

Арочные конструкции

Арки применяются в павильонах, крытых рынках, ангарах, спортивных залах и т.п.

По затрате металла арки оказываются значительно выгоднее, чем балочные и рамные системы.

Кроме того, арки просты в изготовлении и монтаже.

Арки относятся к распорным конструкциям, т. е. для них характерно наличие горизонтальной составляющей опорной реакции (распора).

Пролеты арок составляют от 12 до 70 м.

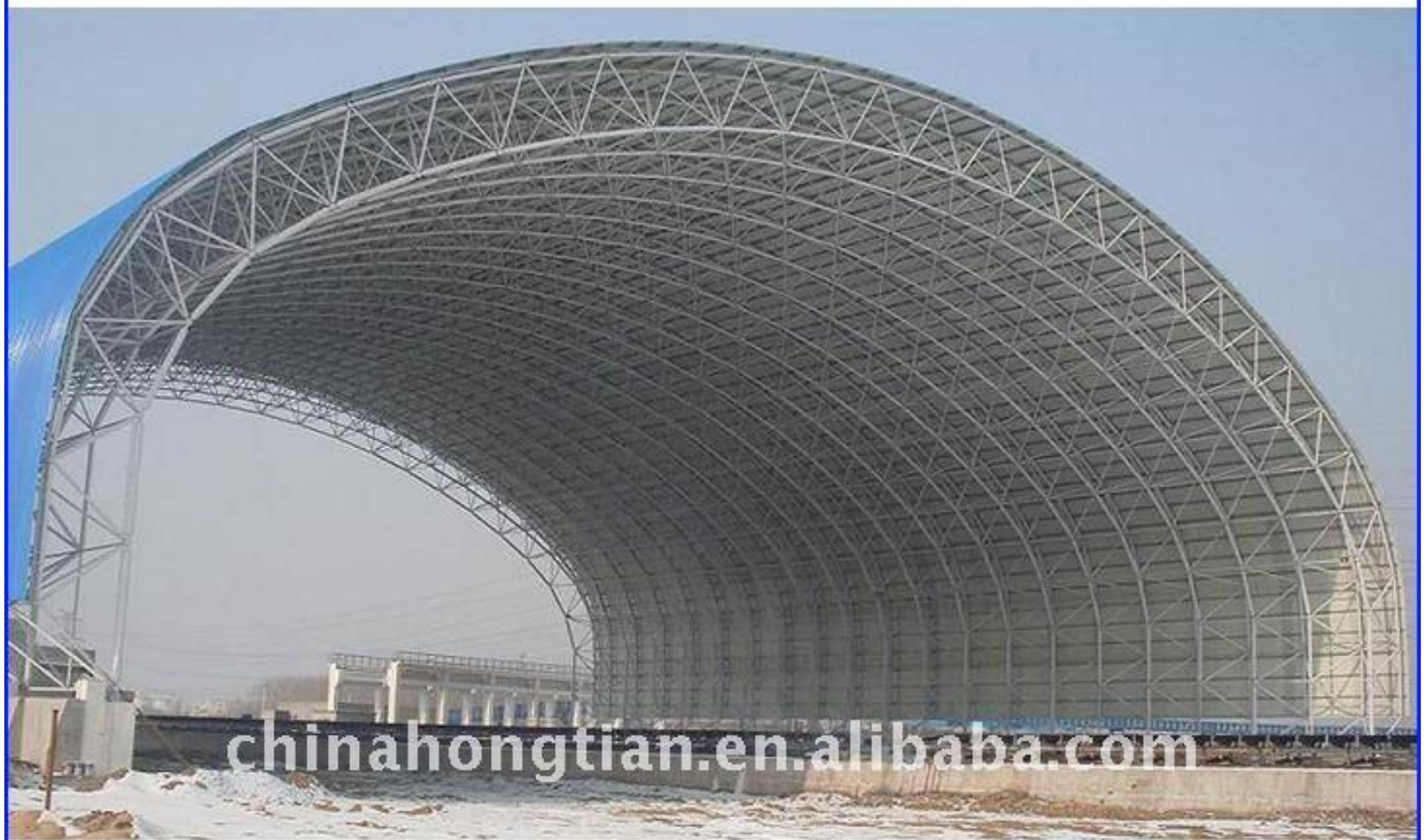
Есть примеры арок пролетом до 100 м и более.





*Ледовый стадион
г. Хабаровск*











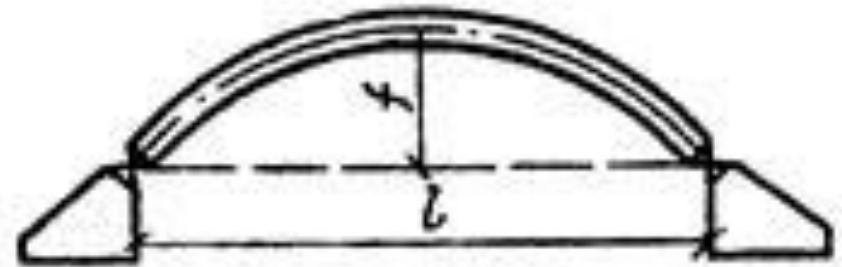






По статической схеме арки разделяют на

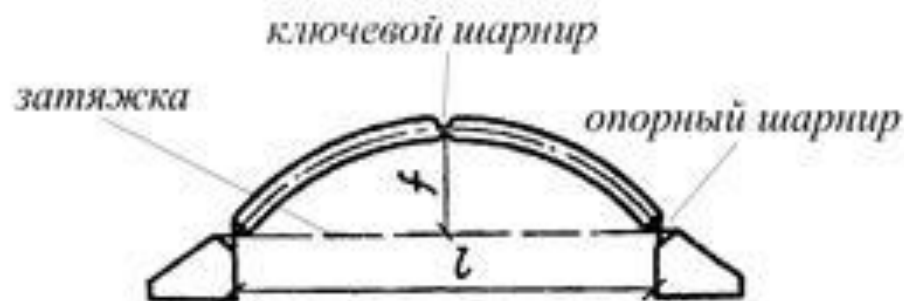
двухшарнирные (без ключевого шарнира)



Двухшарнирные арки один раз статически неопределимы

Двухшарнирные арки могут легко деформироваться вследствие свободного поворота в шарнирах, и, благодаря этому, в них не возникает существенное увеличение напряжений от температурных воздействий и осадок опор.

