

Особенности расчета опорных узлов трёхшарнирных клеодчатых большепролётных арок. Сравнительный анализ конструктивных решений

Кротович А.А.

(Научный руководитель – Згировский А.И.)

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Конструкции и расчет опорных узлов большепролётных арок.

Шарнирные опорные узлы воспринимают продольные и поперечные усилия, возникающие в сечении арок. На рисунке 1 приведены различные варианты опорных узлов большепролётных арок. Продольные усилия N в узле могут передаваться на опору посредством цилиндрической вставки-шарнира (цапфа) как на рис. 1.2 и 1.3 либо непосредственно через площадку смятия как на рис. 1.1. Поперечное усилие Q в узле может восприниматься стальным башмаком (рис. 1.2), либо посредством болтового соединения, как на рис. 1.1 и 1.3, причем болтовые металлические пластины могут быть как внешними (рис. 1.1), так и внутренними (рис. 1.3), в случае, если это целесообразно с точки зрения защиты металла от коррозии. На бетонную опору поперечное усилие Q передаётся через анкерные устройства и различные фиксационные элементы, роль которых могут исполнять металлические пластины, заводимые бетон опоры.

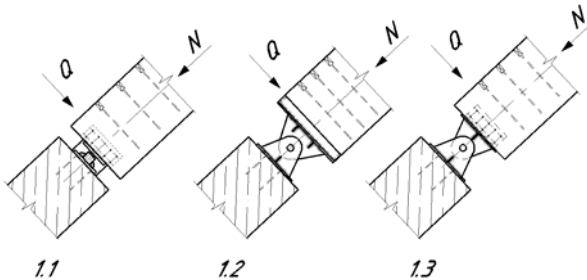


Рисунок 1– Варианты опорного узла: 1.1 – с контактным соединением; 1.2 – с цилиндрическим шарниром и стальным башмаком; 1.3 – с цилиндрическим шарниром и одной внутренней болтовой пластиной.

Марка бетона принимается исходя из прочности на смятие:

$$\sigma_{см} = \frac{N}{2ab} \leq R_{см} * K_N, \quad (1)$$

где $R_{см}$ – расчетное сопротивление древесины смятию вдоль волокон;

K_N – коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений, зависящий от отношения $2a/h$.

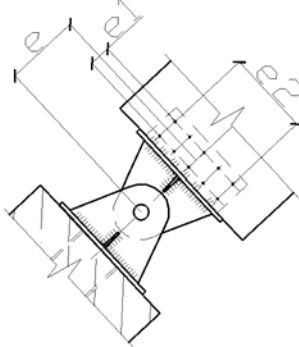


Рисунок 2 – эксцентриситеты в болтовом соединении

Опорный башмак крепится к арке через боковые накладки болтами, воспринимающими поперечную силу и изгибающий момент от неё, равный $Q * e$. Количество болтов определяется, исходя из того, что момент в соединении образован парой сил с плечом $e1$, действующей вдоль рядов, поперёк волокон древесины. Расчетное усилие в каждом болте:

$$Nb = \frac{Qe}{e1 * 2} + \frac{Q}{6}$$

Вдоль волокон болты проверяются на момент от пары сил с плечом $e2$. Усилие в одном болте определим по формуле:

$$Nb = \frac{Qe}{e2 * 3}$$

Болтовое соединении рассчитывается согласно [1]. Расчетную несущую способность одного нагеля на один срез для соединений с одной или двумя внешними пластинами или пластиной посередине следует принимать равной наименьшему значению из условий смятия древесины в нагельном гнезде и изгиба нагеля по формулам, приведённым ниже:

$$R_{1d, \min} = \min \begin{cases} R_{cm1} = fh_{1d} * t_1 * d * k_a \\ R_{cm2} = fh_{2d} * t_2 * d * k_a \\ R_b = f_{nd} * d^2 * (1 + \beta^2 n, \max) * \sqrt{k_a} \\ R_d = R_{1d, \min} * n_n * n_s, \end{cases}$$

