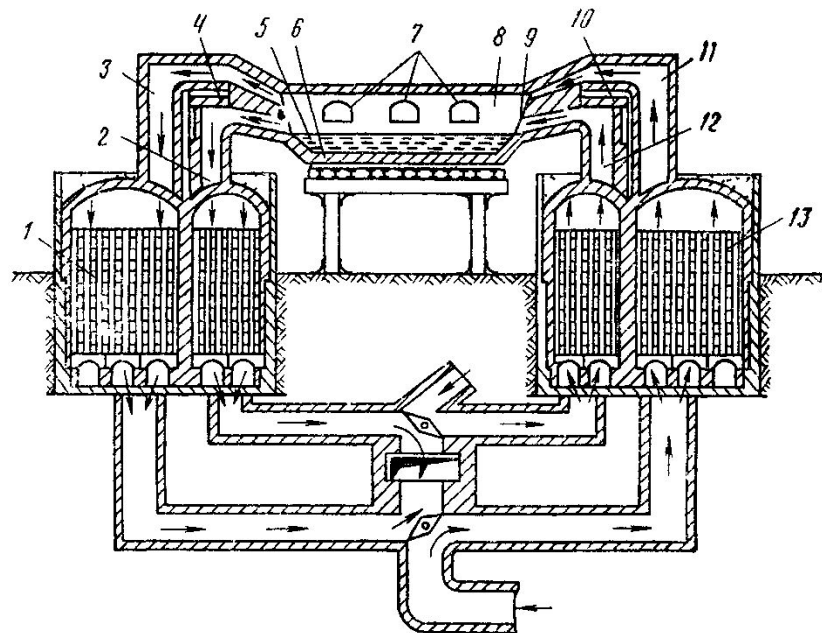
Сталь получают в конвертерах с продувкой кислородом, в мартенах или электропечах.

Исходным сырьём является **чугун**, который отличается от стали более высоким содержанием углерода, кремния, марганца, серы, фосфора.

Не исключено использование в качестве сырья металлолома (скрапа).



Конвертер в наклонном положении в момент заливки чугуна



Мартеновская печь

## Классификация стали по степени раскисления

После плавки сталь разливают ковшами в **изложницы**, где происходит остывание и кристаллизация металла. В процессе кристаллизации выделяется большое количество газов – сталь «кипит», это ухудшает её качество.

Полученную сталь называют **кипящей**, она пригодна лишь для неответственных конструкций.

Спокойное остывание достигается использованием раскислителей (**кремния, марганца, алюминия**), которые связывают газы, образуя шлак.

Шлак концентрируется в верхней части слитка; её впоследствии срезают и отправляют в переплавку.

Получаемая сталь называется **спокойной**, она на 10-12% дороже кипящей и применяется в ответственных конструкциях.

При неполном раскислении (меньшем количестве раскислителя) получается **полуспокойная** сталь. По цене и качеству она занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной.



Разливка стали

## Способы повышения прочности стали

Для повышения прочности стали применяется термическая обработка и легирование.

Основные виды **термической обработки** – закалка, нормализация, отпуск и отжиг. Они отличаются температурой нагрева и условиями охлаждения.

**Легирование стали** заключается в добавлении специальных легирующих элементов, повышающих её прочность и пластичность. Некоторые добавки связывают вредные примеси, превращая их в полезные.

Однако легирующие добавки ухудшают свариваемость стали.

Поэтому в строительстве применяют **низколегированные стали**, в которых суммарное содержание легирующих добавок составляет **не более 5%**.

| Сталь              | Раскислитель (кремний), % | Срезаемая часть слитка, % |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| кипящая (кп)       | -                         | 5                         |
| полуспокойная (пс) | 0,05...0,15               | 8                         |
| спокойная (сп)     | 0,12...0,80               | 15                        |



Изложницы

# Легирующие добавки

Строительные стали легируют преимущественно **хромом**.

В отдельных случаях применяется **никель**.

Добавки-раскислители (**кремний, марганец**) одновременно являются и легирующими.

**Ванадий и молибден** предотвращают разупрочнение термообработанной стали при сварке.

**Медь** повышает стойкость стали к атмосферной коррозии.

| Нержавеющая сталь (высоколегированная) | Содержание, % |
|----------------------------------------|---------------|
| Углерод                                | 0,1...0,2     |
| Хром                                   | 17...20       |
| Никель                                 | 8...11        |



## Химический состав строительной стали

| Основной состав |                    | Вредные примеси |                            | Добавки-раскислители |          | Легирующие добавки |                |
|-----------------|--------------------|-----------------|----------------------------|----------------------|----------|--------------------|----------------|
| железо          | -                  | сера            | не более<br>0,03...0,05 %  | кремний              | до 0,8 % | хром               | 0,3...0,4 %    |
|                 |                    | фосфор          |                            | марганец             | до 1,7 % | ванадий            | 0,07...0,15%   |
| углерод         | не более<br>0,22 % | кислород,       | не более<br>0,015...0,025% | алюминий             | до 0,1 % | молибден           | 0,15...0,25 %  |
|                 |                    | водород, азот   |                            |                      |          | медь               | не более 0,7 % |



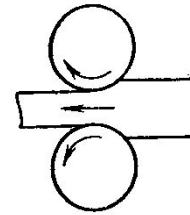
# Прокатка стали и её влияние на прочность

**Прокатка** является одним из видов горячей обработки металлов давлением (ОМД) и производится на прокатных станах.

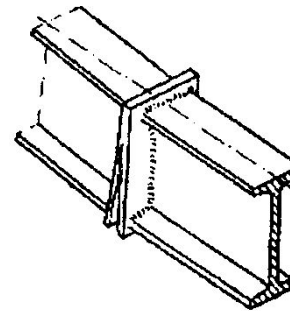
Разогретые слитки многократно пропускаются между двумя валками, вращающимися навстречу друг другу, при этом металл пластически деформируется и приобретает заданную форму (лист, рельс, двутавр и т.д.).

Чем толще прокат, тем меньше степень обжатия и скорость охлаждения, поэтому с **увеличением толщины проката прочностные характеристики снижаются.**

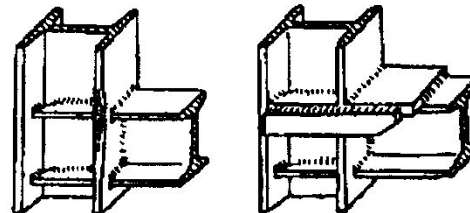
Прочность при растяжении в направлении толщины проката составляет **всего 5 %** от прочности в перпендикулярном направлении (анизотропия свойств).



Прокатка стали



Расслоение поперечной диафрагмы в балке



Расслоение пояса колонны в месте примыкания консоли

## Тестовые вопросы (5-6)

**Содержание углерода в строительной стали составляет не более**

Выберите правильный ответ

- ☐ 0,02%
- ☐ 0,22%
- ☐ 2,00%
- ☐ 12%
- ☐ 22%
- ☐ 52%

---

**Содержание легирующих добавок в низколегированной стали составляет не более**

Выберите правильный ответ

- ☐ 0,05%
- ☐ 0,5%
- ☐ 5%
- ☐ 15%
- ☐ 25%
- ☐ 55%

## Тестовые вопросы (7-9)

**Часть слитка, которую отрезают после разливки в изложницы**

Установите соответствие

|                     |                              |
|---------------------|------------------------------|
| спокойная сталь     | <input type="checkbox"/> 5%  |
| кипящая сталь       | <input type="checkbox"/> 8%  |
| полуспокойная сталь | <input type="checkbox"/> 15% |

**Вредными примесями в стали являются**

Выберите правильные ответы

- ☐ Кремний
- ☐ Марганец
- ☐ Фосфор
- ☐ Сера
- ☐ Медь
- ☐ Кислород

**Добавками-раскислителями стали являются**

Выберите правильные ответы

- ☐ Кремний
- ☐ Марганец
- ☐ Азот
- ☐ Медь
- ☐ Алюминий
- ☐ Кислород

## Тестовые вопросы (10-11)

### Легирующими добавками в стали являются

Выберите правильные ответы

- ☐ Кремний
- ☐ Марганец
- ☐ Фосфор
- ☐ Хром
- ☐ Молибден
- ☐ Сера
- ☐ Ванадий

Дайте оценку следующим суждениям:

(А) **С увеличением толщины проката прочность стали снижается.**

(Б) **Прочность стали поперёк проката намного меньше, чем вдоль проката.**

- ☐ Верно только (А)
- ☐ Верно только (Б)
- ☐ Верно и (А) и (Б)
- ☐ Оба суждения неверны



## Оценка свойств стали

Для оценки **механических** свойств стали проводятся испытания:

- на одноосное растяжение;
- на ударную вязкость;
- на выносливость.

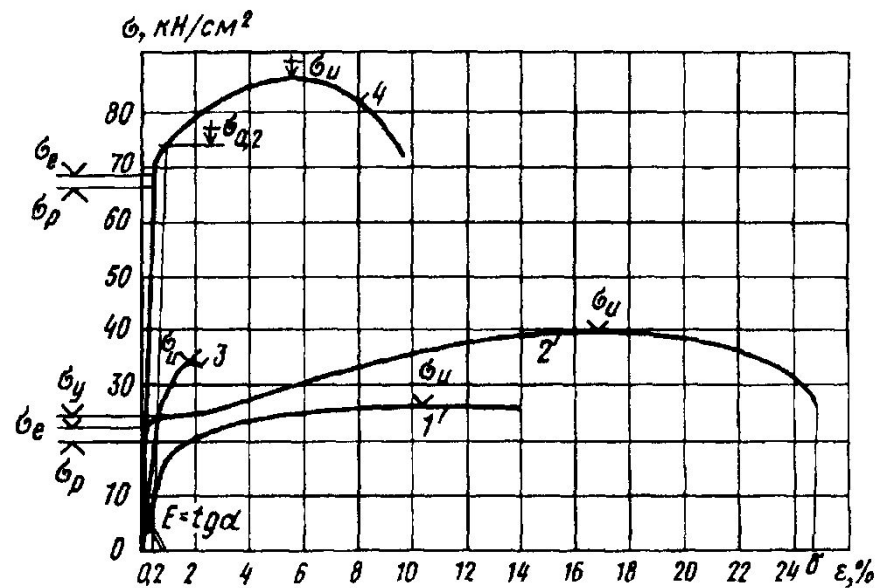
**Свариваемость** стали оценивают по углеродному эквиваленту:

$$C_{\Sigma} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2}, \%$$

где C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, P – массовая доля углерода, марганца, кремния, хрома, никеля, меди, ванадия и фосфора, %.

Если  **$C_{\Sigma} \leq 0,4$** , то сварка стали не вызывает затруднений.

Прочность металла при статическом нагружении, а также его упругие и пластические свойства определяются испытаниями стандартных образцов на растяжение с записью диаграммы «напряжения-деформации»  $\sigma$ - $\epsilon$ .



- 1 – алюминиевый сплав
- 2 – малоуглеродистая сталь
- 3 – чугун
- 4 – низколегированная термоупрочнённая сталь

# Прочностные характеристики стали

**Прочность** – это способность материала не разрушаться при возникновении в нём напряжений от внешних воздействий.

*Прочностные характеристики стали:*

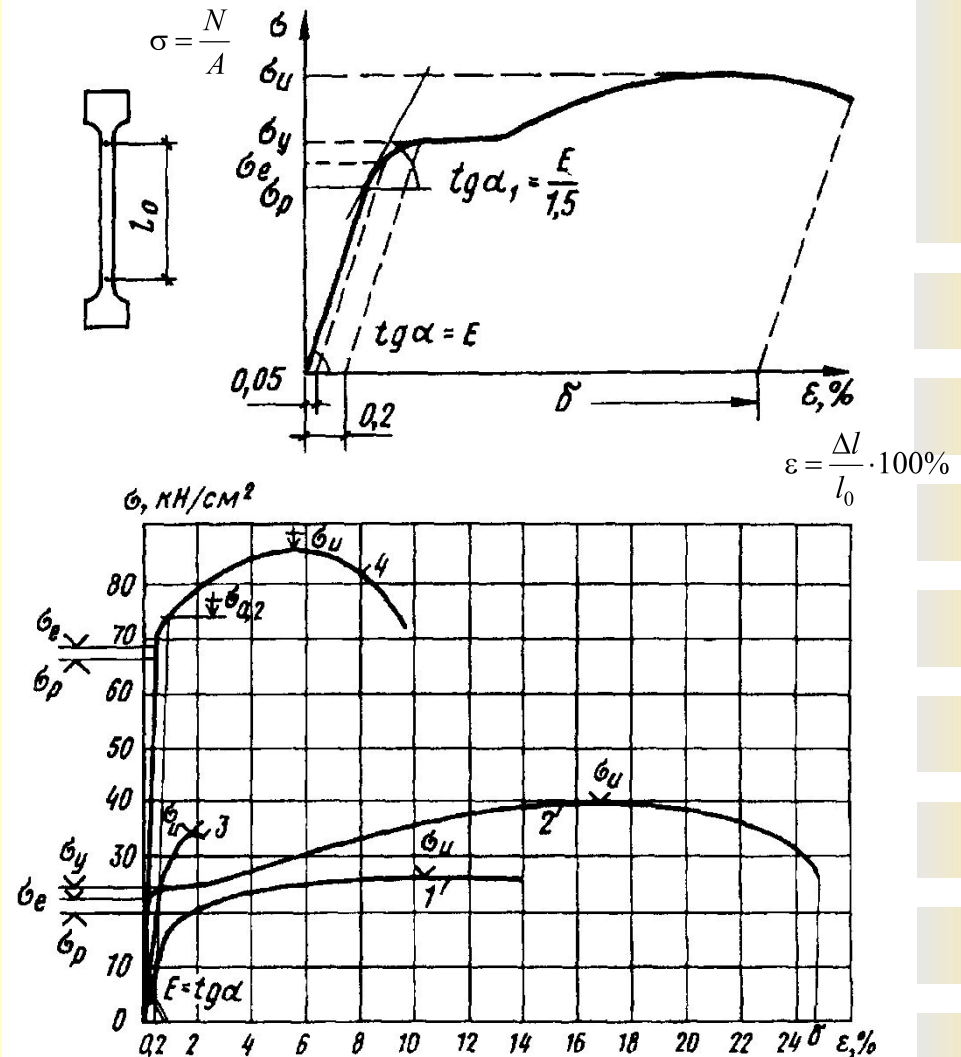
**Физический предел текучести**  $\sigma_y$  – это напряжение, при котором происходит рост пластических деформаций без увеличения внешней нагрузки.

$y = yield$  (текучесть)

**Условный предел текучести**  $\sigma_{0,2}$  – это напряжение, при достижении которого и последующей разгрузке остаточные деформации составляют 0,2%.

**Временное сопротивление**  $\sigma_u$  – это напряжение, которое соответствует наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

$u = ultimate$  (предельный)



# Характеристики упругости и пластичности

**Упругость** – это способность материала восстанавливать свою первоначальную форму после снятия внешней нагрузки.

*Упругие характеристики стали:*

**Модуль упругости  $E$**  – это тангенс угла наклона касательной к кривой деформирования в начале координат.

**Предел упругости  $\sigma_e$**  – это наибольшее напряжение, при котором деформации исчезают после снятия нагрузки.

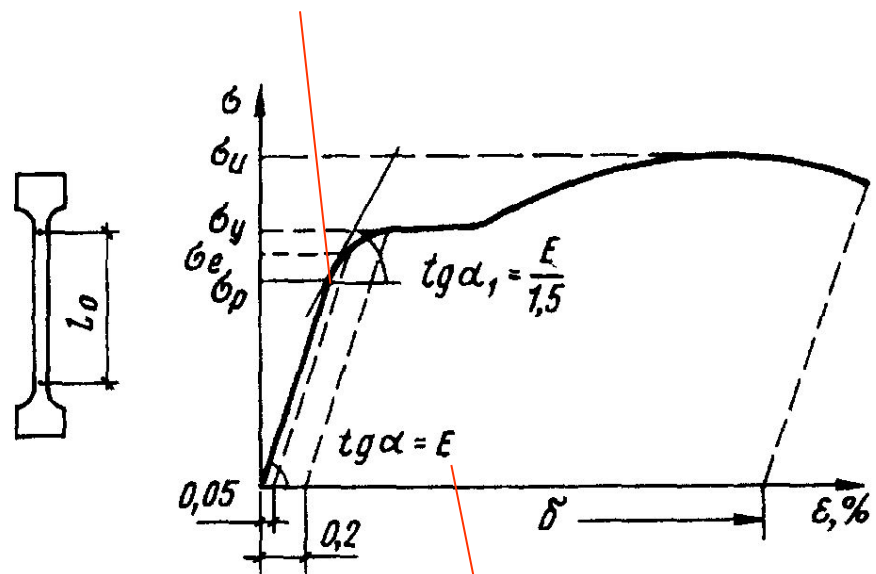
$e = elastic$  (упругость)

**Пластичность** – это способность материала получать необратимые (остаточные) деформации после снятия внешней нагрузки.

Пластичность характеризуется относительным остаточным удлинением при разрыве  $\delta$ .