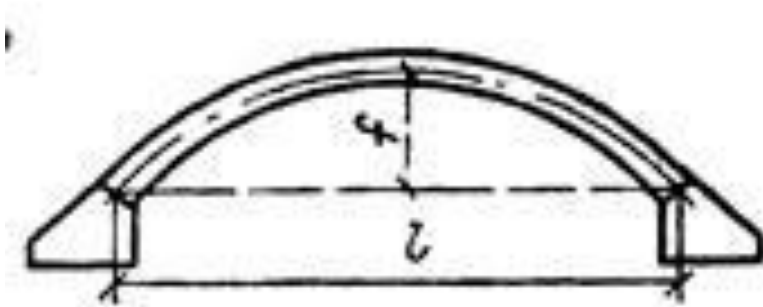
трехшарнирные



Трехшарнирные арки не имеют особых преимуществ по сравнению с двухшарнирными, поскольку их статическая определимость при достаточной деформативности арочных конструкций существенного значения не имеет.

Наличие ключевого шарнира усложняет конструкцию арок и устройство кровельного покрытия.

бесшарнирные



Бесшарнирные арки имеют наиболее благоприятное распределение изгибающих моментов по пролету и поэтому оказываются самыми легкими;

однако они требуют массивных опор и их приходится рассчитывать на температурные воздействия.

По схеме опирания арки делят на

на арки без затяжек (распор передается на опоры)



арки с затяжками



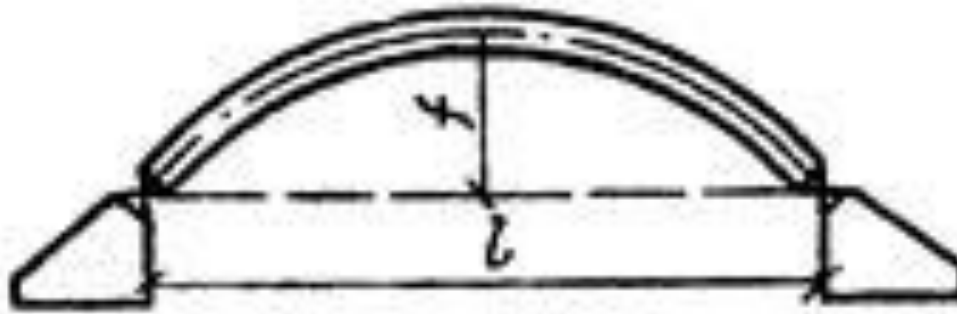
При наличии затяжки опоры воспринимают (в основном) вертикальные нагрузки и поэтому получают более легкими.

Затяжка может одновременно использоваться для устройства подвесного потолка и для создания предварительного напряжения в арках.

По форме оси арки делят на:

- треугольные из прямых полуарок
- пятиугольные
- сегментные, оси полуарок располагаются на общей окружности
- стрельчатые, состоящие из полуарок, оси которых располагаются на двух окружностях, смыкающихся в ключе под углом.
- арки, очерченные по цепной линии

Для высоких арок с большим собственным весом целесообразно принимать очертание по цепной линии (катеноиду).



Генеральными размерами арки являются пролет l и стрела подъема f , а также высота сечения арки h .

Пролет и стрела подъема обычно определяются технологическими и архитектурными требованиями.

В зависимости от соотношения стрелы подъема f к пролету l арки можно разделить на

- пологие ($f/l < 1/4...1/10$)
- высокие (или подъемистые) ($f/l \approx 1/4...1$).

По материалу арки бывают:

- металлические (стальные)
- деревянные (преимущественно клееные)

Двухшарнирные сплошные арки проектируют чаще всего с параллельными поясами



Высоту сечения сплошных арок назначают в пределах $(1/50 \div 1/80)$ пролета. Возможность применения в арках небольшой высоты сечения объясняется малой величиной изгибающих моментов.

Сплошные арки проектируются сварными с сечением в виде широкополочного двутавра (как и в сплошных рамах), в пологих арках продольные силы велики, поэтому стенку поперечного сечения арки можно назначать большей толщины, чем в раме.

Криволинейное очертание сплошных арок усложняет их изготовление.

Сквозные арки делают обычно с параллельными поясами

или, при большой высоте арки, с переломом наружного пояса, который над опорами имеет вертикальные участки

Около опор пояса арок сближаются и заканчиваются опорным устройством — шарниром.



Высоту сечения сквозных арок назначают в пределах $(1/30 \div 1/60)$ пролета.

Сквозные арки проектируются аналогично легким фермам. Пояса их komponуются из двух уголков или из двух легких швеллеров.

Сквозные арки в целях упрощения изготовления могут иметь ломаное очертание.

В арках применяется также предварительное напряжение или регулирование усилий.

Расчет арок

Расчет арок производится по правилам строительной механики, причем распор пологих двухшарнирных арок при стреле подъема не более $1/4$ пролета разрешается определять в предположении наличия шарнира в ключе.

Расчет арок после сбора нагрузок выполняется в следующем порядке:

- 1) геометрический расчет арки;
- 2) статический расчет;
- 3) подбор сечений и проверка напряжений;
- 4) расчет узлов арки.

Геометрический расчет арки заключается в определении всех размеров, углов и их тригонометрических функций полуарки, необходимых для дальнейших расчетов.

Исходными данными при этом являются пролет l , высота (стрела подъема) f , а в стрельчатых арках также радиус полуарки r или ее высота f .

Снеговую нагрузку на арки определяют по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», при этом ее условно принимают равномерно распределенную по длине пролета покрытия.

При расчете сегментных арок при $f/l \geq 1/8$ нужно учитывать также распределение снеговой нагрузки по треугольным эпюрам.

Стрельчатые арки при определении снеговых нагрузок могут условно считаться треугольными.

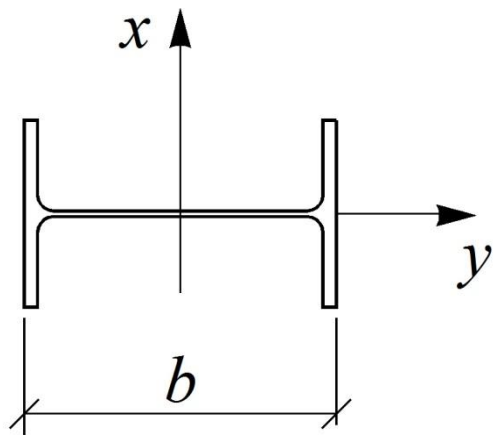
Ветровую нагрузку определяют по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» с учетом шага арок и считают приложенной нормально к поверхности покрытия. При этом для упрощения расчета криволинейные эпюры этой нагрузки можно заменять прямолинейными нормальными к хордам полуарок.

При расчете стрельчатых арок они условно могут считаться треугольными, и нагрузка распределится нормально к хордам полуарок.

Расчет стальных арок сплошного сечения

Для сжато-изгибаемых элементов расчет выполняется по предельным состояниям только первой группы.

1. Расчет на прочность



$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M}{W_x c_x R_y \gamma_c} \leq 1$$

n, c_x – коэффициенты, принимаемые согласно табл. Е.1.

Если не допускать развитие пластических деформаций, то коэффициенты n, c_x можно не учитывать.

2. Расчет на устойчивость в плоскости действия момента

$$\frac{N}{A\varphi_e R_y \gamma_c} \leq 1$$

φ_e – коэффициент устойчивости при сжатии с изгибом
принимается по табл. Д3

$$\varphi_e = f(\bar{\lambda}_x, m_{ef})$$

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad \lambda_x = \frac{l_{x,ef}}{i_x}$$

$l_{x,ef}$ – расчетная длина в плоскости рамы

Приведенный относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta m$$

$$m = \frac{e}{\rho} = \frac{MA}{NW_x} \quad - \text{относительный эксцентриситет}$$

η – коэффициент влияния формы сечения, принимается по табл. Д2;

Расчетные значения продольной силы N и изгибающего момента M в элементе следует принимать для одного и того же сочетания нагрузок из расчета системы по недеформированной схеме в предположении упругих деформаций стали, при этом для колонны постоянного сечения рамной системы значение изгибающего момента M следует принимать равным наибольшему моменту в пределах длины колонны.

Другие случаи см. п. 9.2.3

3. Расчет на устойчивость из плоскости действия момента

$$\frac{N}{A\varphi c R_y \gamma_c} \leq 1$$

φ – коэффициент продольного изгиба при центральном сжатии, принимается по табл. Д1

$$\varphi = f(\bar{\lambda}_y)$$

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad \lambda_y = \frac{l_{y,ef}}{i_y}$$

c – коэффициент, учитывающий влияние момента на потерю устойчивости в плоскости, перпендикулярной плоскости его действия.

$$c = f(m'), \quad m' = \frac{M'A}{NW_x}$$

M' – максимальный момент
в средней трети длины элемента

Расчет стальных арок сквозных арок

Расчет сжатых элементов

Сечения элементов подбираются из условия устойчивости:

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{R_y \gamma_c \varphi},$$

N – расчетное усилие в стержне;

φ – коэффициент продольного изгиба

R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести

γ_c – коэффициент условий работы конструкции

Проверки сжатых элементов

1) Проверка по предельной гибкости

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} \leq \lambda_u; \quad \lambda_y = \frac{l_y}{i_y} \leq \lambda_u,$$

где λ_x, λ_y – гибкости элементов в плоскости и из плоскости фермы;
 λ_u – предельная гибкость элемента, определяемая
по табл. 32 СП 16.13330-2017.

для элементов пространственных конструкций из одиночных уголков, а также из труб и парных уголков высотой свыше 50 м

$$\lambda_u = 120;$$

для элементов пространственных и структурных конструкций из одиночных уголков с болтовыми соединениями

$$\lambda_u = 240 - 40\alpha;$$

для элементов сварных пространственных и структурных конструкций из одиночных уголков, пространственных и структурных конструкций из труб и парных уголков,

$$\lambda_u = 240 - 40\alpha;$$

$$\alpha = \frac{N}{AR_y \gamma_c \varphi}, \text{ но не менее } 0,5$$

2) Проверка устойчивости

$$\frac{N}{A\varphi R_y \gamma_c} \leq 1$$

где φ принимается для наибольшей гибкости $\lambda_{\max} = \max\{\lambda_x; \lambda_y\}$.

Расчет растянутых элементов

Сечения элементов подбираются из условия прочности:

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{R_y \gamma_c},$$

N – расчетное усилие в стержне;

R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести

γ_c – коэффициент условий работы конструкции

Проверки растянутых элементов

1) Проверка по предельной гибкости

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} \leq \lambda_u; \quad \lambda_y = \frac{l_y}{i_y} \leq \lambda_u,$$

где λ_x, λ_y – гибкости элементов в плоскости и из плоскости фермы

λ_u – предельная гибкость элемента, определяемая
по табл. 33 СП 16.13330-2017

Предельная гибкость для растянутых элементов структур при статической нагрузке

$$\lambda_u = 400$$

2) Проверка прочности

$$\frac{N}{AR_y \gamma_c} \leq 1$$

Расчет слаботнагруженных элементов

Сечения элементов подбираются из условия ограничения гибкости:

$$i_x \geq \frac{l_x}{\lambda_u}; \quad i_y \geq \frac{l_y}{\lambda_u}.$$

Узлы арок

Наиболее сложными конструктивными узлами в арках, так же как и в рамах, являются опорные и ключевые шарниры.

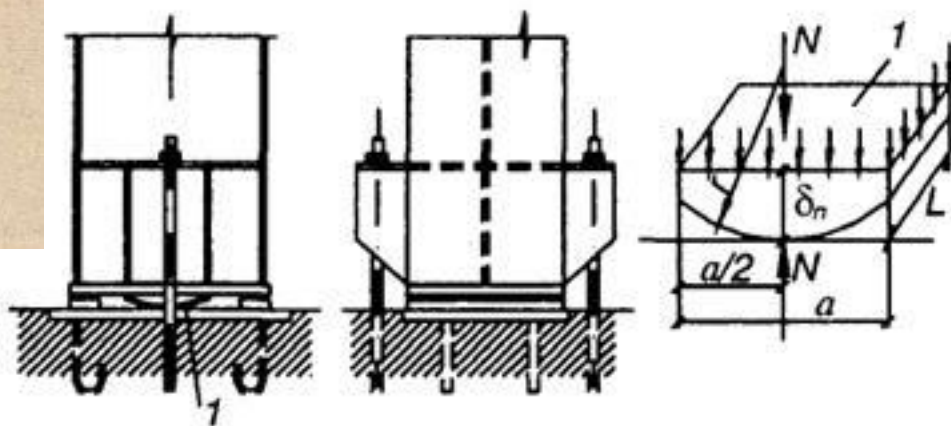
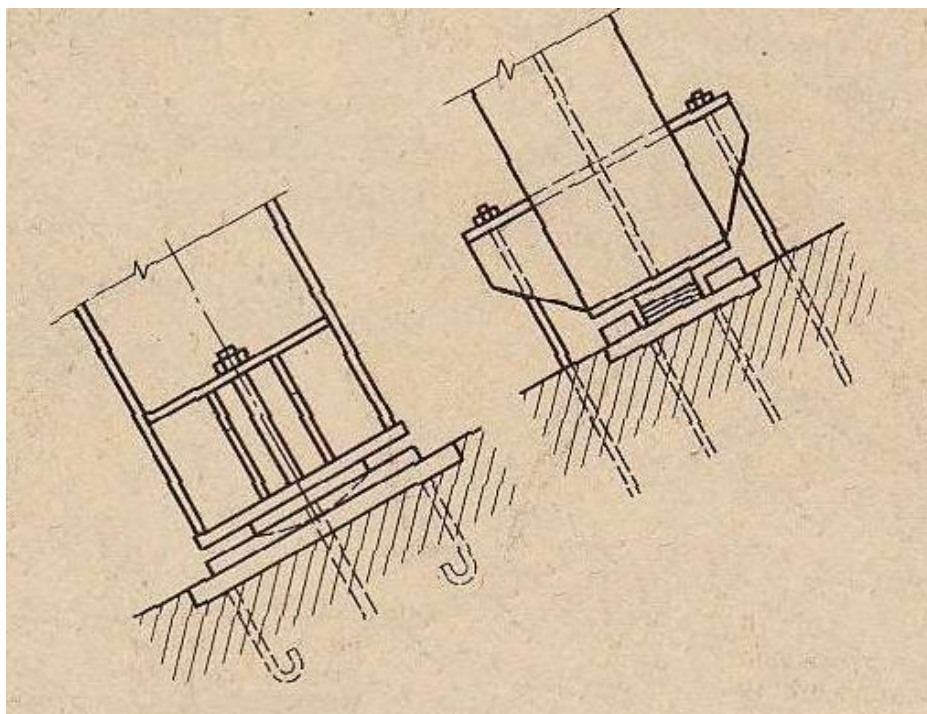
Опорные шарниры могут быть трех типов:

плиточные,
пятниковые,
балансирные.

Для восприятия отрицательных реакций от действия ветра может появиться необходимость крепления легких и высоких арок к опорам анкерными болтами.

Анкерные болты следует располагать по оси арки, чтобы они не мешали свободному повороту конструкции в опорных шарнирах, закрепляют анкера в консолях, приваренных к стенке арки (см. плиточный шарнир).

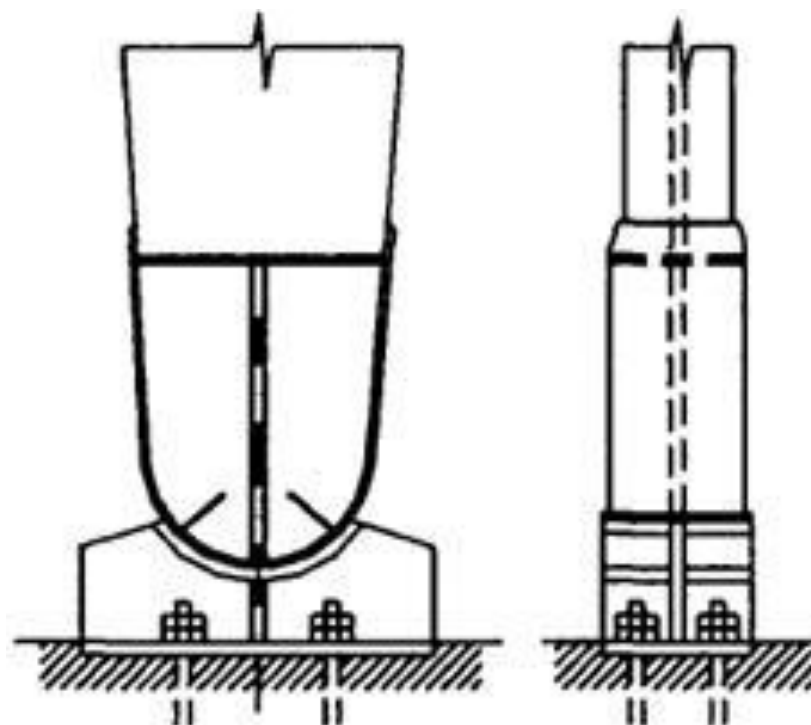
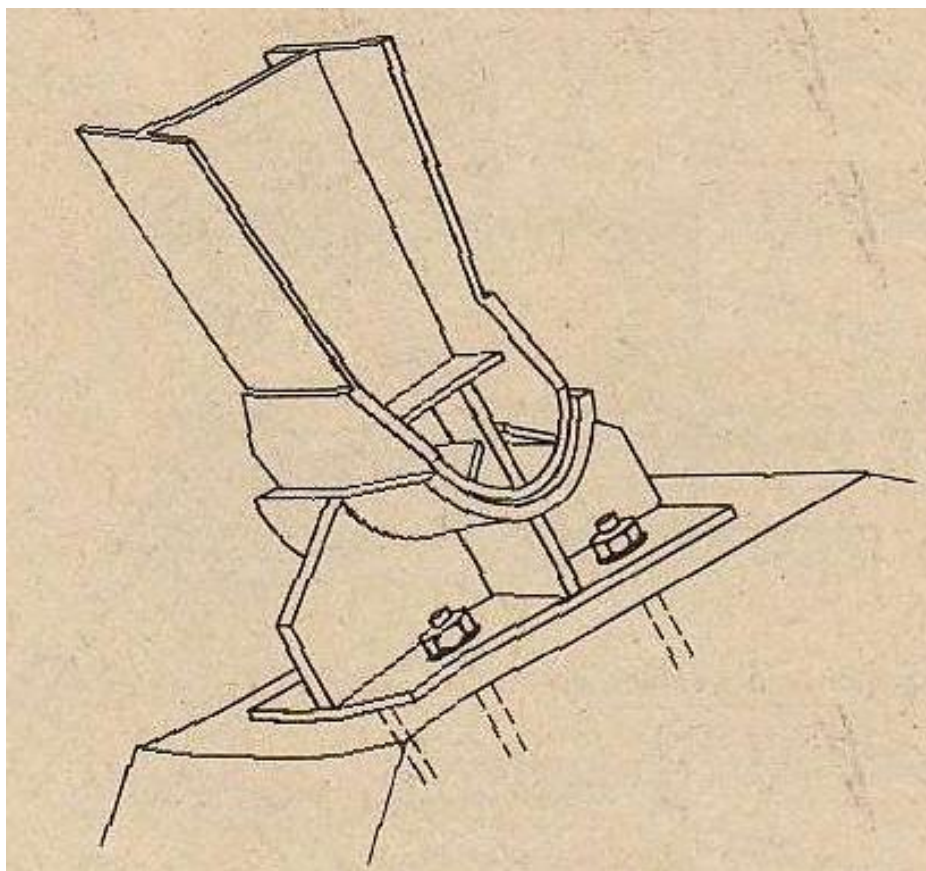
Плиточные шарниры имеют наиболее простую конструкцию. Применяются они при сравнительно небольших опорных давлениях и преимущественно при вертикальном положении примыкающей к шарниру части арки.



Пятниковые шарниры

имеют специальное опорное гнездо — пятник, в который вставляется закругленная опорная часть арки.

Пятник делают литым или сварным из листовой стали.

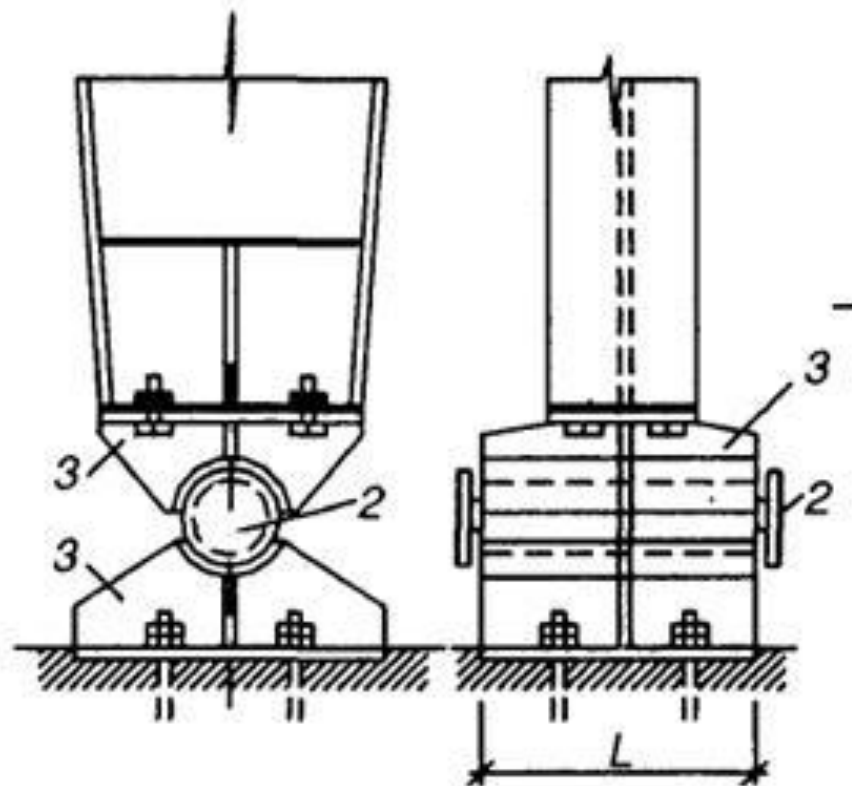
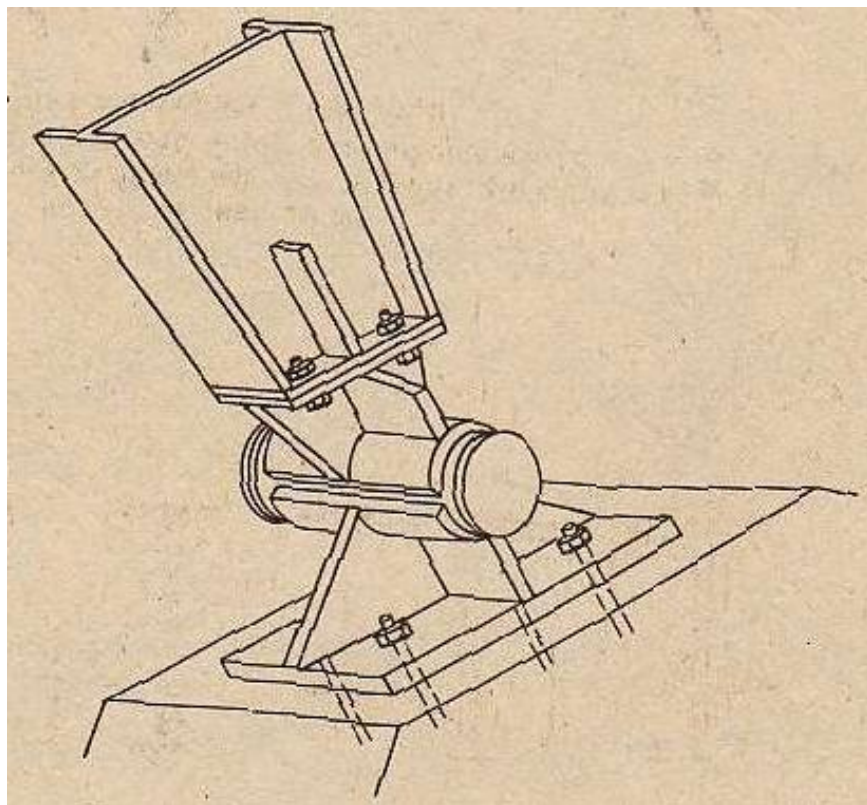


Балансирные шарниры применяют в тяжелых арках.

Конструкция шарнира состоит из верхнего и нижнего балансиров, в гнезда которых укладывают плотно пригнанную цилиндрическую цапфу.

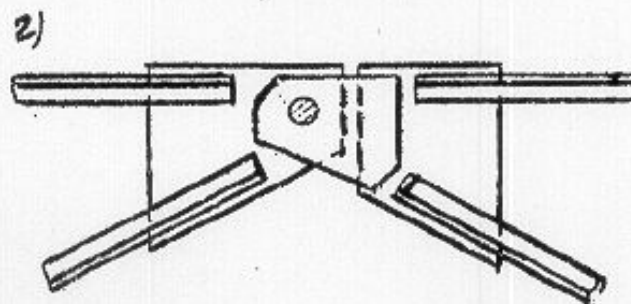
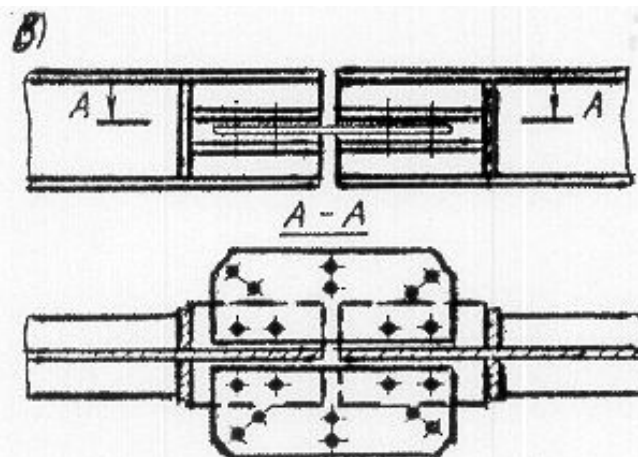
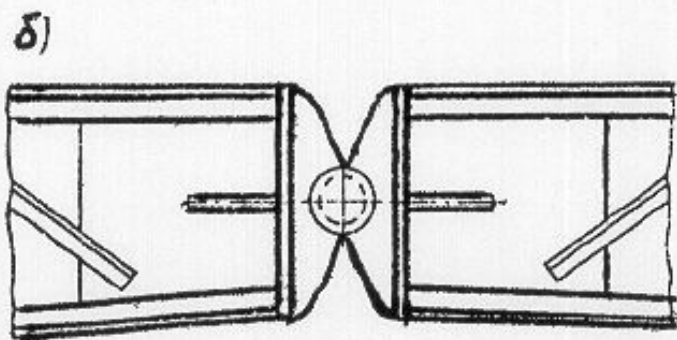
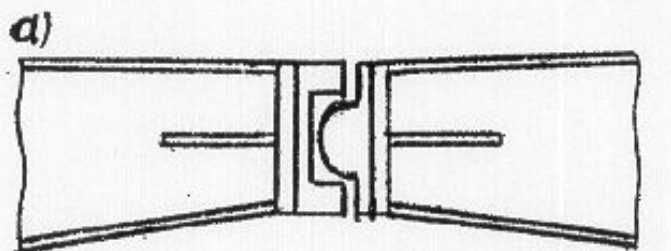
Арку крепят к верхнему балансиру через плиту, которую приваривают к контуру опорного сечения арки и притягивают болтами к балансиру.

Торцы опорных сечений арки обычно фрезеруют.



В ключе арки также могут быть применены плиточные или балансирные шарниры, которые проектируются аналогично опорным.

В ключе легких арок могут применяться листовые или болтовые шарниры.



Деревянные арки

Наиболее широкое применение получили клееные арки заводского изготовления.

Распоры и несущая способность таких арок могут отвечать требованиям сооружения покрытий самого различного назначения, в том числе уникальных по своим размерам.

Дощатоклееные деревянные арки представляют собой пакет склеенных по пласти гнутых досок.

Поперечное сечение клееных арок рекомендуется принимать прямоугольным и постоянным по всей длине.

Высота поперечного сечения назначается от $1/30 \dots 1/50$ пролета.

Толщина слоев для изготовления арок при радиусе кривизны до 15 м принимается не более 4 см.

Расчет деревянных арок

1. Проверка прочности по нормальным напряжениям:

$$\sigma = \frac{N}{F_{\text{расч}}} + \frac{M_{\text{д}}}{W_{\text{расч}}} \leq R_{\text{с}}$$

2. Расчет на устойчивость плоской формы деформирования (из плоскости арки)

$$\frac{N}{\varphi R_{\text{с}} F_{\text{бр}}} + \left(\frac{M_{\text{д}}}{\varphi_M R_{\text{и}} W_{\text{бр}}} \right)^n \leq 1$$

3. Проверка устойчивости в плоскости арки выполняется по формуле

$$\frac{N}{\varphi F_{\text{расч}}} \leq R_{\text{с}}$$

Расчетную длину элемента l_0 следует принимать по СП «Деревянные конструкции» в зависимости от расчетной схемы и схемы загрузки арки

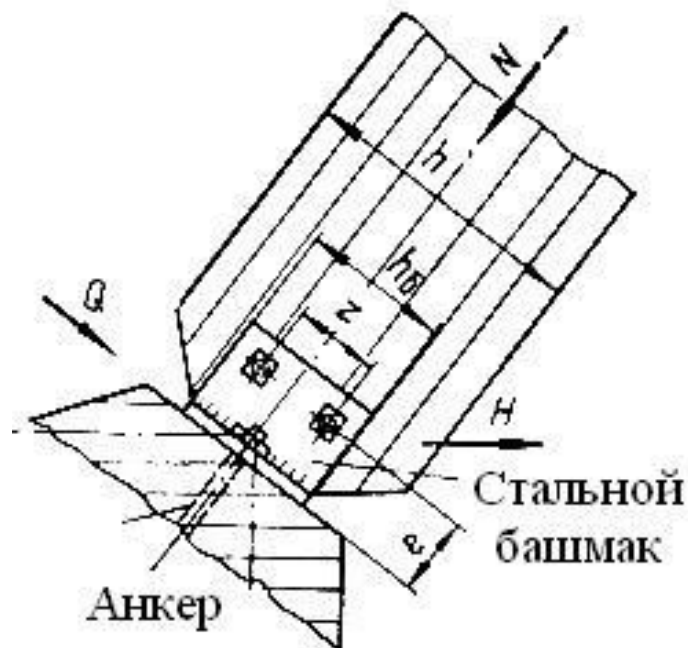
При расчете арки на прочность и устойчивость плоской формы деформирования N и M_d следует принимать в сечении с максимальным моментом ($M_{\max}$), а расчет на устойчивость в плоскости кривизны и определение коэффициента ξ к моменту M_d нужно определять, подставляя значения сжимающей силы N_0 в ключевом сечении арки, т. е. в этом сечении сила имеет наибольшее значение.

Затяжки и подвески арок работают и рассчитываются на растяжение.

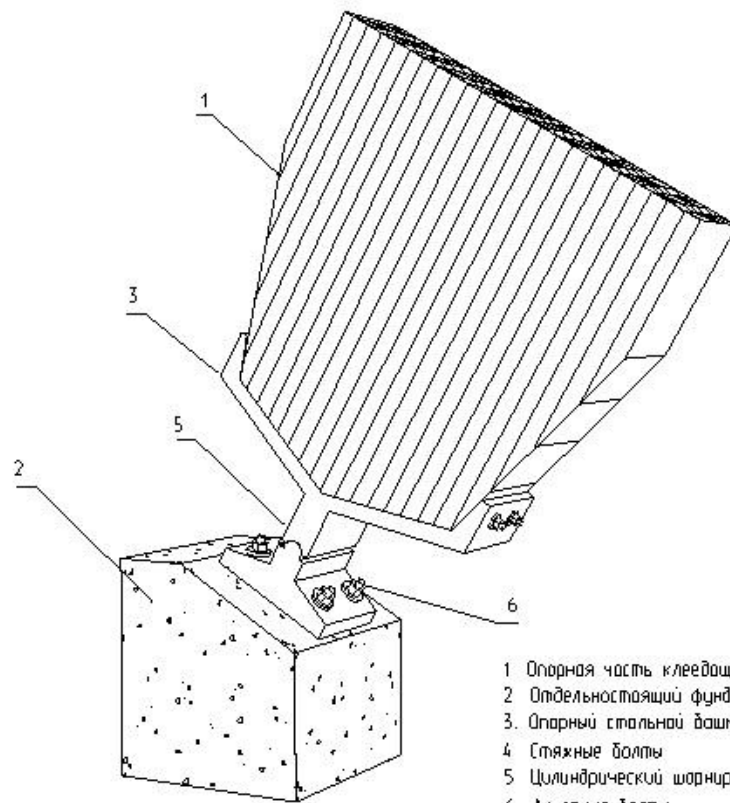
Узлы арок

Опорные узлы арок без затяжек выполняют, как правило, в виде лобовых упоров в сочетании с металлическими башмаками сваркой листовой конструкции, служащими для крепления их к опорам.

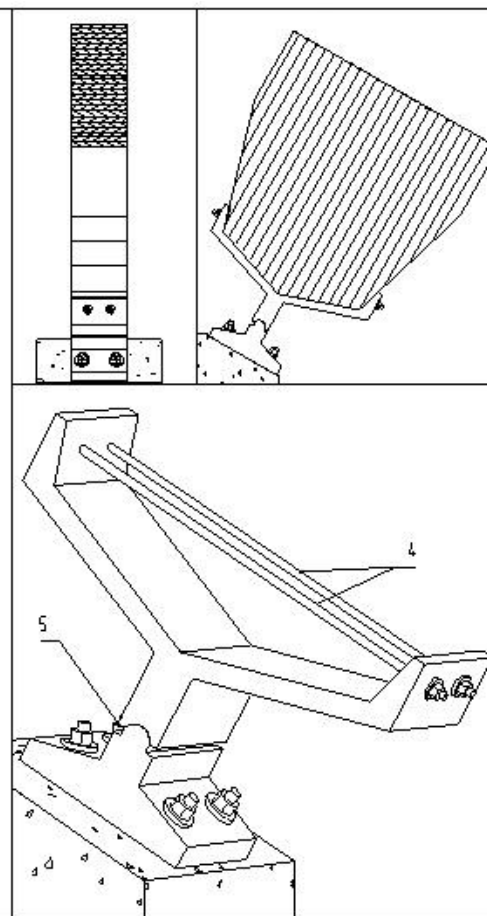
Башмак состоит из опорного листа с отверстиями для анкерных болтов и двух вертикальных фасонок с отверстиями для болтов крепления полуарок.



(Узел применяется для арок среднего и большого пролета)

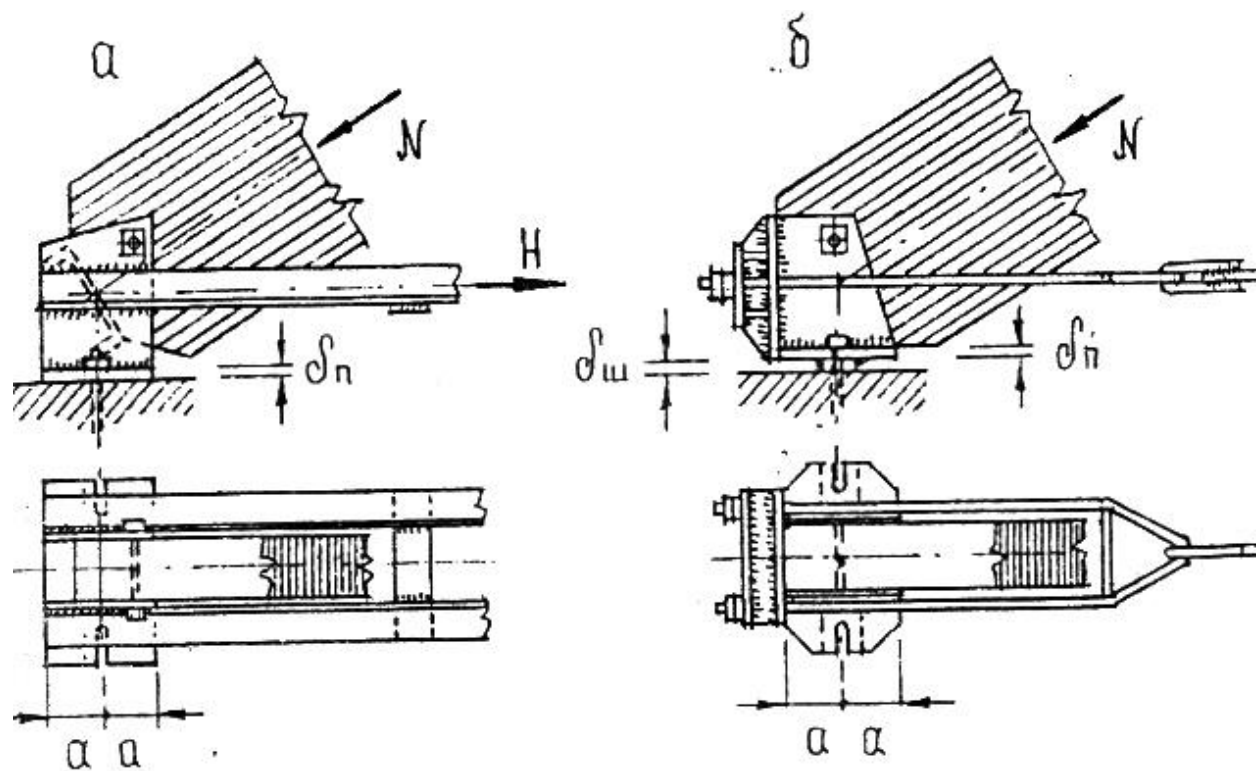


- 1 Опорная часть клеващатой арки
- 2 Отдельностоящий фундамент
- 3 Опорный стальной дашмак
- 4 Стяжные болты
- 5 Цилиндрический шарнир
- 6 Анкерные болты



Опорные узлы арок с затяжками

Опорные узлы клееных арок с затяжками выполняются обычно при помощи лобового упора и сварных металлических башмаков несколько другой конструкции



а - узел с лобовой передачей усилия сжатия N торцом арок; б - узел с отдельным восприятием распора и вертикальной опорной реакции

Коньковые узлы