где $R_{1d, \min}$ – минимальное значение несущей способности одного среза нагеля в соединении;

n_n – количество нагелей в соединении;

n_s – количество швов в соединении для одного нагеля;

fh_{1d} и fh_{2d} – расчетное сопротивление древесины смятию в глухом нагельном гнезде соответственно для симметричных и несимметричных соединений;

f_{nd} – расчетное сопротивление нагеля изгибу;

t_1 и t_2 – толщина крайних и средних элементов соответственно;

d – диаметр нагеля;

$\beta_{n, \max}$ – коэффициент, зависящий от типа нагеля (табл. 9.4 [1])

k_a – коэф., учитывающий угол α между силой и направлением волокон, принимаемый по табл. 9.5 [1].

Анкерные болты рассчитываются на срез и смятие.

Следует также обратить внимание на то, что в случае, если конструкция будет эксплуатироваться в агрессивных условиях, в целях повышения надёжности соединения не стоит использовать болты с диаметром менее 16 мм.

В случае с опорным узлом как на рис. 1.1 передача усилия на фундамент происходит посредством контактного стыка, который представляет собой металлический брус, поперечное сечение которого определяется из расчета на смятие. Прочность на смятие определяют согласно табл. 1 и 2 источника [2]:

$$R_p = \frac{R_{un}}{\gamma_m}$$

где R_p – сопротивление смятию;

R_{un} – временное сопротивление стали;

γ_m – коэффициент надёжности по материалу.

Прочность проверяется по формуле:

$$\sigma_p = \frac{N}{A} \leq R_p$$

Брус завершается закруглением с радиусом 100...150 мм, а на опорной пластине, выполняется специальное углубление для улучшения контакта. Брус заводится в специальный паз, образованный металлическими листами и, при необходимости, усиленный рёбрами жесткости.

Далее производят расчет толщины оголовка арки. Оголовок представляет собой пластину с размерами в плане $b \times h$. Толщина определяется из условия прочности на изгиб при работе по схеме консольной балки в продольном и поперечном направлениях.

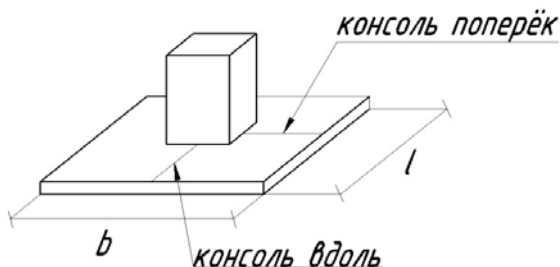


Рисунок 3 – К расчету толщины оголовка арки.

Определяют напряжение по площади оголовка:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Равномерно распределённая нагрузка вдоль оголовка:

$$ql = \sigma * b$$

поперёк:

$$qb = \sigma * l$$

Момент в продольном направлении (размер консоли - u):

$$md, l = \frac{ql * u^2}{8}$$

в поперечном направлении (размер консоли - v)

$$md, b = \frac{qb * v^2}{8}$$

$$tl = \sqrt{\frac{6 * md, l * \gamma \sigma}{R_{yn} * b}}$$

в поперечном направлении:

$$t_b = \sqrt{\frac{6 * m d, b * \gamma m_0}{R_{yn} * l}}$$

Выбирается наибольшая полученная толщина, согласовывается с сортаментом листовой стали и окончательно принимается.