$p = plastic$  (пластичность)

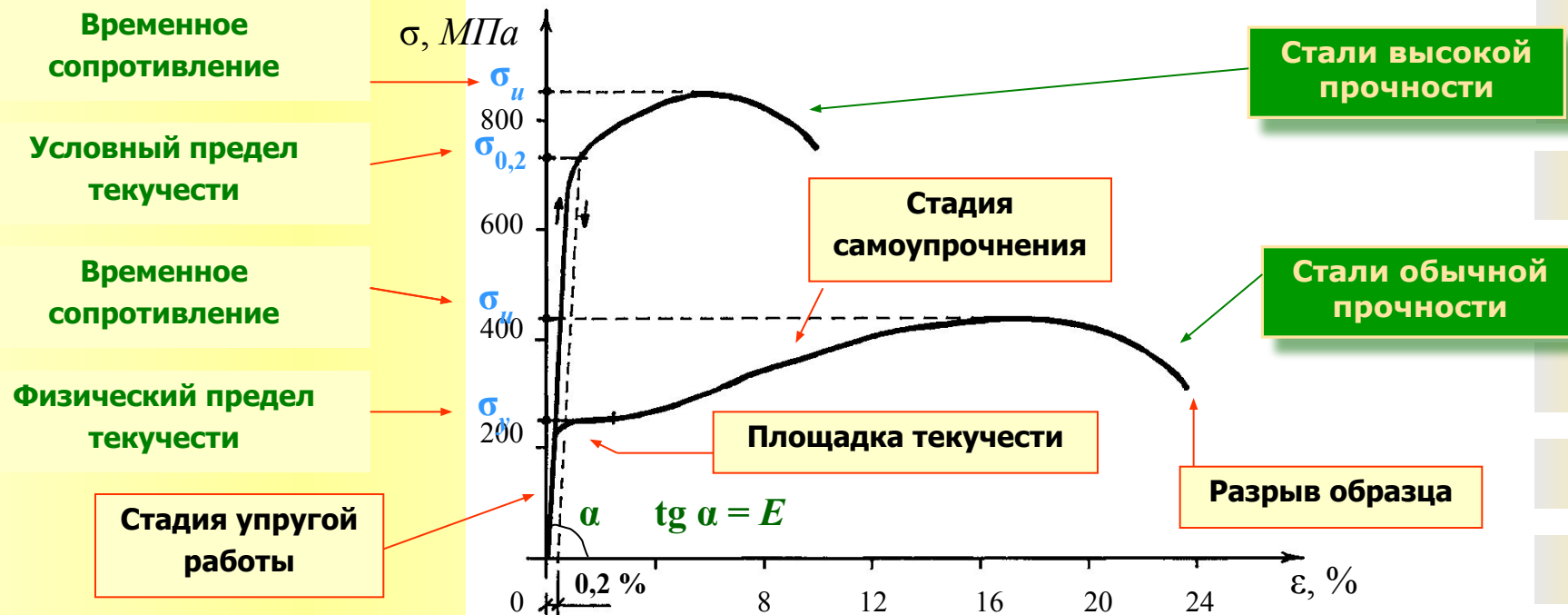
**Предел пропорциональности  $\sigma_p$**  находится чуть ниже предела упругости



**Модуль упругости** принимается постоянным для всех марок стали:

$$E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

# Диаграмма деформирования стали





# Испытание образцов на ударную вязкость

## Испытания на ударную вязкость

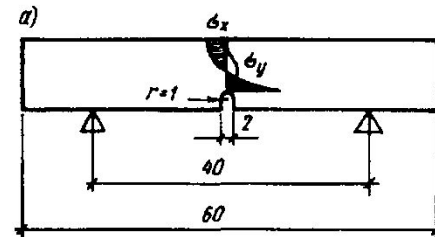
проводятся на специальных маятниковых копрах. Под ударом молота образец разрушается.

Ударная вязкость КС (Дж/см<sup>2</sup>) определяется отношением работы, затраченной на разрушение образца, к площади его поперечного сечения.

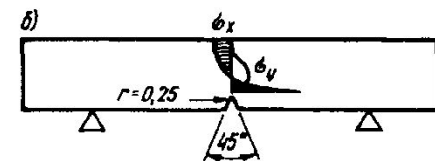
Для ужесточения условий испытаний

- а в образцах делают надрез, возникает концентрация напряжений;
- а понижают температуру среды (−40°C; −70°C);
- а образцы подвергают искусственному старению (создают остаточное удлинение 10% и нагревают в печи до 250 °C).

Образец с U-образным надрезом (образец Менаже)



Образец с V-образным надрезом (образец Шарпи)



Образец с трещиной

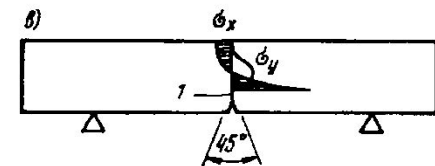
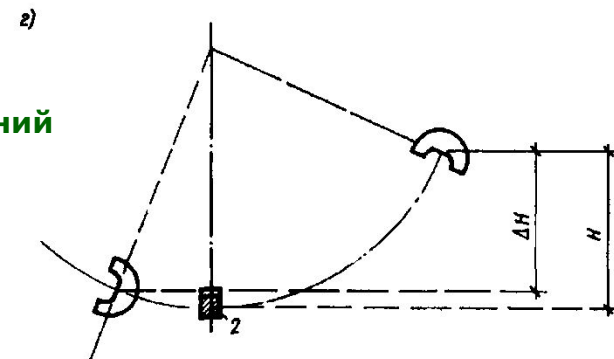


Схема испытаний



# Испытание образцов на ударную вязкость

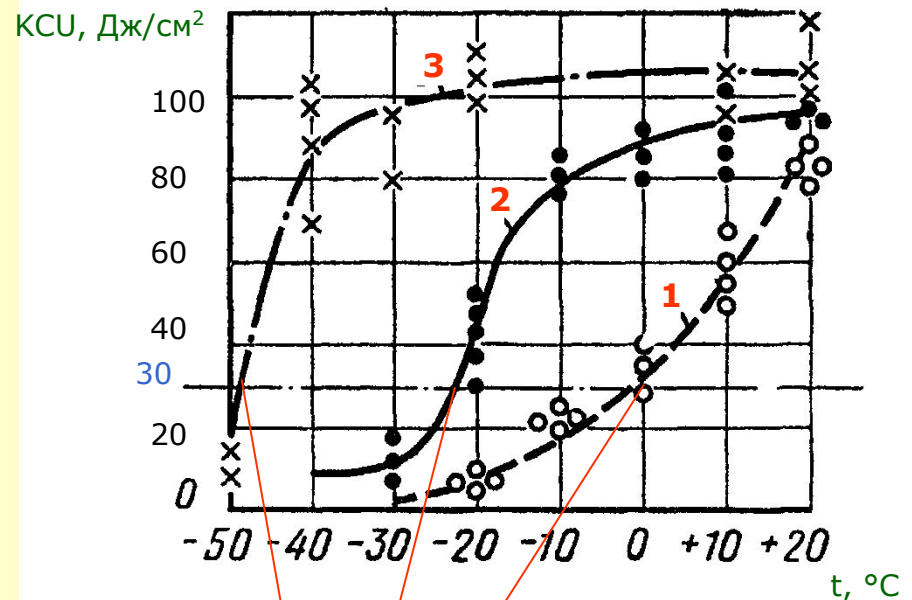
Ударная вязкость является комплексным показателем, характеризующим

- а Состояние стали (хрупкое или вязкое);
- а Чувствительность стали к концентрации напряжений;
- а Сопротивление стали динамическим воздействиям;
- а Склонность стали к хрупкому разрушению при пониженных температурах;
- а Склонность стали к старению.

**Хрупкость** – это свойство материала внезапно разрушаться без остаточных деформаций.

К хрупкому разрушению при пониженной температуре наиболее склонны **кипящие стали**.

Зависимость ударной вязкости от температуры



порог хладноломкости

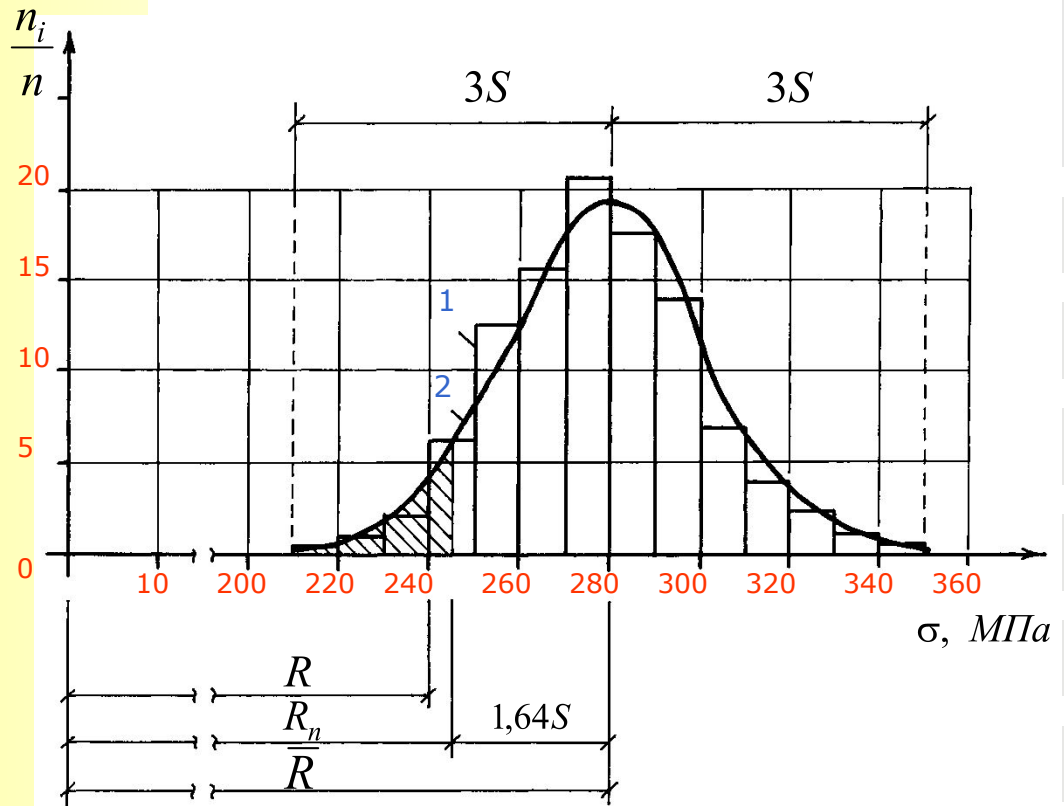
# Нормирование прочностных характеристик стали

Прочность стали, как и любого материала, находится под влиянием большого числа факторов и не остаётся постоянной даже в пределах одной партии образцов.

Изменчивость механических характеристик материалов учитывается методами математической статистики на основе большого числа испытаний (свыше 1000).

По результатам испытаний строят **гистограмму (1)**, которую затем аппроксимируют одной из **теоретических кривых плотности распределения (2)**.

Для прочностных характеристик материала наиболее подходящей является кривая Гаусса (**нормальный закон распределения**).



## Нормативное сопротивление материала

$$f(\sigma) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\sigma - \bar{R})^2}{2S^2}\right];$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n};$$

$$S = \sqrt{\frac{(\sigma_i - \bar{R})^2}{n-1}} \quad \text{при } n < 30;$$

$$S = \sqrt{\frac{(\sigma_i - \bar{R})^2}{n}} \quad \text{при } n > 30;$$

$$R_n = \bar{R} \cdot (1 - \gamma V); \quad V = S / \bar{R}$$

$f(\sigma)$  – плотность распределения;

$\sigma$  – рассматриваемая характеристика (например, предел текучести  $\sigma_y$ );

$\bar{R}$  – математическое ожидание (среднее значение);

$S$  – стандарт распределения (среднеквадратичное отклонение от математического ожидания);

$n$  – число испытаний.

**Нормативное сопротивление материала  $R_n$**  – это значение его прочностной характеристики, принятое с обеспеченностью  $p = 0,95$  на основании статистической обработки результатов стандартных испытаний образцов.

$\gamma$  – показатель надёжности, гарантирующий заданную обеспеченность (табличное значение);

$V$  – коэффициент вариации; характеризует качество технологии.



# Расчётное сопротивление материала

**Обеспеченность** (доверительная вероятность) нормативного сопротивления **0,95** означает, что из 100 образцов 95 будут иметь прочность не ниже нормативного значения.

Нормативное сопротивление указывается в ГОСТ и контролируется на производстве.

При выполнении расчётов пользуются **расчётным сопротивлением**:

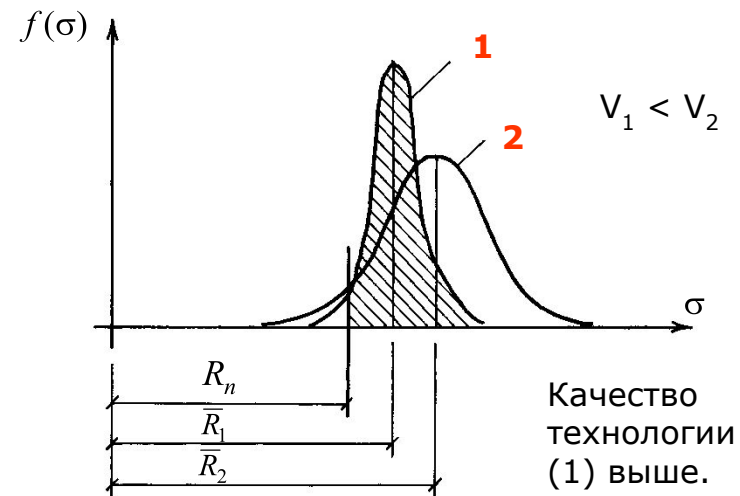
$$R = R_n / \gamma_m$$

$\gamma_m$  – **коэффициент надёжности по материалу** ( $\gamma_m > 1$ ); учитывает

- а неблагоприятные отклонения сопротивления материала от его нормативного значения вследствие неоднородности свойств;
- а установленные допуски на размеры сечений проката.

| Обеспеченность $p$ | Гауссовский показатель надёжности $\gamma$ |
|--------------------|--------------------------------------------|
| 0,95               | 1,64                                       |
| 0,9973             | 3                                          |

| Материал | Коэффициент вариации $V$ | Коэффициент надёжности по материалу $\gamma_m$ |
|----------|--------------------------|------------------------------------------------|
| Сталь    | 0,075...0,105            | 1,025...1,15                                   |
| Бетон    | 0,135                    | 1,15...1,50                                    |



# Нормативные и расчётные сопротивления стали

## Условные обозначения

|                                            | Нормативное сопротивление | Расчётное сопротивление |
|--------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| по пределу текучести ( $\sigma_y$ )        | $R_{yn}$                  | $R_y$                   |
| по временному сопротивлению ( $\sigma_u$ ) | $R_{un}$                  | $R_u$                   |

## Нормативные и расчётные сопротивления проката, МПа

| Марка стали | толщина проката, мм | нормативные                                |          |           |          | расчётные                                  |       |           |       |
|-------------|---------------------|--------------------------------------------|----------|-----------|----------|--------------------------------------------|-------|-----------|-------|
|             |                     | листового, широкополочного, универсального |          | фасонного |          | листового, широкополочного, универсального |       | фасонного |       |
|             |                     | $R_{yn}$                                   | $R_{un}$ | $R_{yn}$  | $R_{un}$ | $R_y$                                      | $R_u$ | $R_y$     | $R_u$ |
| С 245       | от 2 до 20          | 245                                        | 370      | 245       | 370      | 240                                        | 360   | 240       | 360   |
|             | св. 20 до 30        | -                                          | -        | 235       | 370      | -                                          | -     | 230       | 360   |
| С 345       | от 2 до 10          | 345                                        | 490      | 345       | 490      | 335                                        | 480   | 335       | 480   |
|             | св. 10 до 20        | 325                                        | 470      | 325       | 470      | 315                                        | 460   | 315       | 460   |
|             | св. 20 до 40        | 305                                        | 460      | 305       | 460      | 300                                        | 450   | 300       | 450   |
| С 375       | от 2 до 10          | 375                                        | 510      | 375       | 510      | 365                                        | 500   | 365       | 500   |
|             | св. 10 до 20        | 355                                        | 490      | 355       | 490      | 345                                        | 480   | 345       | 480   |
|             | св. 20 до 40        | 335                                        | 480      | 335       | 480      | 325                                        | 470   | 325       | 470   |

# Маркировка стали по ГОСТ 27772-88

С 245

Сталь строительная

$R_{уп}$  для наименьшей толщины  
(с округлением до 5 МПа).

ГОСТ 27772-88 «Прокат для  
строительных конструкций. Общие  
технические условия»

С 345К

Вариант хим. состава

С 345Д

Сталь повышенной  
коррозионной стойкости  
(с добавкой меди)

# Маркировка стали по другим стандартам

Группа поставки

А – по механическим свойствам

Б – по химическому составу

В – по механическим свойствам и химическому составу

**ГОСТ 380-88 «Сталь углеродистая обыкновенного качества»**

**Сталь «3»**

Вст3пс6

Категория стали (1...6), указывает вид испытаний на ударную вязкость

Степень раскисления

сп – спокойная

пс – полуспокойная

кп – кипящая

Вст3Гпс5

Сталь с повышенным содержанием марганца

**ГОСТ 19281-73 «Сталь низколегированная сортовая и фасонная»**

**Стали, поставляемые по разным стандартам, взаимозаменяемы**

содержание углерода 0,09%

09Г2С

марганец до 2%

кремний до 1%



## Классификация сталей по прочности

| Группа стали                                                                     | Марки стали<br>по ГОСТ 27772-88 | Протяженность<br>площадки<br>текучести, % | $\sigma_y / \sigma_u$ | $\delta$ , % |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|--------------|
| <b>Стали обычной прочности</b><br>малоуглеродистые                               | C235; C245; C255;<br>C275; C285 | 2,5                                       | 0,6...0,7             | 21           |
| <b>Стали повышенной прочности</b><br>низколегированные                           | C345; C375                      | 1...1,5                                   | 0,7...0,8             | 17           |
| <b>Стали высокой прочности</b><br>низколегированные с<br>термическим упрочнением | C390; C440; C590                | отс.                                      | 0,8...0,9             | 12           |

# Выбор марки стали для конструкции

В зависимости от условий работы стальные конструкции разделяются на 4 группы, для которых установлены применяемые марки стали (табл. 50\*СНиП II-23-81\*).

**Можно ли в одной конструкции применять разные марки стали.** Да, это экономически целесообразно. Для более нагруженных элементов применяется более прочная сталь.

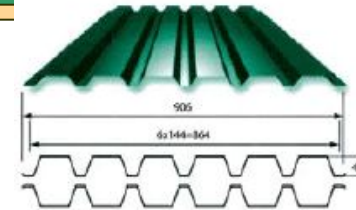
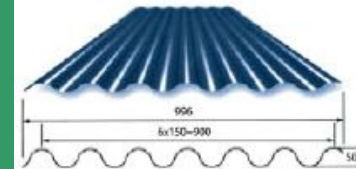
| Группа конструкций | Характеристика работы сварных* конструкций                                                                           | Примеры конструкций                                                                              | Марка стали (при t до -40°C)                    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>1</b>           | Работающие в особо тяжёлых условиях или подвергающиеся воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок | <ul style="list-style-type: none"> <li>• подкрановые балки</li> <li>• фасонки ферм</li> </ul>    | <b>все, кроме C235; C245; C275; C345K; C590</b> |
| <b>2</b>           | Работающие преимущественно на растяжение и изгиб при статической нагрузке                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• фермы</li> <li>• балки перекрытий и покрытий</li> </ul> | <b>все, кроме C235</b>                          |
| <b>3</b>           | Работающие преимущественно на сжатие при статической нагрузке                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• колонны</li> <li>• опорные плиты</li> </ul>             | <b>все</b>                                      |
| <b>4</b>           | Вспомогательные конструкции                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• лестницы</li> <li>• элементы фахверка</li> </ul>        | <b>только C235</b>                              |

\* При отсутствии сварных соединений группа понижается на одну ступень.

## Выбор марки стали для конструкции

| Сталь                                     | Расчётная температура в районе строительства и группа конструкций |   |   |   |            |   |   |   |            |   |   |   |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---|---|---|------------|---|---|---|------------|---|---|---|
|                                           | до – 40 °С                                                        |   |   |   | до – 50 °С |   |   |   | до – 65 °С |   |   |   |
|                                           | 1                                                                 | 2 | 3 | 4 | 1          | 2 | 3 | 4 | 1          | 2 | 3 | 4 |
| C235                                      |                                                                   |   | + | + |            |   |   |   |            |   |   |   |
| C245                                      |                                                                   | + | + |   |            |   |   | + |            |   |   | + |
| C255                                      | +                                                                 | + | + |   |            |   | + | + |            |   |   | + |
| C275                                      |                                                                   | + | + |   |            |   |   | + |            |   |   | + |
| C285                                      | +                                                                 | + | + |   |            |   | + | + |            |   |   | + |
| C345                                      | +                                                                 | + | + |   | +          | + | + |   | +          | + | + |   |
| C345K                                     |                                                                   | + | + |   |            |   | + |   |            |   |   |   |
| C375                                      | +                                                                 | + | + |   | +          | + | + |   | +          | + | + |   |
| C390                                      | +                                                                 | + | + |   | +          | + | + |   | +          | + | + |   |
| C440                                      | +                                                                 | + | + |   | +          | + | + |   | +          | + | + |   |
| Примечания см. в табл. 50* СНиП II-23-81* |                                                                   |   |   |   |            |   |   |   |            |   |   |   |
| C590k                                     |                                                                   |   |   |   |            | + | + |   |            | + | + |   |

# Сортамент стальных профилей



**Сортамент** – это каталог профилей с указанием формы сечения, геометрических характеристик и массы единицы длины.

## Стальные профили

### Прокатные

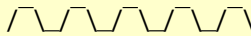
#### Фасонные

- I** Двутавры (обыкновенные, балочные, широкополочные, колонные)
- [** Швеллеры
- L** Уголки (равнополочные, неравнополочные)

#### Листовые

- Сталь толстолистовая (толщ. 4...160 мм)
- Сталь тонколистовая (толщ. 0,5...4 мм)
- Сталь универсальная (толщ. 6...60 мм)

### Гнутые

Стальной профилированный настил (профнастил)  
толщ. 0,6...1,0 мм 

Уголки, швеллеры

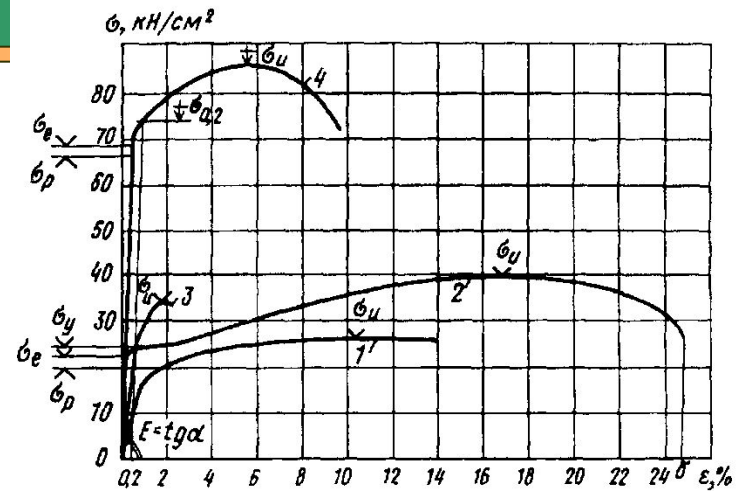
### Сварные

Круглые и прямоугольные трубы

## Тестовые вопросы (12-13)

Установите соответствие

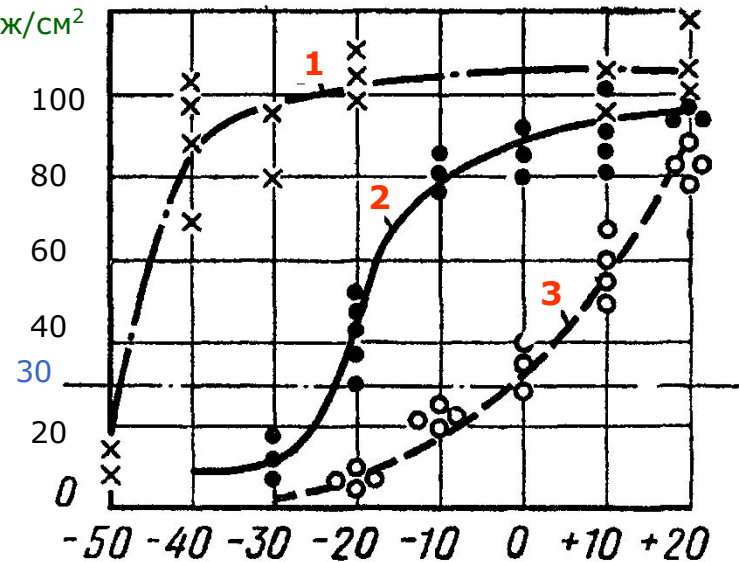
- |   |                                                  |
|---|--------------------------------------------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> чугун                   |
| 2 | <input type="checkbox"/> алюминиевый сплав       |
| 3 | <input type="checkbox"/> малоуглеродистая сталь  |
| 4 | <input type="checkbox"/> низколегированная сталь |



Установите соответствие

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> C235 |
| 2 | <input type="checkbox"/> C255 |
| 3 | <input type="checkbox"/> C375 |

KCU, Дж/см²



t, °C



## Тестовые вопросы (14-15)

### Нормативное сопротивление стали имеет обеспеченность

Выберите правильный ответ

- ☐ 0,05
- ☐ 0,9973
- ☐ 0,95
- ☐ 1,64
- ☐ 3,00

---

### Расчётное сопротивление стали получают

Выберите правильный ответ

- ☐ Умножением нормативного сопротивления на коэффициент запаса 0,95
- ☐ Умножением нормативного сопротивления на коэффициент надёжности по материалу
- ☐ Делением нормативного сопротивления на коэффициент надёжности по материалу
- ☐ Делением нормативного сопротивления на коэффициент вариации
- ☐ Делением на нормативного сопротивления на показатель надёжности  $\gamma = 1,64$

## Тестовые вопросы (16-17)

**Обеспеченность нормативного сопротивления стали 0,95 означает, что из 100 образцов 95 будут иметь прочность**

Выберите правильный ответ

- ☐ не выше нормативного значения
- ☐ не ниже нормативного значения
- ☐ равную нормативному значению
- ☐ не выше расчётного значения
- ☐ не ниже расчётного значения

**Коэффициент надёжности по материалу учитывает**

Выберите правильные ответы

- ☐ Возможное неблагоприятное отклонение нагрузки от нормативной
- ☐ Возможное благоприятное отклонение нагрузки от нормативной
- ☐ Возможное отклонение сопротивления стали от нормативного в меньшую сторону
- ☐ Возможное отклонение сопротивления стали от нормативного в большую сторону
- ☐ Установленные допуски на размеры сечений
- ☐ Работу стали на динамические нагрузки
- ☐ Нормативное сопротивление стали

## Тестовые вопросы (18-19)

**В обозначении марки стали С345 число «345» означает**

Выберите правильный ответ

- ☐ Временное сопротивление стали по пределу текучести
- ☐ Нормативное сопротивление стали по пределу текучести
- ☐ Расчётное сопротивление стали по пределу текучести
- ☐ Расчётное сопротивление стали по временному сопротивлению
- ☐ Нормативное сопротивление стали по временному сопротивлению
- ☐ Прочность стали

**В обозначении марки стали С345Д буква «Д» означает**

Выберите правильный ответ

- ☐ Двухфазовая сталь
- ☐ Фасонная сталь
- ☐ Коррозионно-стойкая сталь с добавкой меди
- ☐ Сталь, хорошо воспринимающая динамические нагрузки
- ☐ Сталь высокой прочности
- ☐ Кипящая сталь

## Тестовые вопросы (20-22)

Установите  
соответствие

Расчётное сопротивление стали по пределу текучести  
Расчётное сопротивление стали по временному сопротивлению  
Нормативное сопротивление стали по пределу текучести  
Нормативное сопротивление стали по временному сопротивлению

☐  $R_y$

☐  $R_{un}$

☐  $R_u$

☐  $R_{yn}$

**Для фасонок ферм нельзя применять  
сталь марки (при t до -40°C)**

Выберите правильные ответы

- ☐ C235
- ☐ C345
- ☐ C245
- ☐ C345K
- ☐ C255
- ☐ C275

**Для балок перекрытий и покрытий  
можно применять сталь марки  
(при t до -40°C)**

Выберите правильные ответы

- ☐ C245
- ☐ C375
- ☐ C390
- ☐ C345
- ☐ C235

### Блок 3

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

- Основные этапы проектирования. Конструктивная и расчётная схемы
- Нормативная база проектирования
- Нагрузки и воздействия. Классификация нагрузок
- Постоянные и временные нагрузки
- Нормативные и расчётные нагрузки. Сочетания нагрузок
- Полезные нагрузки
- Снеговая и ветровая нагрузки



# Основные этапы проектирования строительных конструкций. Конструктивная и расчётная схемы

## Этапы

(1) Компоновка конструктивной схемы

(2) Формирование расчётной схемы

(3) Сбор нагрузок

(4) Статический расчёт

Определение внутренних усилий ( $M$ ,  $Q$ ,  $N$ ) методами статики (строительной механики)

(5) Конструктивный расчёт

Подбор и проверка сечений

(6) Расчёт и конструирование узлов

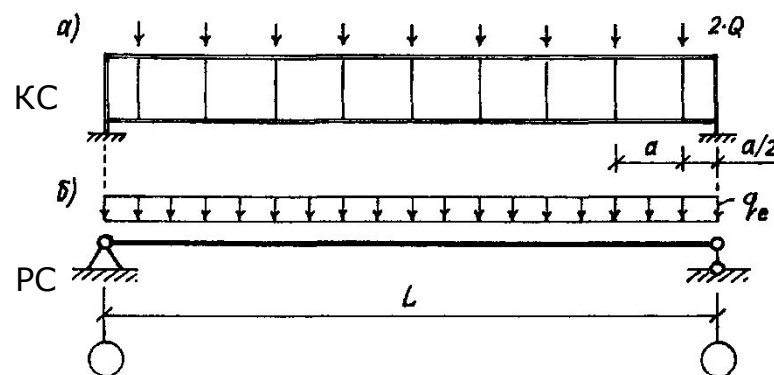
(7) Выполнение рабочих чертежей

### Конструктивная схема (КС)

отражает действительные размеры элементов и фактические условия их закрепления

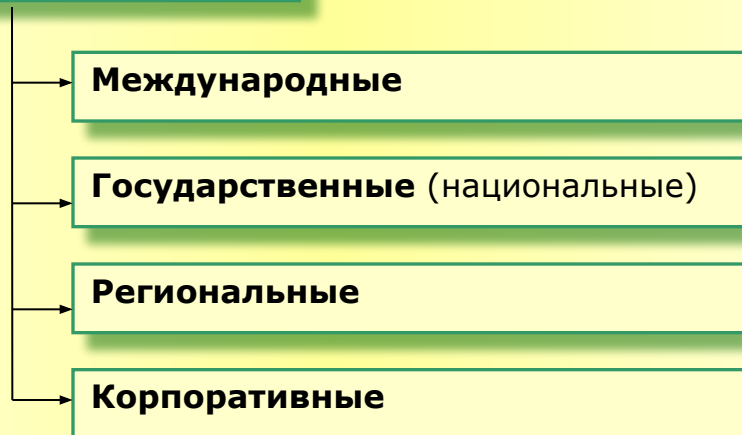
### Расчётная схема (РС)

является упрощённой (условной, идеализированной) и с необходимой степенью точности отражает работу элемента под действием нагрузок



# Нормативная база строительного проектирования

## Нормативные документы



Закон 184-ФЗ «О техническом регулировании», принят 27 декабря 2002 г., с изм. от 06.04.2007 г.

**Eurocode-1; Eurocode-2**

**ГОСТ, Технические регламенты, СНиП, СП (Своды Правил)**

**МГСН – Московские городские строительные нормы**

Обязательные для исполнения нормативные документы содержат только общие (как правило, словесные) требования.

Детальные указания по расчёту и конструированию являются рекомендуемыми.

Проектировщик сам выбирает применяемые расчётные модели и несёт полную ответственность за полученные результаты.

**СНиП 2.01.07-85\*.** Нагрузки и воздействия.

**СНиП II-23-81\*.** Стальные конструкции.

**СП 53-102-04.** Общие правила проектирования стальных конструкций.

**МГСН 4.19-05.** Многофункциональные высотные здания и комплексы.

# Нагрузки и воздействия. Классификация нагрузок

**Воздействия**

**Силовые**  
(нагрузки)

**Несиловые**

- **Средовые** (температурное, влажностное, коррозионно-агрессивное и др.);
- **Кинематические** (смещение опор и др.)

**Классификация  
нагрузок**

**(1) По длительности действия**

**(2) По направлению**

**(3) По характеру распределения**

**(4) По вероятности реализации**

**Постоянные**

Действуют в течение всего срока службы сооружения

**Временные**

Действуют в течение определённого времени

**Кратковременные**

**Длительные**

**Особые**

**Вертикальные**

**Горизонтальные**

**Равномерно  
распределённые**

**Сосредоточенные (кН)**

**по площади (кН/м<sup>2</sup>)**  
поверхностные

**по длине (кН/м)**  
линейные, погонные

**Нормативные (эксплуатационные)**

**Расчётные (предельные)**

# Постоянные, временные и особые нагрузки

## Постоянные

- Вес несущих и ограждающих конструкций;
- Вес и давление грунтов;
- Усилия от предварительного напряжения.

### Нагрузки и воздействия

## Особые

- Сейсмические воздействия;
- Взрывные воздействия;
- Нагрузки, вызванные резким нарушением технологического процесса;
- Запроектные воздействия.

## Кратковременные

- Нагрузки от людей и оборудования с **полным** значением;
- Снеговая нагрузка с **полным** значением;
- Ветровая нагрузка;
- Гололёдная нагрузка.

## Длительные

- Вес стационарного оборудования;
- Давление газов, жидкостей и сыпучих тел;
- Вес складироваемых материалов;
- Нагрузки от людей и оборудования с **пониженным** значением;
- Снеговая нагрузка с **пониженным** значением.

# Нормативные и расчётные нагрузки

**Нормативная**, или эксплуатационная, нагрузка  $q_n$  – это наибольшая величина нагрузки, позволяющая нормально эксплуатировать здание (сооружение);

**Расчётная** нагрузка  $q$  – это наибольшая величина нагрузки, используемая в расчётах конструкций на прочность и устойчивость:

$$q = q_n \cdot \gamma_f$$

$\gamma_f$  – **коэффициент надёжности по нагрузке** (обычно  $\gamma_f > 1$ ); учитывает возможные неблагоприятные отклонения нагрузки от нормативного значения (обычно в сторону увеличения) вследствие её статистической изменчивости.

Наибольшей изменчивостью обладают атмосферные нагрузки (снеговая, ветровая), для них  $\gamma_f = 1,4$ .

| Вид нагрузки                                         |                                                                                      | $\gamma_f$ | Пункт СНИП |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|
| <b>Постоянная</b> – от собственного веса конструкций | металлических                                                                        | 1,05       | табл. 1    |
|                                                      | железобетонных, каменных, деревянных                                                 | 1,1        |            |
|                                                      | изоляционных, выравнивающих и отделочных слоёв, выполняемых на строительной площадке | 1,3        |            |
| <b>Временная</b>                                     | полезная при полном нормативном значении менее 200 кг/м <sup>2</sup>                 | 1,3        | п. 3.7     |
|                                                      | полезная при полном нормативном значении 200 кг/м <sup>2</sup> и более               | 1,2        |            |
|                                                      | крановая                                                                             | 1,1        | п. 4.8     |
|                                                      | снеговая                                                                             | 1,4        | п. 5.7     |
|                                                      | ветровая                                                                             | 1,4        | п. 6.11    |

СНИП 2.01.07-85\*



## Сочетания нагрузок

На конструкцию действует, как правило, несколько нагрузок, и при расчёте необходимо выявить их наиболее неблагоприятное сочетание.

При учёте одновременного действия более двух нагрузок их расчётные значения умножают на коэффициенты сочетаний  $\psi < 1$ .

**Коэффициент сочетаний  $\psi$**  учитывает маловероятность одновременного действия максимальных значений нескольких нагрузок.

СНиП 2.01.07-85\* предусматривает **основные** и **особые** сочетания нагрузок.

Для некоторых многоэтажных зданий (например, жилых) учитывается маловероятность одновременного действия максимальных значений временных равномерно распределённых нагрузок

- **на всей грузовой площади перекрытия:** при расчёте элементов перекрытий временную нагрузку умножают на понижающий коэффициент  $\psi_A$ ;
- **на всех этажах:** при расчёте колонн, стен и фундаментов временную нагрузку умножают на понижающий коэффициент  $\psi_n$ .

Указания по определению  $\psi_A$  и  $\psi_n$  приводятся в п.3.8-3.9 СНиП 2.01.07-85\*.

| Сочетание  | Учитываемые нагрузки                 | Коэффициенты сочетаний $\psi$ для нагрузок |            |                  |        |
|------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|------------|------------------|--------|
|            |                                      | постоянных                                 | длительных | кратко-временных | особых |
| Основное 1 | Постоянная + одна временная          | 1                                          | 1          | 1                | -      |
| Основное 2 | Постоянная + две и более временных   | 1                                          | 0,95       | 0,9              | -      |
| Особое     | Постоянная + временные + одна особая | 1                                          | 0,95       | 0,8              | 1      |

## Определение нагрузок

Нормативные значения нагрузок определяются:

- а для постоянных нагрузок – по проектным данным;
- а для полезных нагрузок – по наибольшим значениям, которые предусмотрены условиями нормальной эксплуатации;
- а для снеговой и ветровой нагрузок – по данным метеонаблюдений.

### Сбор нагрузки на перекрытие жилого здания

| Состав                                                   | Нормативная нагрузка, кг/м <sup>2</sup> | Коэффициент надёжности по нагрузке $\gamma_f$ | Расчётная нагрузка, кг/м <sup>2</sup> |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|
| Паркетный пол; 600 кг/м <sup>3</sup> ; толщ. 20 мм       | $600 \cdot 0,02 = 12$                   | 1,1                                           | $12 \cdot 1,1 = 13,2$                 |
| Стяжка из ц/п р-ра; 1800 кг/м <sup>3</sup> ; толщ. 20 мм | $1800 \cdot 0,02 = 36$                  | 1,3                                           | $36 \cdot 1,3 = 46,8$                 |
| Ж/б плита; 2500 кг/м <sup>3</sup> ; толщ. 250 мм         | $2500 \cdot 0,25 = 625$                 | 1,1                                           | $625 \cdot 1,1 = 687,5$               |
| <b>Итого постоянная нагрузка</b>                         | 673                                     | -                                             | <b>747,5</b>                          |
| Временная (полезная) нагрузка                            | 150                                     | 1,3                                           | $150 \cdot 1,3 = 195$                 |
| <b>Итого полная нагрузка</b>                             | 823                                     | -                                             | <b>942,5</b>                          |

# Полезные нагрузки

**Полезными** принято называть нагрузки, восприятие которых составляет целевое назначение сооружений.

## Полезные нагрузки

(по табл. 3 СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия)

| Здания и помещения                  |                                    | Нормативные значения нагрузок, кПа (кг/м <sup>2</sup> ) |                    |
|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------|
|                                     |                                    | полное                                                  | пониженное         |
| Квартиры жилых зданий               |                                    | 1,5 (150)                                               | 0,3 (30)           |
| Помещения административные, учебные |                                    | 2,0 (200)                                               | 0,7 (70)           |
| Залы                                | читальные                          | 2,0 (200)                                               | 0,7 (70)           |
|                                     | обеденные                          | 3,0 (300)                                               | 1,0 (100)          |
|                                     | зрительные, концертные, спортивные | 4,0 (400)                                               | 1,4 (140)          |
|                                     | торговые, выставочные              | не менее 4,0 (400)                                      | не менее 1,4 (140) |
| Книгохранилища, архивы              |                                    | не менее 5,0 (500)                                      | не менее 5,0 (500) |
| Автостоянки*                        |                                    | не менее 3,5 (350)                                      | не менее 1,5 (150) |

\*по МГСН 4.19-05

↑  
кратковременная  
нагрузка

↑  
длительная  
нагрузка

# Снеговая нагрузка

Расчётная снеговая нагрузка на горизонтальную проекцию покрытия :

$$s = s_g \cdot \mu$$

где

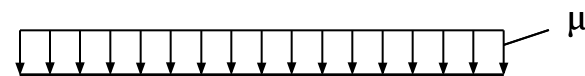
$s_g$  – **расчётное** значение веса снегового покрова; определяется в зависимости от снегового района;

$\mu$  – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие;

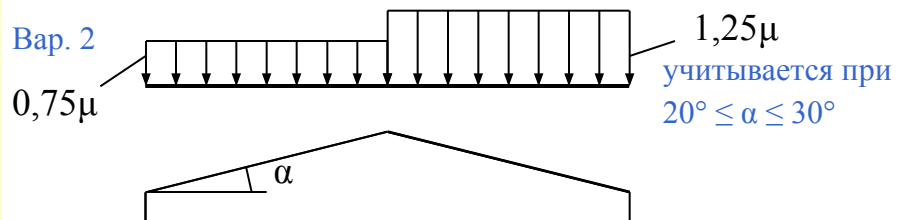
при уклоне кровли  $\alpha \leq 25^\circ$   $\mu = 1$ ;

при уклоне кровли  $\alpha \geq 60^\circ$   $\mu = 0$  (снега нет).

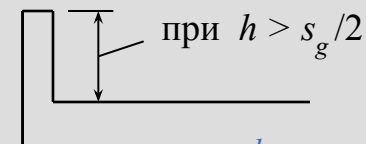
Вар. 1



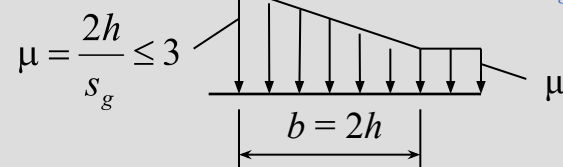
Вар. 2



Учёт снеговых мешков



$h$  – в м;  $s_g$  – в кПа



| Снеговой район            | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $s_g$ , кПа               | 0,8 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,2 | 4,0 | 4,8 | 5,6  |
| $s_g$ , кг/м <sup>2</sup> | 80  | 120 | 180 | 240 | 320 | 400 | 480 | 560  |

табл. 4\* СНиП 2.01.07-85\*

Москва

# Снеговая нагрузка

- В СНиП 2.01.07-85\* до 2003 г. приводилась **нормативная** снеговая нагрузка:

для г. Москвы  $s_n = 100 \text{ кг/м}^2$ .

Расчётная снеговая нагрузка:

$$s = 100 \cdot 1,4 = 140 \text{ кг/м}^2,$$

где 1,4 – коэффициент надёжности по нагрузке ( $\gamma_f$ ).

- В СНиП 2.01.07-85\* после изменений 2003 г. стала приводиться **расчётная** снеговая нагрузка:

для г. Москвы  $s_g = 180 \text{ кг/м}^2$  (повышена).

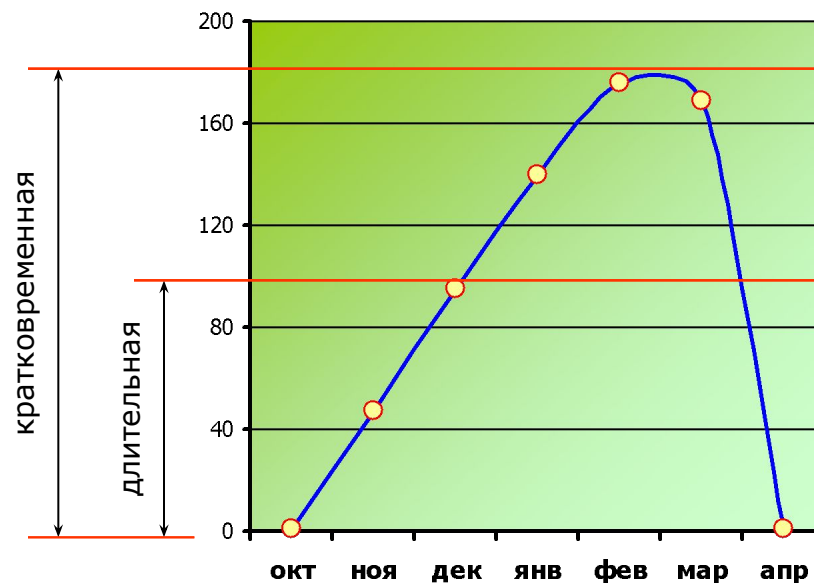
Нормативное значение снеговой нагрузки

$$s_n = 180/1,4 = 126 \text{ кг/м}^2.$$

- По МГСН 4.19-05 расчётное значение снеговой нагрузки для Москвы составляет

$$s_g = 200 \text{ кг/м}^2 \text{ (ещё более повышена).}$$

Распределение снеговой нагрузки по месяцам



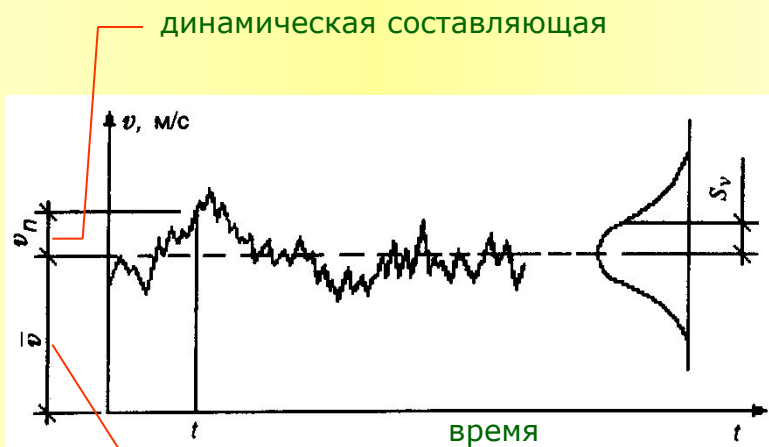
**Длительной** является снеговая нагрузка с пониженным расчётным значением, определяемым умножением полного значения на коэффициент 0,5.



# Ветровая нагрузка

**Ветровая нагрузка** на сооружения определяется как сумма двух составляющих:

- 4 **средней** (статической);
- 4 **пульсационной** (динамической) – не учитывается, если высота здания менее 36 м и отношение высоты к пролёту менее 1,5.



динамическая составляющая

статическая составляющая

ветер



Наветренная  
сторона,  
активное  
давление ветра  
( $c_a = 0,8$ )

Подветренная  
сторона,  
пассивное  
давление ветра  
( $c_p = 0,6$ )

сооружение

Расчётная воздействия статической составляющей  
ветровой нагрузки

# Ветровая нагрузка

Москва

(по табл. 5 СНиП 2.01.07-85\*)

Расчётное значение  
средней составляющей  
ветровой нагрузки :

| Ветровой район | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $w_0$ , кПа    | 0,23 | 0,30 | 0,38 | 0,48 | 0,60 | 0,73 | 0,85 |

$$w = w_0 \cdot k \cdot c \cdot \gamma_f;$$

где

$w_0$  – нормативное значение ветрового давления; определяется в зависимости от ветрового района;

$k$  – коэффициент изменения ветрового давления по высоте; принимается в зависимости от типа местности (А,В,С);

$c$  – аэродинамический коэффициент; в простейшем случае  $c_a = 0,8$ ;  $c_p = 0,6$ ;

$\gamma_f$  – коэффициент надёжности по нагрузке; для ветровой нагрузки  $\gamma_f = 1,4$ .

| Высота, м  | Коэффициент k для типов местности |      |      |
|------------|-----------------------------------|------|------|
|            | А                                 | В    | С    |
| $\leq 5$   | 0,75                              | 0,5  | 0,4  |
| 10         | 1,0                               | 0,65 | 0,4  |
| 20         | 1,25                              | 0,85 | 0,55 |
| 40         | 1,5                               | 1,1  | 0,8  |
| $\geq 480$ | 2,75                              | 2,75 | 2,75 |

(по табл. 6 СНиП 2.01.07-85\*)

**Тип А** – открытые побережья морей, озёр; пустыни, степи, лесостепи, тундра;

**Тип В** – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м;

**Тип С** – городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м.

## Блок 4

# РАСЧЁТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПО МЕТОДУ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

- Предельные состояния металлических конструкций
- Обобщённое условие расчёта
- Учёт условий работы конструкций и ответственности сооружений
- Расчёты на прочность при растяжении, изгибе, срезе, смятии
- Проверка общей и местной устойчивости
- Расчёт на действие местных напряжений
- Расчёт на выносливость

# Предельные состояния металлических конструкций

С 1955 г. расчёт всех строительных конструкций в нашей стране проводится по **методу предельных состояний**.

**Предельное состояние конструкции** – это её состояние, при котором она перестаёт отвечать предъявляемым к ней требованиям безопасности или эксплуатационной пригодности.

Нормы проектирования предусматривают две группы предельных состояний.

## Несущая способность конструкции

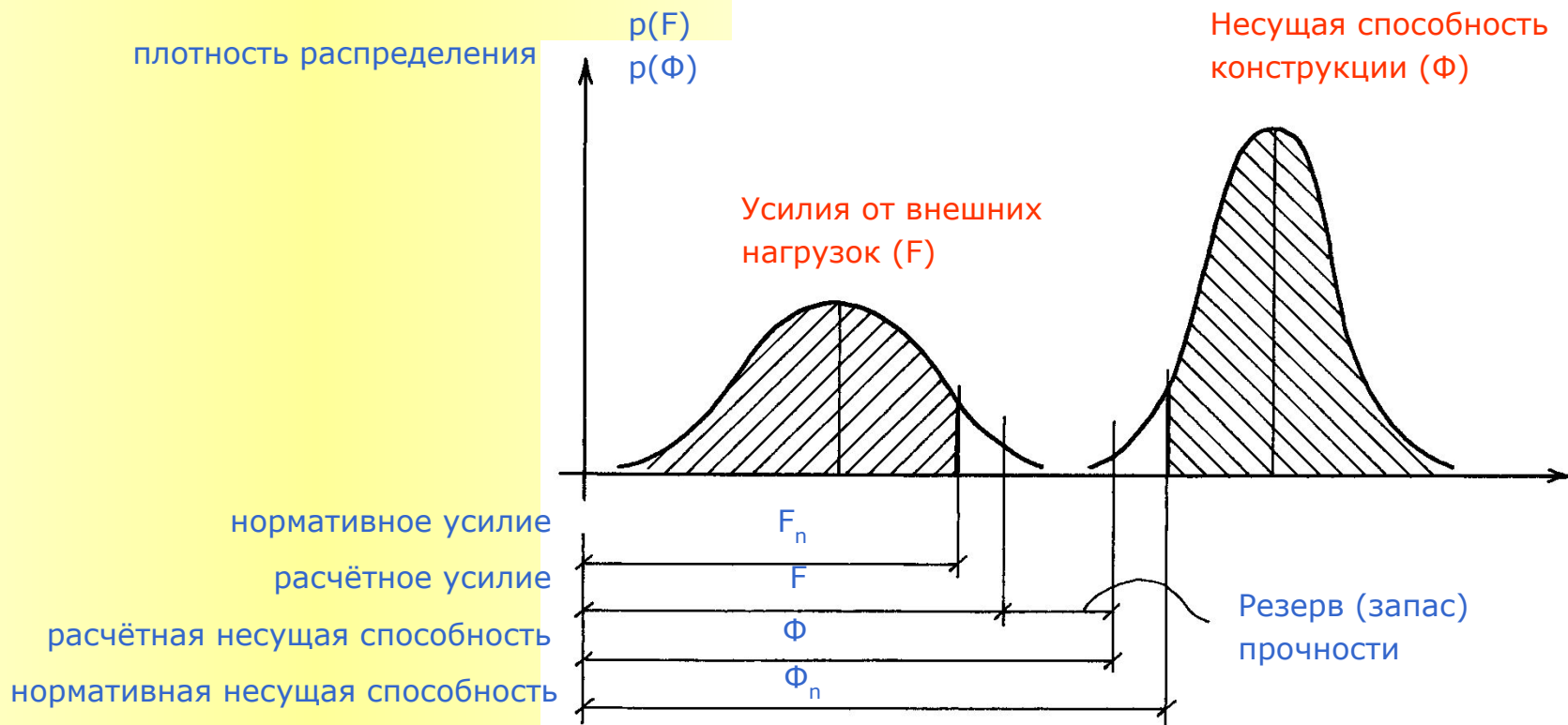
- **в качественном отношении** – это способность конструкции воспринимать действующую нагрузку.
- **в количественном отношении** – это максимальная величина нагрузки, которую может выдержать конструкция.

**Нормальная эксплуатация** – это эксплуатация, осуществляемая в соответствии с предусмотренными технологическими или бытовыми условиями.

| Группы предельных состояний                                     | Основные расчёты для металлических конструкций                                                                                         | Учитываемые нагрузки |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Первая группа</b> – по несущей способности                   | <ul style="list-style-type: none"><li>• на прочность;</li><li>• на устойчивость (общую и местную)</li><li>• на выносливость*</li></ul> | расчётные            |
| <b>Вторая группа</b> – по пригодности к нормальной эксплуатации | <ul style="list-style-type: none"><li>• на жёсткость (деформативность)</li></ul>                                                       | нормативные          |

\* Расчёт на **выносливость** проводят для конструкций, **непосредственно** испытывающих воздействие многократно-повторных нагрузок (мосты, подкрановые балки).

# Обобщённое условие расчёта по первому предельному состоянию



Наибольшие усилия в конструкции  $N$  от внешних нагрузок не должны превышать её наименьшей несущей способности  $\Phi$ :

$$F \leq \Phi$$

- Расчётная нагрузка больше, чем нормативная.
- Расчётное сопротивление меньше, чем нормативное.



## Обобщённое условие расчёта по первому предельному состоянию

расчётная нагрузка

расчётное сопротивление

$$F \left\{ (q_n \cdot \gamma_f) \cdot \Psi \cdot \gamma_n \right\} \leq \Phi \left\{ A; (R_n / \gamma_m) \cdot \gamma_c \right\}$$

нормативная нагрузка

коэффициент надёжности по нагрузке

коэффициент сочетаний

коэффициент надёжности по назначению

геометрия сечения

нормативное сопротивление

коэффициент надёжности по материалу

коэффициент условий работы

До 1955 г. использовались методы расчёта

- по допускаемым напряжениям:  $\sigma \leq \frac{R_n}{k}$

- по разрушающим усилиям:  $F \leq \frac{\Phi_n}{k}$

$k$  – коэффициент запаса ( $k \approx 1,5$ ).

В методе предельных состояний единый коэффициент запаса был разделён на несколько коэффициентов:

$$k = \gamma_n \cdot \gamma_m \cdot \gamma_f \cdot \Psi / \gamma_c$$

# Учёт ответственности сооружений и условий работы конструкций

Для учёта ответственности зданий и сооружений, характеризующейся экономическими, социальными и экологическими последствиями их отказов, расчётные значения нагрузок умножают на коэффициент надёжности по назначению здания  $\gamma_n$ .

По прил. 7\* СНиП 2.01.07-85\*

| Уровень ответственности |            | Коэффициент надёжности по назначению $\gamma_n$ | Характеристика объектов                          |
|-------------------------|------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| I                       | повышенный | 0,95...1,2                                      | Уникальные здания и сооружения                   |
| II                      | нормальный | <b>0,95</b>                                     | Здания и сооружения массового строительства      |
| III                     | пониженный | 0,8...0,95                                      | Здания сезонного или вспомогательного назначения |

Для учёта условий работы конструкций, не отражённых непосредственно в расчётах, расчётные сопротивления материалов умножают на коэффициент(ы) условий работы  $\gamma_c$ .

По табл. 6\* СНиП II-23-81\*

| Элементы стальных конструкций                                                                           | Коэффициент условий работы $\gamma_c$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Колонны общественных зданий                                                                             | 0,95                                  |
| Элементы стержневых конструкций покрытий и перекрытий                                                   | 0,95                                  |
| Сжатые раскосы (кроме опорных) и стойки ферм при гибкости более 60                                      | 0,8                                   |
| Сжатые элементы из уголков, прикрепляемых одной полкой                                                  | 0,75                                  |
| Опорные плиты из стали с пределом текучести до 285 МПа, несущие статическую нагрузку, толщиной до 40 мм | 1,2                                   |

# Обобщённое условие расчёта по второму предельному состоянию

Прогибы (или перемещения) конструкции  $f$  от нормативных нагрузок не должны превышать предельно допустимых значений  $f_u$ :

$$f \{ EJ; q_n \cdot \psi \cdot \gamma_n \} \leq f_u$$

прогиб от  
нормативных  
нагрузок

жёсткость

предельно допустимый прогиб

Предельные прогибы конструкций назначаются по табл. 19 СНиП 2.01.07-85\* исходя из конкретных эксплуатационных требований:

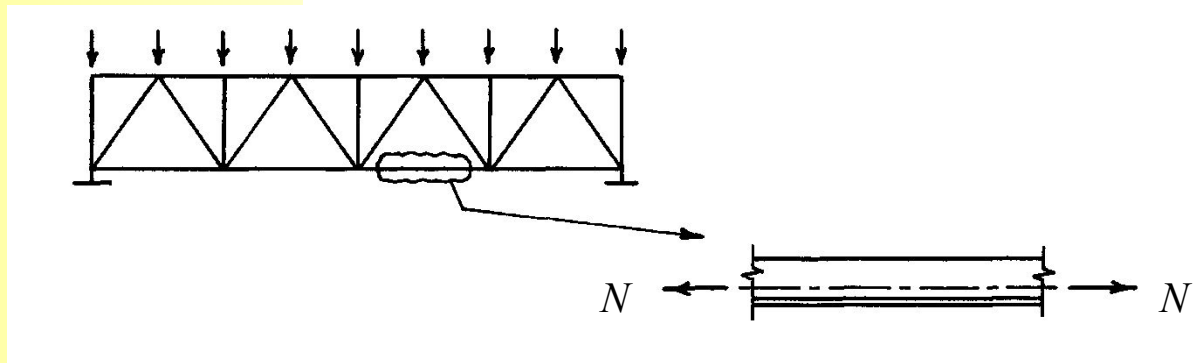
- **Технологических** (обеспечение условий нормальной эксплуатации технологического оборудования);
- **Конструктивных** (обеспечение целостности примыкающих друг к другу элементов);
- **Физиологических** (предотвращение ощущений дискомфорта при колебаниях);
- **Эстетико-психологических** (обеспечение благоприятного впечатления о безопасности конструкции).

## Предельные прогибы балок

(по эстетико-психологическим требованиям)

| Пролёт балки         | Предельный прогиб $f_u$ |
|----------------------|-------------------------|
| $L \leq 1 \text{ м}$ | $L/120$                 |
| $L = 3 \text{ м}$    | $L/150$                 |
| $L = 6 \text{ м}$    | $L/200$                 |
| $L = 24 \text{ м}$   | $L/250$                 |
| $L = 36 \text{ м}$   | $L/300$                 |

## Расчёт на прочность при осевом растяжении



4 Условие прочности:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \leq R_y \gamma_c ;$$

$\sigma$  – нормальные напряжения; кН/см<sup>2</sup>;

$N$  – расчётное продольное усилие, кН;

$A_n$  – площадь сечения нетто (с учётом ослаблений), см<sup>2</sup>;

$R_y$  – расчётное сопротивление стали по пределу текучести, кН/см<sup>2</sup>;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

# Расчёт на прочность при плоском изгибе

Нормальные и касательные напряжения в произвольном сечении  $z$ :

$$\sigma = \frac{M}{J_{x,n}} \cdot y; \quad \tau = \frac{QS_x}{t_w J_x}$$

Условие прочности по приведённым напряжениям (*reduced = приведённый*):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq R_y \gamma_c$$

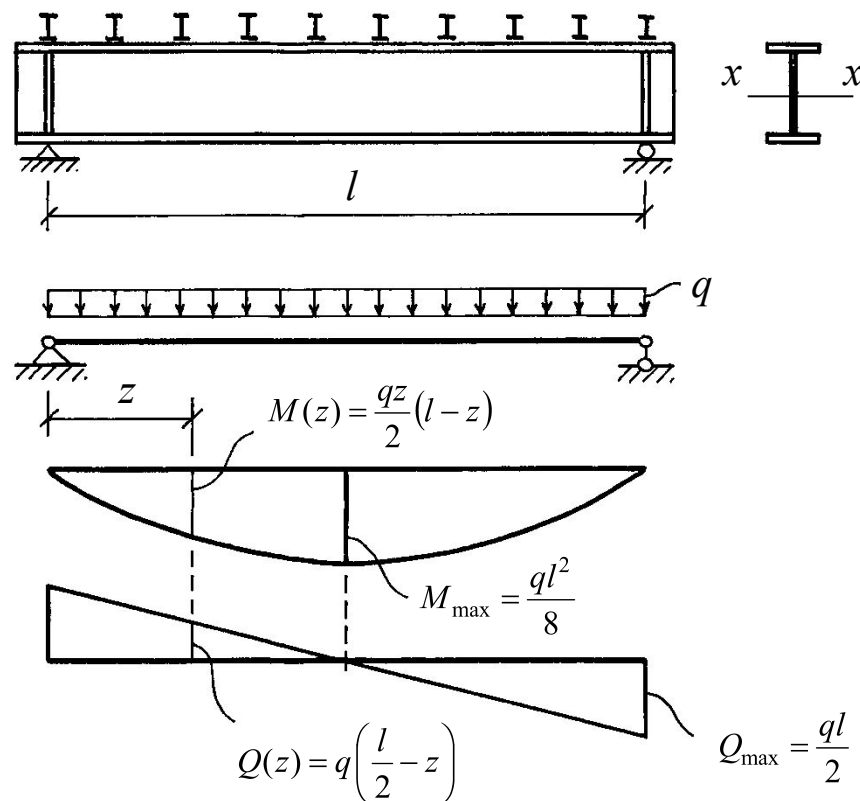
При  $\tau = 0$  (сечение с  $M_{max}$ ):

$$\sigma = \frac{M}{W_{x,n}} \leq R_y \gamma_c$$

При  $\sigma = 0$  (сечение с  $Q_{max}$ ):

$$\tau \leq \frac{1}{\sqrt{3}} R_y \gamma_c = 0,58 R_y \gamma_c = R_s \gamma_c;$$

$$\tau = \frac{QS_x}{t_w J_x} \leq R_s \gamma_c$$



$W_{xn}$  – момент сопротивления сечения нетто,  $\text{см}^3$ ;

$S_x$  – статический момент полусечения,  $\text{см}^3$ ;

$J_{xn}$  – момент инерции сечения нетто,  $\text{см}^4$ ;

$t_w$  – толщина стенки,  $\text{см}$ ;

$R_s$  – расчётное сопротивление стали срезу,  $\text{кН/см}^2$ ;  $R_s = 0,58 R_y$

# Учёт развития пластических деформаций при расчёте на прочность при изгибе

При расчёте на прочность разрезных балок из стали с пределом текучести до 530 МПа, несущих статическую нагрузку, допускается учитывать ограниченное развитие пластических деформаций (п. 5.18\* СНиП II-23-81\*):

$$\sigma = \frac{M}{cW_{x,n}} \leq R_y \gamma_c;$$

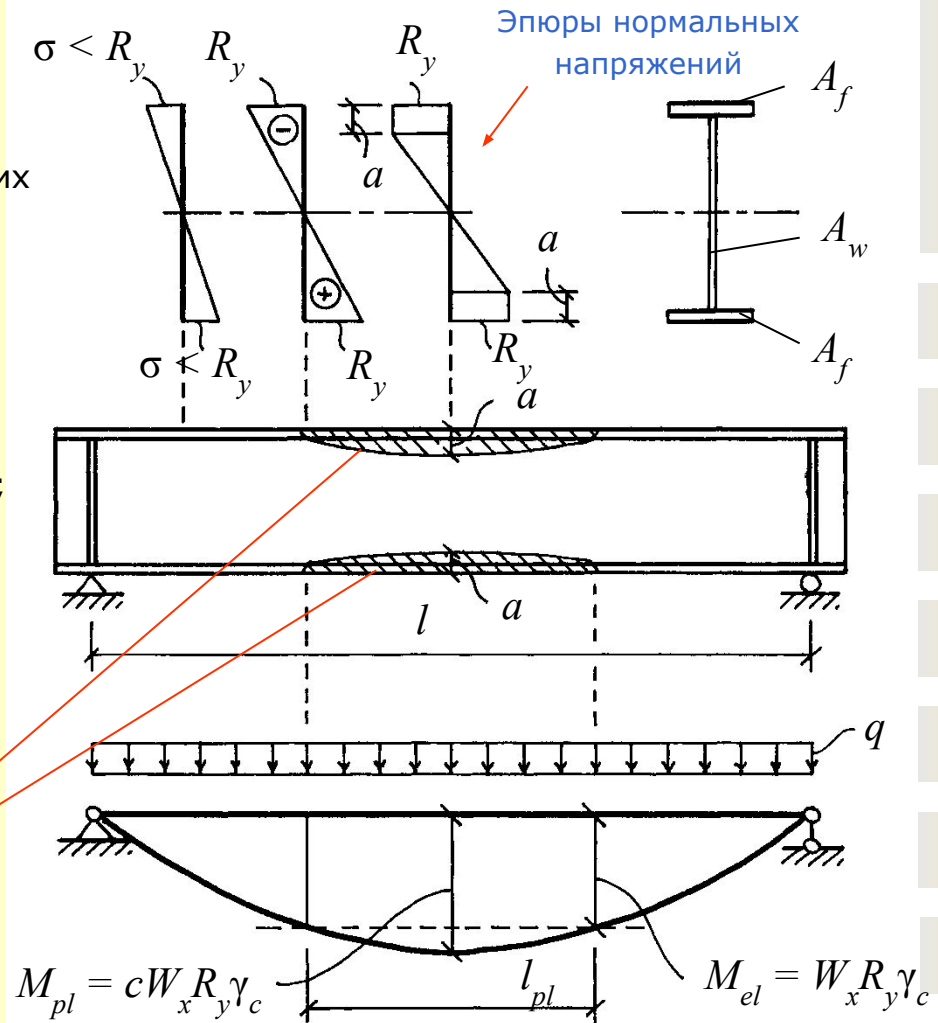
$c$  – коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций (по табл. 66 СНиП); при отношении  $A_f/A_w = 0,5$  значение  $c = 1,12$ .

$$c = \frac{M_{pl}}{M_{el}} = \frac{W_{pl,x}}{W_x} = \frac{2S_x}{W_x}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1,15 R_y \gamma_c;$$

коэффициент,  
учитывающий  
развитие  
пластических  
деформаций

Зона ограниченного  
развития пластических  
деформаций

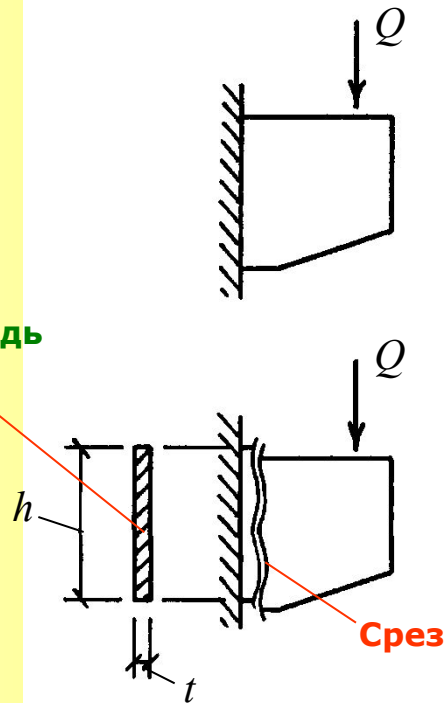




# Расчёт на прочность при срезе и смятии

## Срез

Площадь  
среза

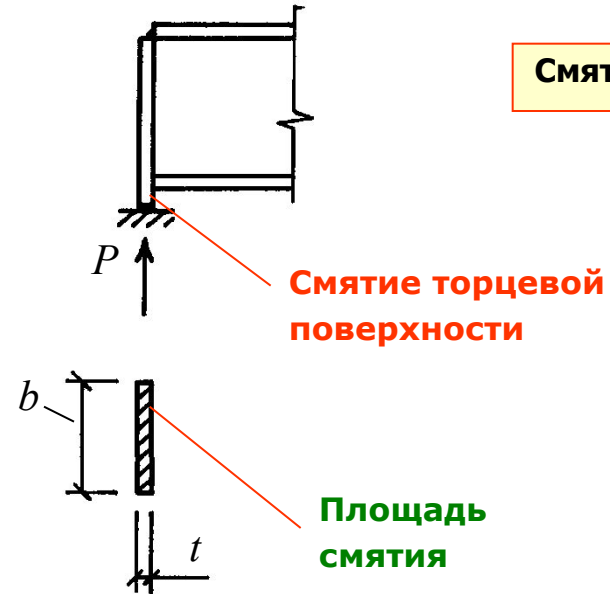


4 Условие  
прочности:

$$\tau = \frac{Q}{ht} \leq R_s \gamma_c;$$

$Q$  – расчётное поперечное усилие, кН;  
 $ht$  – площадь среза, см<sup>2</sup>.

## Смятие



4 Условие  
прочности:

$$\sigma = \frac{P}{bt} \leq R_p \gamma_c;$$

$P$  – расчётное усилие, кН;

$bt$  – площадь смятия, см<sup>2</sup>;

$R_p$  – расчётное сопротивление смятию;  $R_p = R_u$ .

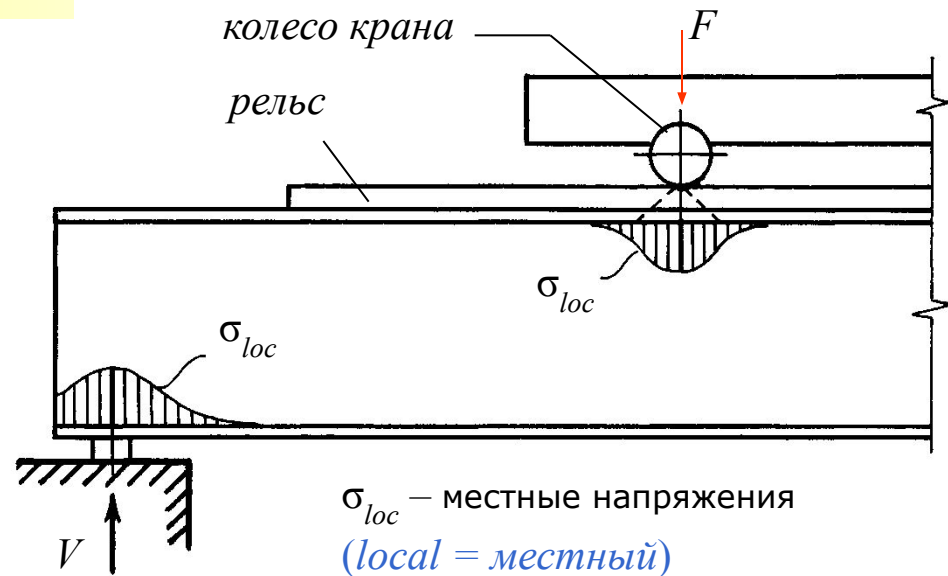
## Местные напряжения в стенках элементов

**Местные напряжения** в стенках балок и колонн возникают в местах приложения значительных сосредоточенных усилий – как активных (внешних нагрузок), так и реактивных (опорных реакций).

Прочность стенок при действии местных напряжений должна быть проверена расчётом.

Расчёт производить не требуется, если стенка в местах приложения сосредоточенной нагрузки укреплена **поперечными рёбрами жёсткости**.

Если балка рассчитывается с учётом развития пластических деформаций, установка поперечных рёбер жёсткости в местах действия сосредоточенных нагрузок является **обязательной** (п. 5.21 СНиП).



# Расчёт на прочность при действии местных напряжений

4 Условие расчёта:

$$\sigma_{loc} = \frac{F}{l_{ef} t_w} \leq R_y \gamma_c;$$

$F$  – расчётное усилие, кН;

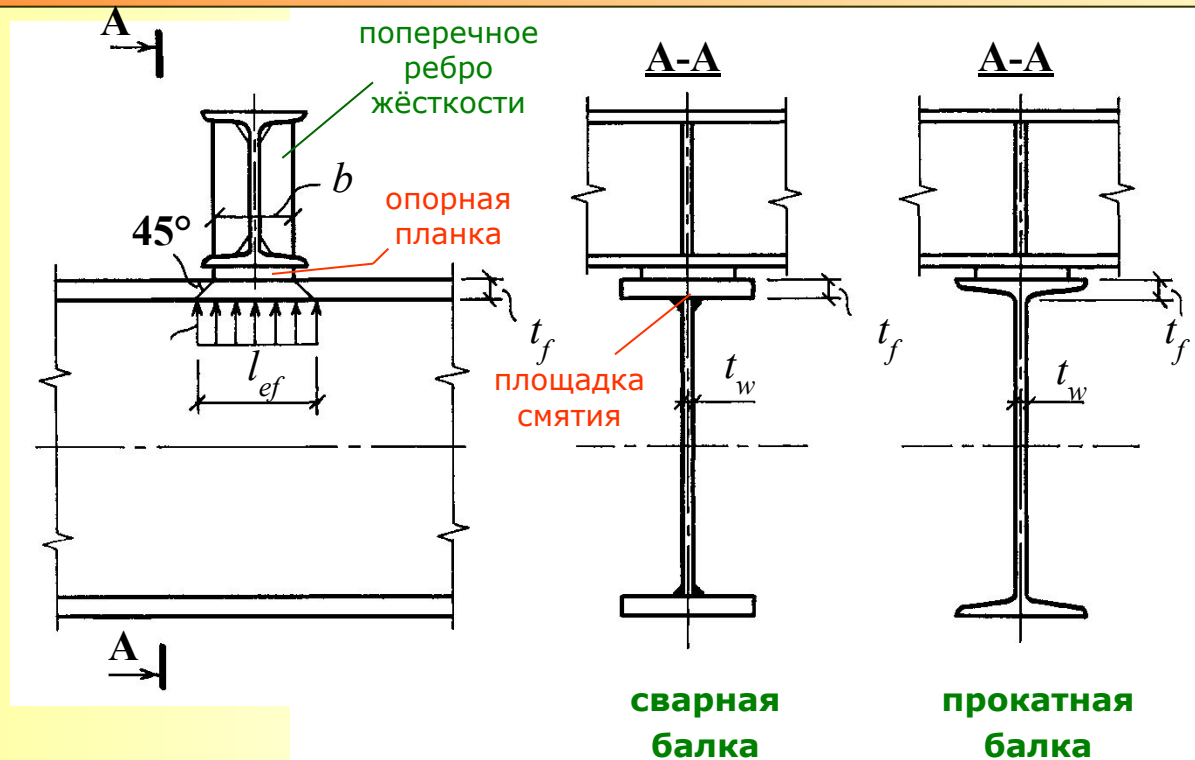
$t$  – толщина стенки, см;

$l_{ef}$  – условная длина  
распределения местных  
напряжений, см:

$$l_{ef} = b + 2t_f;$$

$b$  – ширина опорной пластинки;

$t_f$  – толщина верхнего пояса (в  
сварной балке) или расстояние от  
наружной грани полки до начала  
внутреннего закругления стенки  
(в прокатной балке).

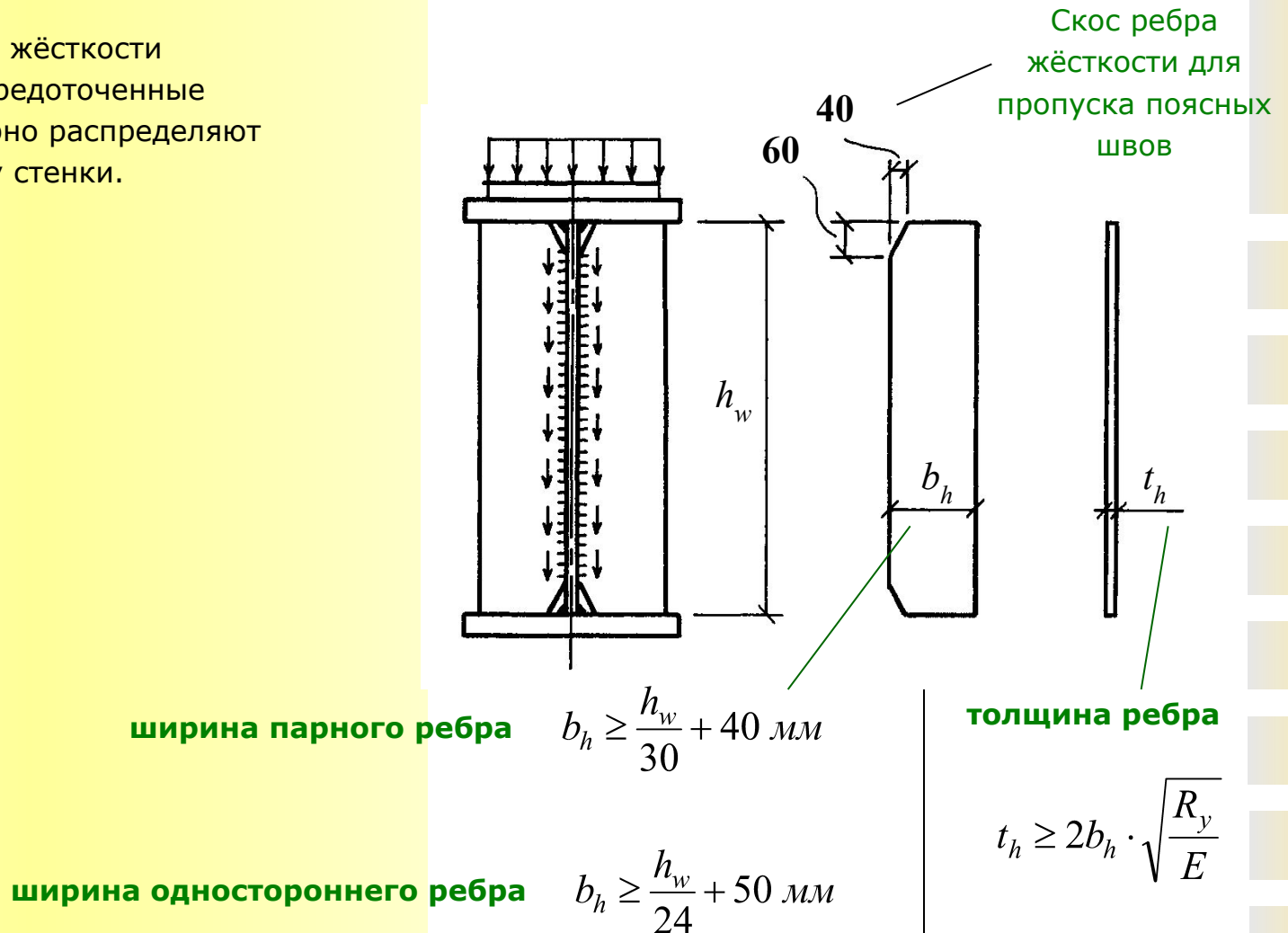


## Способы снижения местных напряжений:

- 4 Установка поперечных рёбер жёсткости;
- 4 Увеличение ширины опорной планки;
- 4 Увеличение толщины стенки [-].

## Конструктивные требования к поперечным рёбрам жёсткости (п. 7.10 СНиП II-23-81\*)

Поперечные рёбра жёсткости воспринимают сосредоточенные усилия и равномерно распределяют их на всю толщину стенки.



# Расчёт на общую устойчивость

- 4 Условие устойчивости при осевом сжатии:

$$\sigma = \frac{N}{A\phi} \leq R_y \gamma_c;$$

$N$  – расчётное продольное усилие, кН;  
 $\phi$  – коэффициент продольного изгиба; определяется по табл. 72\* СНиП II-23-81\* (или по графику □) в зависимости от максимальной гибкости стержня  $\lambda$ :

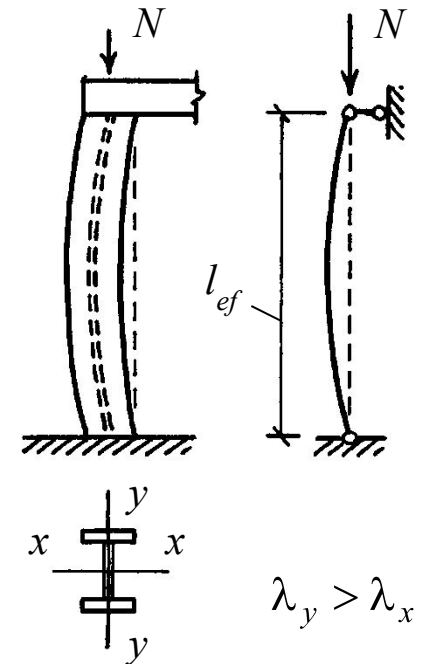
$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i};$$

$l_{ef}$  – расчётная длина стержня, см;  
 $i$  – радиус инерции сечения, см.

**Потеря общей устойчивости** характеризуется изменением первоначальной формы деформирования всей конструкции под действием сжимающей нагрузки.



констр. сх.      расч. сх.



Потеря устойчивости происходит относительно оси с наибольшей гибкостью, при этом стержень искривляется в направлении, перпендикулярном этой оси.

# Расчётная длина сжатого стержня

**Расчётная длина стержня** – это эквивалентная из условия устойчивости длина шарнирно опёртого стержня той же жёсткости.

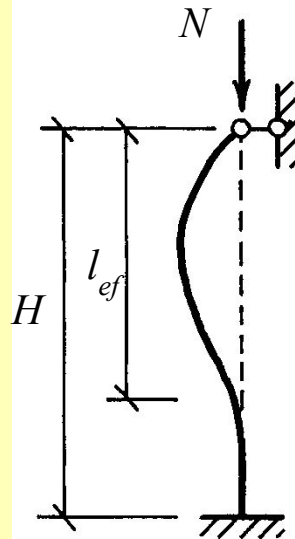
Геометрически расчётная длина определяется как **расстояние между точками перегиба** изогнутой оси стержня.

Методика расчёта стержней на устойчивость с использованием коэффициента расчётной длины была предложена Ф.С. Ясинским в 1894 году.

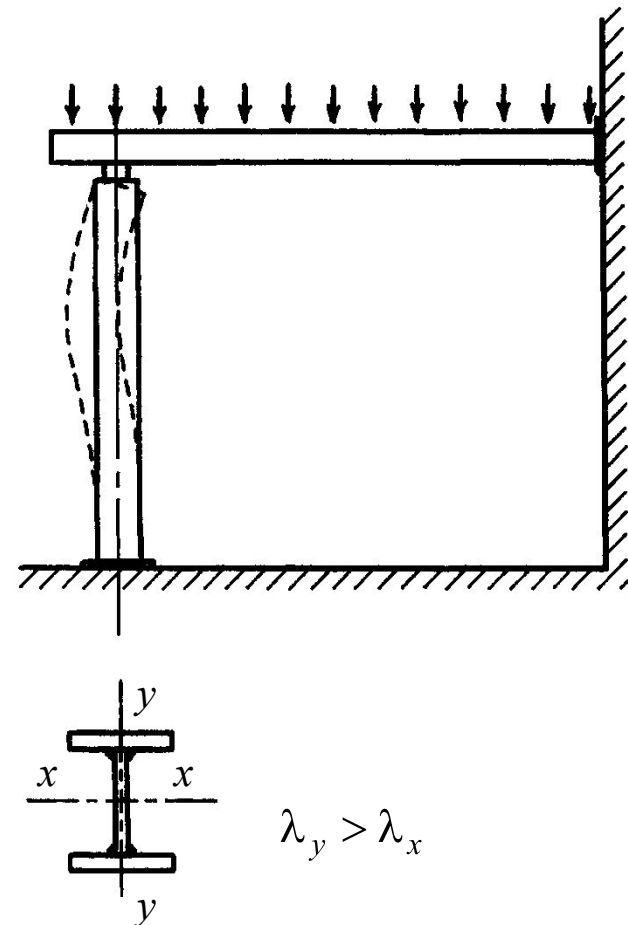
$$l_{ef} = \mu \cdot H$$

$\mu$  - коэффициент расчётной длины.

расч. сх.



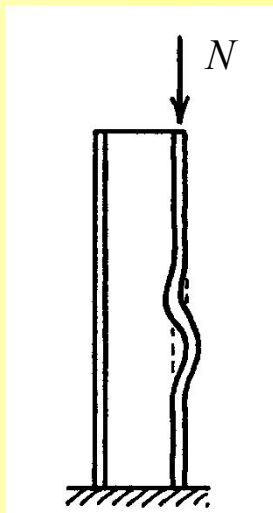
констр. сх.



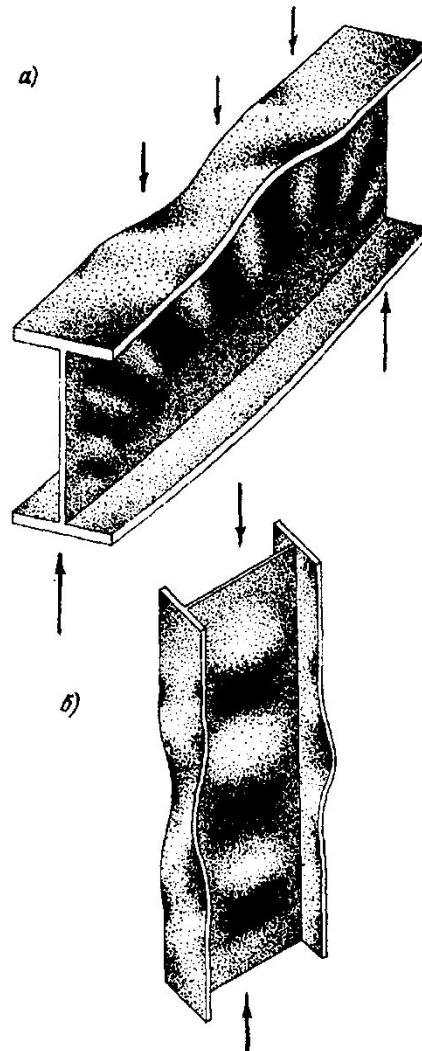


# Обеспечение местной устойчивости

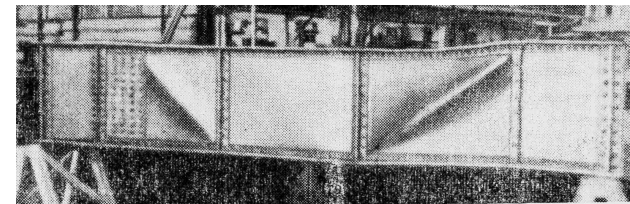
Изменение первоначальной формы отдельного элемента конструкции при сохранении формы всей конструкции называется **потерей местной устойчивости**.



стенка      пояс (полка)



**Балка**



**Колонна**

Местная устойчивость стенки и полок фасонного проката (двутавр, швеллер и пр.) не требует проверки, так как она учтена при разработке сортамента.

# Расчёт на местную устойчивость

## Способы обеспечения местной устойчивости полки:

- 1) Уменьшение  $b_{ef}$
- 2) Увеличение  $t_f$

## Способы обеспечения местной устойчивости стенки:

- 1) Установка поперечных и продольных рёбер жёсткости
- 2) [-] увеличение  $t_w$

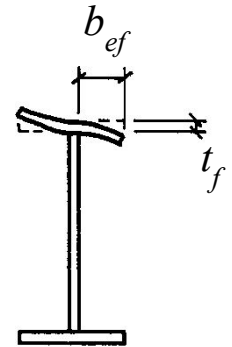
### 4 Общий вид условия обеспечения местной устойчивости полки:

$$\frac{b_{ef}}{t_f} \leq \bar{\lambda}_{uf} \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}} ;$$

$b_{ef}$  – ширина свеса полки, см;

$t_f$  – толщина полки, см;

$\bar{\lambda}_{uf}$  – предельная условная гибкость полки по СНиП II-23-81\*.



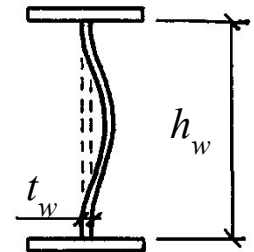
### 4 Общий вид условия обеспечения местной устойчивости стенки:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \bar{\lambda}_{uw} \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}} ;$$

$h_w$  – высота стенки, см;

$t_w$  – толщина стенки, см;

$\bar{\lambda}_{uw}$  – предельная условная гибкость стенки по СНиП II-23-81\*.



Блок 5

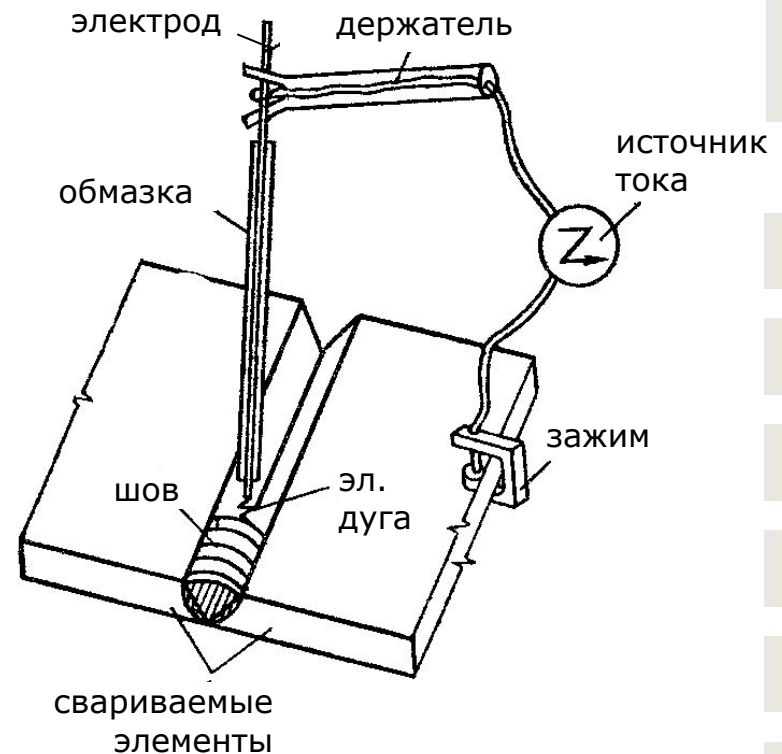
## СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

- Общие сведения о технологии сварки
- Виды сварных швов и соединений
- Стыковые сварные швы. Конструктивные требования и расчёт
- Угловые сварные швы. Конструктивные требования и расчёт
- Дефекты сварных соединений

# Электродуговая сварка

**Электродуговая сварка** основана на возникновении электрической дуги между электродом и свариваемыми деталями.

Дуга создаёт температуру более **1500°C**, что приводит к расплавлению основного металла и металла электрода. В результате в зоне контакта образуется сварной шов.



## Назначение обмазки электрода

При плавлении электрода обмазка создаёт шлаки и газы, защищающие шов от окисления и быстрого охлаждения, улучшающие механические свойства шва и стабилизирующие горение дуги.

# Виды электродуговой сварки

## Ручная

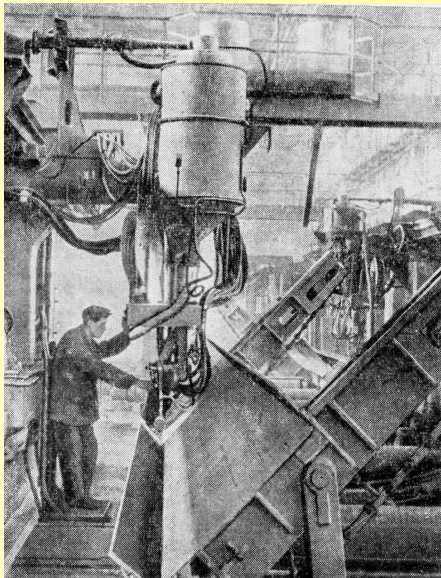
- Наименее качественная;
- Осуществляется электродами с обмазкой;
- Используется для *монтажных* швов.

## Автоматическая

- Наиболее качественная;
- Осуществляется сварочной проволокой без обмазки, защита шва осуществляется слоем сыпучего материала – **флюса** (гранулированного шлака);
- Применяется для *заводских* швов большой длины.

## Полуавтоматическая

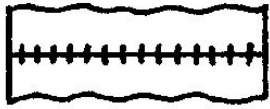
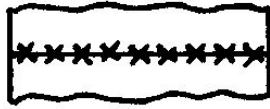
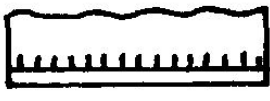
- Подача сварочной проволоки осуществляется автоматически, а перемещение аппарата вдоль шва – вручную;
- Применяется при малой длине шва, а также в местах, недоступных для автоматического сварочного аппарата.



# Виды сварных швов

Выполняются на  
заводе-  
изготовителе

Выполняются на  
строительной  
площадке

|                                                                                                            | Заводские швы                                                                         | Монтажные швы                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Стыковые швы</b><br>  |    |    |
| <b>Угловые швы</b><br> |  |  |

Торцы деталей приставляют  
один к другому встык и  
сваривают

Шов наплавляется в угол,  
образуемый свариваемыми  
элементами

Условные обозначения

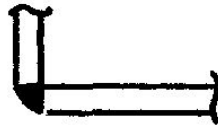


# Виды сварных соединений

Стыковое



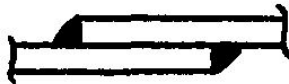
Угловое



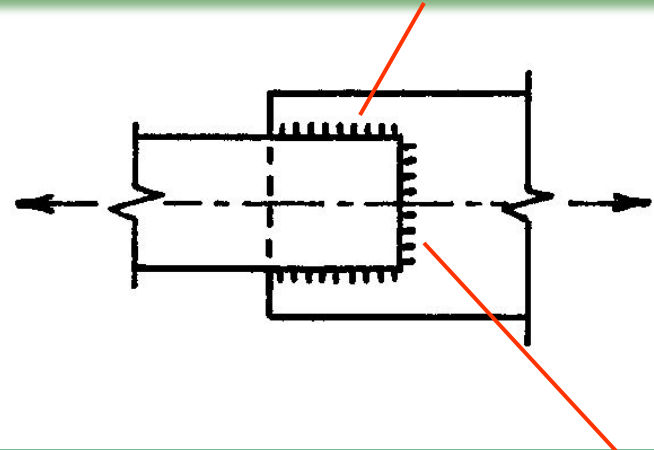
Тавровое



Нахлесточное



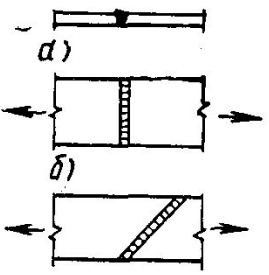
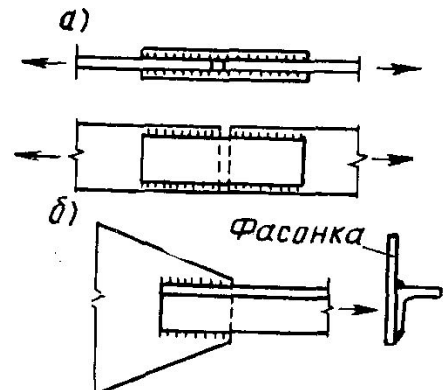
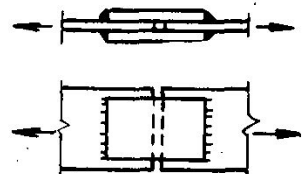
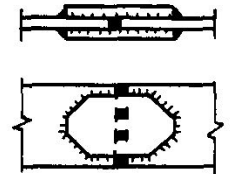
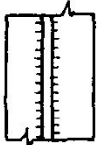
**Фланговые швы** расположены параллельно действующему усилию



**Лобовые швы** расположены перпендикулярно действующему усилию

# Виды сварных соединений

Вид сварных соединений

| Стыковые швы                                                                                              | Соединение внахлестку                                                                                                  |                                                                                                      | Комбинированные швы (фланговый, лобовой, стыковой)                                                    | Угловые швы впритык                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                           | фланговые швы                                                                                                          | лобовые швы                                                                                          |                                                                                                       | в тавр                                                                                                                                                                   | в угол                                                                                                                                                                   |
|  <p>а)<br/>б)<br/>в)</p> |  <p>а)<br/>б)<br/>в)<br/>Фасонка</p> |  <p>а)<br/>б)</p> |  <p>а)<br/>б)</p> |   |   |

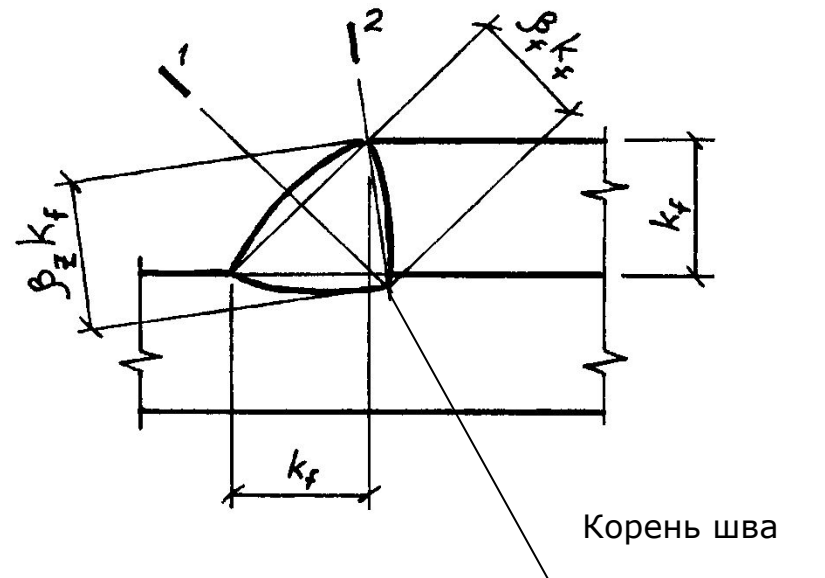
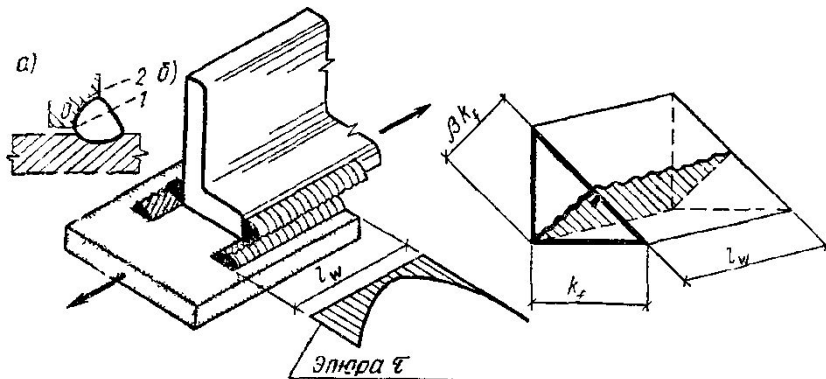
# Расчёт угловых швов

Угловые швы рассчитываются **на срез**.

Предполагается, что разрушение шва может произойти по одному из двух сечений:

**1 – по металлу шва;**

**2 – по металлу границы сплавления сварного шва с основным металлом.**



$k_f$  - катет шва;

$\beta_f, \beta_z$  - коэффициенты глубины проплавления шва;

при ручной сварке  $\beta_f = 0,7$ ;  $\beta_z = 1,0$   
(табл. 34\* СНиП II-23-81\*).

# Расчёт угловых швов

Условия расчёта:

**1 – по металлу шва:**

$$\tau_f = \frac{N}{A_f} = \frac{N}{n \beta_f k_f l_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c;$$

**2 – по металлу границы сплавления:**

$$\tau_z = \frac{N}{A_z} = \frac{N}{n \beta_z k_f l_w} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c;$$

**n** – число швов;

**R<sub>wf</sub>, R<sub>wz</sub>** – расчётные сопротивления; **R<sub>wf</sub>** – по табл. 56 СНиП; **R<sub>wz</sub> = 0,45 R<sub>un</sub>**;

**Y<sub>wf</sub>, Y<sub>wz</sub>** – коэффициенты условий работы сварного соединения при низких температурах (обычно равны 1,00);

**l<sub>w</sub>** – расчётная длина шва, принимается меньше фактической на 1 см из-за снижения качества сварки на концах шва.

## Выбор типа электродов

Прочность шва должна  
несколько превышать  
прочность основного металла

Фрагмент табл. 55\* и 56 СНиП II-23-81\*

| Марка стали          | Тип электрода | Расчётное<br>сопротивление<br>металла шва<br>$R_{wf}$ МПа |
|----------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|
| C245<br>C255<br>C275 | Э42           | 180                                                       |
| C345<br>C <u>375</u> | Э <u>50</u>   | 215                                                       |

Нормативное сопротивление **375 МПа (38 кг/мм<sup>2</sup>)**

Нормативное сопротивление **490 МПа (50 кг/мм<sup>2</sup>)**

# Конструктивные требования к угловым швам

## Минимальная расчётная длина шва:

$$l_w \leq 4k_f; \quad l_w \geq 40 \text{ мм}$$

## Максимальная расчётная длина фланговых швов:

$$l_w \leq 85\beta k_f$$

(так как усилия по длине фланговых швов распределены неравномерно)

## Минимальный катет шва $k_{f,\min}$

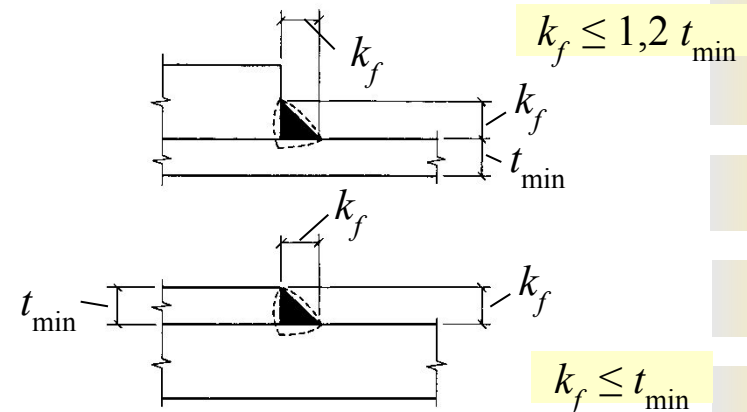
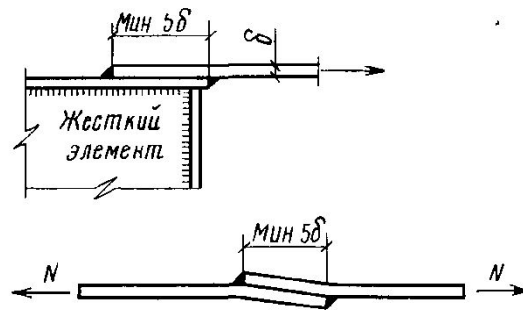
определяется по табл. 38\* СНиП в зависимости от наибольшей толщины соединяемых элементов  $t_{\max}$

## Максимальный катет шва:

$$k_{f,\max} = 1,2 t_{\min},$$

$t_{\min}$  – наименьшая из толщин соединяемых элементов

Из двух швов с одинаковой несущей способностью более экономичным является шов с меньшим катетом и большей длиной.





## Расчёт стыковых швов

Если для сварки выбраны электроды в соответствии с требованиями СНиП, то стыковые швы принимаются:

- **при сжатии** – равнопрочными основному металлу (расчётное сопротивление шва  $R_{wy} = R_y$ ) и не рассчитываются;
- **при растяжении** – имеющими прочность, на 15% меньшую прочности основного металла ( $R_{wy} = 0,85 R_y$ ).

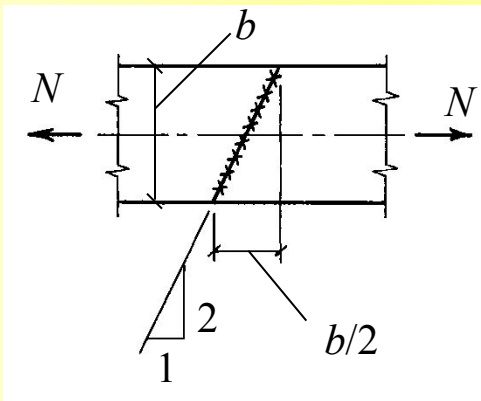
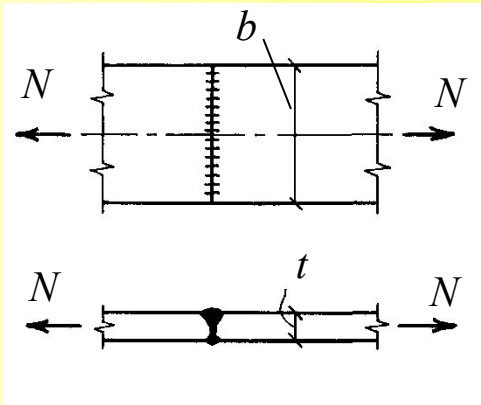
Условие расчёта:

$$\sigma = \frac{N}{A_w} = \frac{N}{l_w t} \leq R_{wy} \gamma_c;$$

$l_w$  – расчётная длина шва; при выводе концов шва на технологические планки  $l_w = b$ , иначе  $l_w = b - 2t$ .

**Швы можно не рассчитывать, если**

- осуществляется контроль их качества физическими методами (например, ультразвуковым) – для **заводских** швов;
- шов выполняется с уклоном не менее 2:1, что увеличивает его расчётную длину – для **монтажных** швов.



# Конструктивные требования к стыковым швам

**Вывод концов шва на технологические планки**

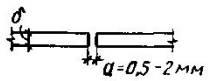
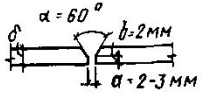
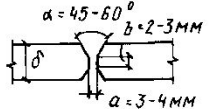
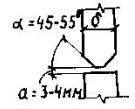
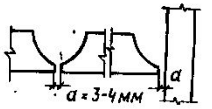
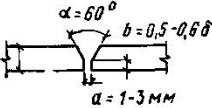
(для заводских швов)

**Подварка корня шва**

(для монтажных швов)

**Обработка кромок шва**

Классификация швов по типу обработки кромок

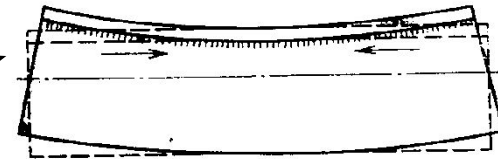
| Наименование шва по типу обработки кромок | Эскиз обработки кромок                                                                | Применяется при толщине $\delta$ в мм |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Без обработки                             |    | До 8—10                               |
| V-образный                                |    | 10—20                                 |
| X-образный                                |    | Больше 20                             |
| К-образный                                |    | То же                                 |
| U-образный                                |  | >                                     |
| V-образный при автоматической сварке¹     |  | Больше 16                             |

Обозначения:  $a$  — зазор;  $b$  — притупление;  $\alpha$  — угол раскрытия шва.

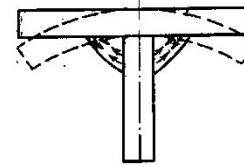
# Сварочные деформации

## Продольная усадка угловых швов

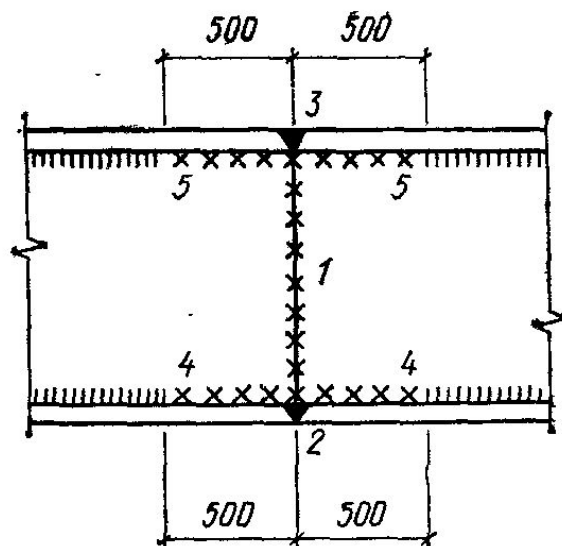
(или почему невозможно изготовить сварной профиль таврового сечения)



## Поперечная усадка угловых швов



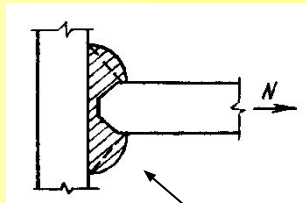
## Поперечная усадка стыковых швов



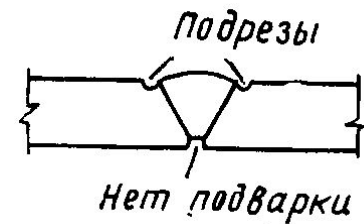
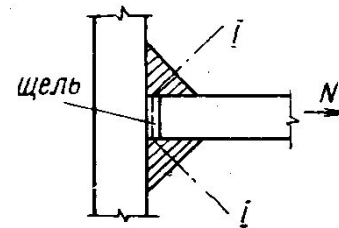
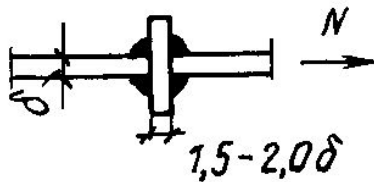
## Последовательность сварки монтажного стыка

# Дефекты сварных швов

## Дефекты из-за необработанной кромки угловых швов



Обработка кромок



## Дефекты стыковых швов

Применение растянутого стыка через поперечную прокладку не рекомендуется

(в сжатых стыках это возможно)

Блок 6

## БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

- Виды болтов и болтовых соединений
- Классы точности болтов
- Классы прочности болтов
- Расчёт болтовых соединений на срез и смятие
- Расчёт соединений на высокопрочных болтах
- Конструктивные требования к размещению болтов

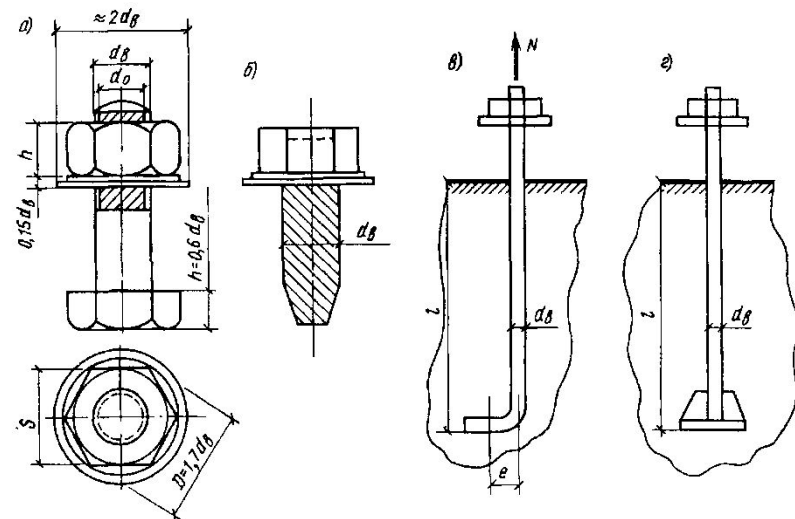
## Общие соображения

Болтовые соединения, в отличие от сварных, имеют более простую технологию выполнения и поэтому широко применяются при монтаже. Монтажные болты устанавливаются примерно в 2 раза быстрее, чем производится сварка. Болтовое соединение является разъёмным.

Однако болтовые соединения по сравнению со сварными являются более металлоёмкими и весьма деформативными. Последний недостаток устраняется применением фрикционных соединений на высокопрочных болтах.

В строительстве применяются:

- 4 Обычные болты с гайкой и шайбой;
- 4 Фундаментные (анкерные) болты;
- 4 Самонарезающие болты.



Виды болтов

*а — болт с шайбой (1) и гайкой (2); б — самонарезающий болт; в — фундаментные болты; тип 1 при  $d_b$  36 мм, тип 2 при  $d_b$  30 мм*



# Условные обозначения

## Условные обозначения



Постоянные болты в заводских и монтажных соединениях



Временные болты в монтажных соединениях



Высокопрочные болты

## Классы точности болтов

В зависимости от требований к точности диаметра болтов различают три **класса точности** (А, В, С):

| Класс точности болтов | Характеристика            | Допуск на отклонение диаметра болта от номинального |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>А</b>              | Болты повышенной точности | – 0,3 мм                                            |
| <b>В</b>              | Болты нормальной точности | ± 0,52 мм                                           |
| <b>С</b>              | Болты грубой точности     | ± 1,0 мм                                            |

В зависимости от требований к точности диаметра отверстий различают «чистые» и «чёрные» болты:

- 4 в соединениях на болтах классов точности **В** и **С** диаметр отверстия превышает диаметр болта на **2...3 мм** (в отдельных случаях – на 3...5 мм), что позволяет просверливать отверстия в каждой детали в отдельности – это **«чёрные» болты**;
- 4 в соединениях на болтах класса точности **А** диаметр отверстия не должен превышать диаметр болта более чем на **0,3 мм** (такие отверстия получают, например, сверлением их на проектный диаметр в собранных элементах) – это **«чистые» болты**; раньше они использовались в особо ответственных соединениях, а сейчас из-за трудоёмкости установки их применяют редко, более эффективными являются высокопрочные болты.

# Классы прочности болтов

В зависимости от прочностных характеристик болты делят на **классы прочности**:

| Характеристика          | Болты обычной прочности      | Высокопрочные болты |
|-------------------------|------------------------------|---------------------|
| Применяемая сталь       | малоуглеродистая             | низколегированная   |
| Классы прочности болтов | 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; 6.6; 8.8 | 10.9; 12.9          |

(классы прочности записываются через точку)

5.8

↑  
первое число, умноженное на 100, равно временному сопротивлению, МПа;  
произведение чисел, умноженное на 10, равно пределу текучести, МПа.

Наиболее широко применяют болты классов прочности **5.8** и **5.6** диаметром **16, 20, 24 мм**.

# Виды болтовых соединений

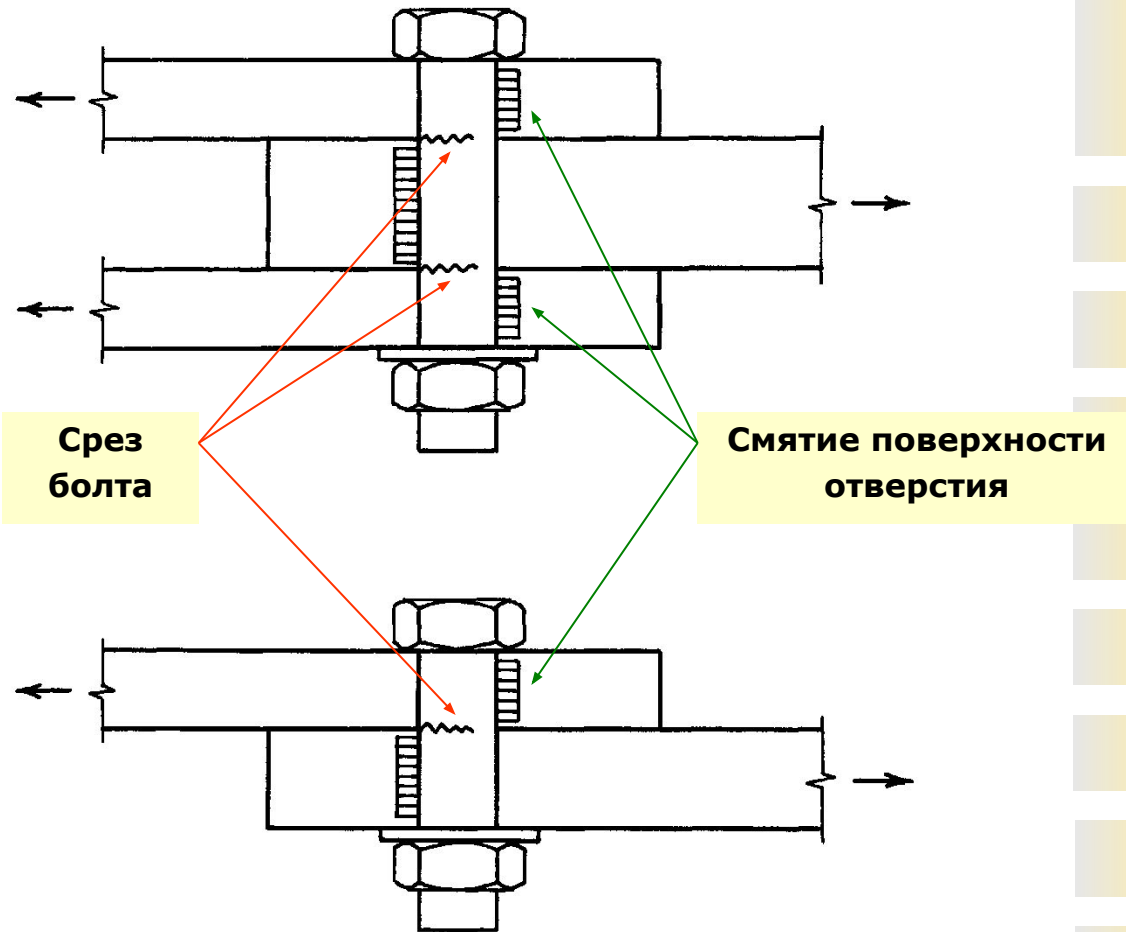
Наиболее широкое распространение получили следующие **виды болтовых соединений**:

- **Срезные соединения** - воспринимают внешние усилия вследствие сопротивления болтов срезу и соединяемых элементов смятию, вследствие чего обладают повышенной деформативностью.
- **Фрикционные соединения** (сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах) - воспринимают внешние усилия вследствие сопротивления сил трения, возникающих по контактными плоскостям соединяемых элементов от предварительного натяжения болтов. Усилия натяжения контролируют, а соединяемые поверхности подвергают обработке.
- **Фрикционно-срезные соединения** (комбинированные).
- **Фланцевые соединения** - воспринимают внешние усилия вследствие сопротивления болтов растяжению; здесь несущая способность болтов используется наиболее полно.

# Работа болтового соединения на срез и смятие

Двухсрезное соединение

Односрезное соединение



## Расчёт болтового соединения на срез и смятие

- 4 Расчётное усилие, воспринимаемое одним болтом при его работе **на срез**:

$$N_{b,s} = R_{bs} \gamma_b A_b n_s;$$

$R_{bs}$  – расчётное сопротивление болта срезу (по табл. 58\* СНиП);

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы болтового соединения (по табл. 35\* СНиП); неравномерность работы многоболтового соединения учитывается коэффициентом  $\gamma_b = 0,9$ ;

$A_b$  – площадь сечения болта (по табл. 62\* СНиП);

$n_s$  – расчётное число срезов болта.

- 4 Расчётное усилие, воспринимаемое одним болтом при работе поверхности отверстия **на смятие**:

$$N_{b,p} = R_{bp} \gamma_b d_b (\sum t_{\min});$$

$R_{bp}$  – расчётное сопротивление смятию соединяемых элементов (по табл. 59\* СНиП);

$d_b$  – диаметр болта;

$\sum t_{\min}$  – наименьшая суммарная толщина элементов, сминаемых в одном направлении.

- 4 Необходимое число болтов в соединении :

где  $N_{b,\min} = \min \{N_{b,s}; N_{b,p}\}.$

$$n \geq \frac{N}{N_{b,\min} \gamma_c};$$

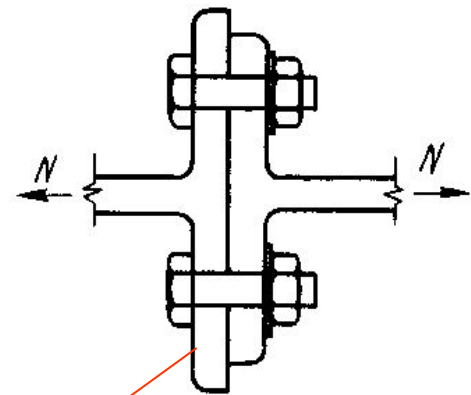
## Расчёт болтового соединения на растяжение

- 4 Расчётное усилие, воспринимаемое одним болтом при его работе **на растяжение**:

$R_{bt}$  – расчётное сопротивление болта растяжению (по табл. 58\* СНиП);

$A_{bn}$  – площадь сечения нетто болта (по табл. 62\* СНиП).

$$N_{b,t} = R_{bt} A_{bn};$$



Фланец



## Расчёт фрикционного соединения на высокопрочных болтах

- 4 Расчётное усилие, воспринимаемое одной поверхностью трения соединяемых элементов:

$$Q_{bh} = \frac{R_{bh} \gamma_b A_{bn} \mu}{\gamma_h};$$

$R_{bh}$  – расчётное сопротивление высокопрочного болта растяжению;  $R_{bh} = 0,7 R_{bun}$  ( $R_{bun}$  – наименьшее временное сопротивление разрыву, определяется по табл. 61\* СНиП);

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы болтового соединения, зависящий от количества болтов (п. 11.13\* СНиП);

$A_{bn}$  – площадь сечения нетто болта (по табл. 62\* СНиП);

$\mu$  – коэффициент трения, зависящий от качества обработки поверхностей (по табл. 36\* СНиП);

$\gamma_h$  – коэффициент надёжности, зависящий от вида нагрузки (статическая или динамическая), разности номинальных диаметров отверстий и болтов (1...6 мм), способа регулирования натяжения.

- 4 Необходимое число болтов в соединении :

$n_f$  – количество поверхностей трения соединяемых элементов.

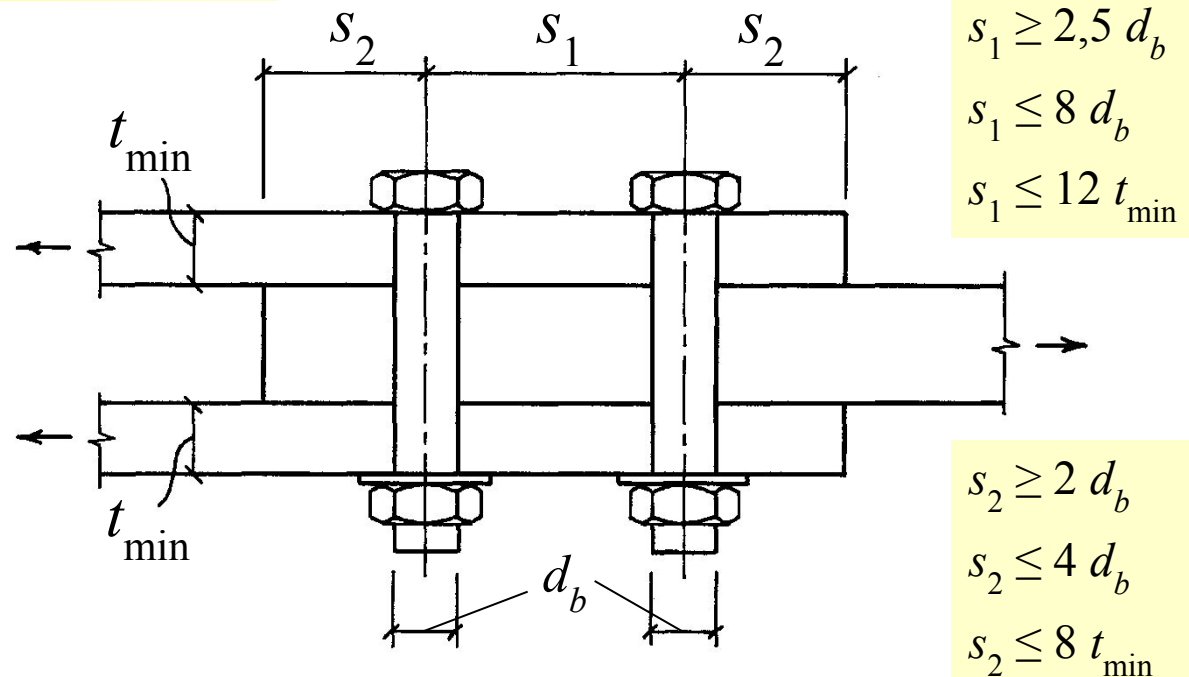
$$n \geq \frac{N}{Q_{bh} n_f \gamma_c};$$

- 4 Контролируемое усилие натяжения болта :

$$P = R_{bh} A_{bh}.$$

# Конструктивные требования к размещению болтов

Размещение болтов осуществляется в соответствии с конструктивными требованиями (табл. 39 СНиП).



**Минимальные расстояния** между центрами отверстий болтов назначаются из условия прочности материала соединяемых элементов.

**Максимальные расстояния** между центрами отверстий болтов назначаются

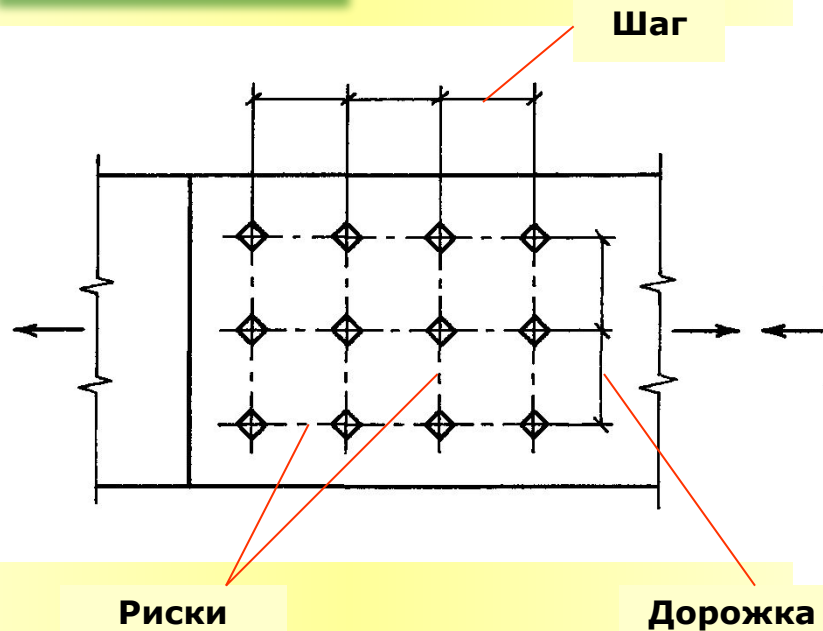
- при сжатии – из условия устойчивости соединяемых элементов на участке между болтами;
- при растяжении – из условия обеспечения плотного соединения элементов во избежание попадания в зазоры влаги и пыли, способствующих коррозии.

# Конструктивные требования к размещению болтов

Болты размещают в рядовом или шахматном порядке.

Линии, проходящие по центрам болтов, называют рисками. Расстояния между рисками вдоль усилия называют шагом, а поперёк – дорожкой.

**Рядовое  
размещение**



**Шахматное  
размещение**