Для узлов на рис. 1.2 и 1.3 необходимо рассчитать цапф и проушины. Целесообразно задаться какими-либо значениями параметров цапфа и проушин и проверить их:

d – диаметр цапфа;

d₀ – диаметр отверстия;

t – толщина проушины

Определим площадь сечения цапфа:

$$A = 2\pi R^2$$

Момент сопротивления цапфа:

$$W = \frac{\pi * d^3}{32}$$

Геометрические требования, предъявляемые к конструкциям с шарнирным окончанием:

$$t \geq 0.7 \sqrt{\frac{F_{cd} * \gamma m_0}{R_{yn}}}$$

где γm_0 и γm_2 – частные коэффициенты и равны соответственно 1 и 1.25

также должно выполняться условие:

$$d_0 \leq 2.5t$$

Рассчитаем сопротивление цапфа сдвигу.

$$F_v, R_d \leq F_v, R_d$$

$$F_v, R_d = \frac{0.6 * A * R_{yn}}{\gamma m_2}$$

Рассчитаем несущую способность проушины и цапфа.

$$F_b, R_d \leq F_b, R_d$$

$$F_b, R_d = \frac{1.5 * d * t * R_{yn}}{\gamma m_0}$$

Прочность цапфа на изгиб:

$$M_{rd} \leq M_{ed}$$

$$M_{ed} = \frac{F_{ed}}{8} * (b + 4c + 2a)$$

где b – толщина проушины со стороны арки;

a – толщина каждой из двух проушин со стороны фундамента

та

c – зазор между проушинами

$$M_{rd} = \frac{1.5 * W * R_y}{\gamma_{mc}}$$

Общее сопротивление сдвигу и изгибу цапфа:

$$\left[\frac{M_{ed}}{M_{rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v, Ed}}{F_{v, Rd}} \right]^2 \leq 1$$

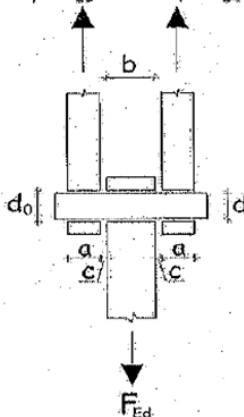


Рисунок 4 – Расчетная схема шарнира.

В целях увеличения устойчивости проушин, их можно укреплять рёбрами жесткости (см. рис. 1.2 и 1.3).

Конструкция узла на рис. 1.2 предусматривает заведение торца арки в стальной башмак. Для данного узла необходимо рассчитать сварные швы, соединяющие дно башмака со стенками на срез от поперечного усилия Q , направленного вдоль большего размера сечения арки.

Также необходимо определить требуемую глубину заведения арки в башмак из условия прочности древесины на смятие поперёк волокон.

Зная ширину площадки контакта (равна ширине полуарки), определим высоту заведения:

$$A = \frac{Q}{f_{cm90d} * k_i}$$
$$h = \frac{A}{b}$$

где k_i – общий коэффициент условий работы конструкции.

При сравнении различных конструкций опорных узлов, в процессе определения наиболее подходящего для конкретной ситуации, можно предложить два критерия сравнения: металлоёмкость и пригодность к эксплуатации в конкретных условиях. Так, под металлоёмкостью, разумеется, подразумевается количество металла, затраченного на изготовление всех составляющих узла. К примеру, произведя расчет опорного узла на нагрузки $N=430$ кН, $Q=40$ кН можно получить следующие ориентировочные значения металлоёмкости для узлов, указанных на рис. 1.1, 1.2 и 1.3 соответственно: 103 кг, 204 кг, 125 кг, что соотносится как 1:1.21:1.97. Получается, что конструкция узла на рис. 1.1 требует наименьших затрат металла.

Рассматривая конструкции узлов с точки зрения эксплуатационной пригодности, можно выделить конструкцию на рис. 1.3. Данная конструкция выгодно отличается тем, что болтовая пластина спрятана внутри тела полуарки и, тем самым, защищена от возможного агрессивного воздействия окружающей среды. Однако, такое решение может быть сложно реализовать технологически.

Преимуществом конструкции узла на рис. 1.2 можно назвать простоту сборки узла и возможность эстетически выразительного оформления, в случае если это имеет значение.

Источники

1. ТКП 45-5.05-146-2009 «Деревянные конструкции»
2. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции»
3. В. А. Иванов «Конструкции из дерева и пластмасс», 1981 г
4. ТКП EN 1993-1-8-2009 Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений