

РАСЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧЕТЫРЕХШАРНИРНОЙ АРОЧНОЙ ПОДАТЛИВОЙ КРЕПИ

В.В.Смирняков

Четырехшарнирная крепь представляет собой статически определимую геометрически изменяемую систему с одной степенью свободы.

В наземных конструкциях геометрически изменяемые системы почти не применяются ввиду их неустойчивости. Поэтому конкретной методики их расчета строительная механика не дает.

В подземных условиях сдвигению контура крепи в плоскости поперечного сечения выработки препятствуют породные стенки, поэтому геометрически изменяемые системы в некоторых случаях могут оказаться эффективными. Так, при введении в конструкцию крепи дополнительных шарниров уменьшаются изгибающие моменты, снижается неравномерность распределения нагрузки по контуру крепи, уменьшается вес ее элементов.

К четырехшарнирным металлическим крепям, применяемым на практике, относятся: арочная и кольцевая крепь конструкции Ленинградского горного института с узлами податливости, работающими на принципе среза металлических шпилек [5, 6]; арочная податливая крепь постоянного сопротивления (АПС) ИГД им. А.А.Скочинского [3]; кольцевые шарнирные и шарнирно-податливые крепи [4] и др.

На результаты расчетов любой крепи большое влияние оказывает правильность выбора характера загрузки конструкции внешними нагрузками. В существующих методах расчета предполагается, что между крепью и окружающей ее массивом сохраняется непрерывный контакт и нагрузка распределена по всему контуру крепи. Такой характер контактного взаимодействия крепи и окружающих пород справедлив лишь для капитальных выработок, крепь которых имеет небольшую податливость, а также для подготовительных выработок, пройденных на небольшой глубине или в породах, склонных к хрупкому разрушению.

Наблюдения за работой податливой крепи в выработках глубоких шахт Донбасса показывают, что за счет неравномерного смещения пород по длине пролета выработки при работе крепи в режиме податливости не нее, как правило, действует сосредоточенная нагрузка, приложенная примерно в середине пролета. Крепь при этом "уходит" от смещающихся в сторону выработки пород, за счет чего между крепью и породами, за исключением небольшого участка непосредственного контакта, образуется зазор даже при самой тщательной первоначальной расклинке крепи и забутовке закрепного пространства. Такое контактное взаимодействие крепи и окружающих пород в пластичных породах наблюдалось и на небольшой глубине, особенно, если крепь обладала большой конструктивной податливостью.

В породах, склонных к хрупкому разрушению, другое взаимодействие. При разрушении пород на контуре выработки их объем увеличивается и порода заполняет закрепное пространство. Вокруг выработки образуется зона разрушен-

ных пород, которая распределяет действующую на крепь нагрузку по всему ее периметру.

Таким образом, в зависимости от характера контактного взаимодействия крепи и окружающих пород при расчете могут задаваться два вида приложения внешних нагрузок на крепь: сосредоточенное и распределенное.

В последнем случае распределение внешних вертикальных q_v и горизонтальных q_r нагрузок для упрощения расчетов целесообразно принять по прямолинейному закону, а неравномерность их распределения характеризовать отношением $n = \frac{q_r}{q_v}$. Применение более сложных законов распределения нагрузок по контуру крепи усложняет расчет и, вследствие многообразия встречающихся горногеологических условий, практически не отражает действительного распределения давления. Равномерно распределенная эпюра нагрузок при расчетах крепи принимается также другими исследователями [1, 2].

Любая податливая металлическая крепь с точки зрения расчета представляет необычную конструкцию. В процессе эксплуатации выработки постепенно уменьшаются ее геометрические размеры и изменяется форма. Метода расчета таких конструкций в строительной механике нет.

Первое время после установки крепи податливость в узлах не наблюдается и арка работает как жесткая, а затем по мере смещения горных пород и увеличения нагрузки происходит скачкообразное скольжение элементов крепи, в результате чего периметр арки уменьшается и снижается нагрузка на нее. В дальнейшем нагрузка вновь возрастает, появляется скачкообразная податливость и т.д.

Очевидно, что наименьшая несущая способность будет у арки при наибольших ее геометрических размерах, т.е. при установке. По мере истощения податливости несущая способность крепи увеличивается, поскольку уменьшаются ее размеры. За расчетные геометрические размеры арки необходимо принимать наибольшие соответствующие моменту установки. В случае большой конструктивной податливости крепи для правильного определения параметров узлов податливости иногда требуется определить несущую способность крепи до и после истощения податливости.

Поскольку арка до начала податливости работает как жесткая, к ней можно применить методы расчета обычных арок. За предельное принимается такое состояние конструкции, при котором напряжения в материале крепи достигают предела текучести.

С точки зрения возможности повторного использования металла важно не допускать в элементах крепи пластических деформаций. Для достижения этого сопротивление узлов податливости сдвиганию элементов крепи должно быть меньше величины продольной силы, соответствующей напряжению, равному пределу текучести металла. В этом и состоит, на наш взгляд, основная цель расчета металлической податливой крепи.

Рассмотрим с учетом высказанных положений расчет четырехшарнирной арочной крепи наиболее часто применяемых на практике форм (рис.1,2) для случая равномерно распределенных внешних нагрузок. С расчетной точки зрения такой характер загрузки является более сложным, чем при сосредоточенных нагрузках. Геометрические размеры крепи принимаем соответствующими моменту ее установки.

На рис. 1,а показана расчетная схема арочной четырехшарнирной крепи,

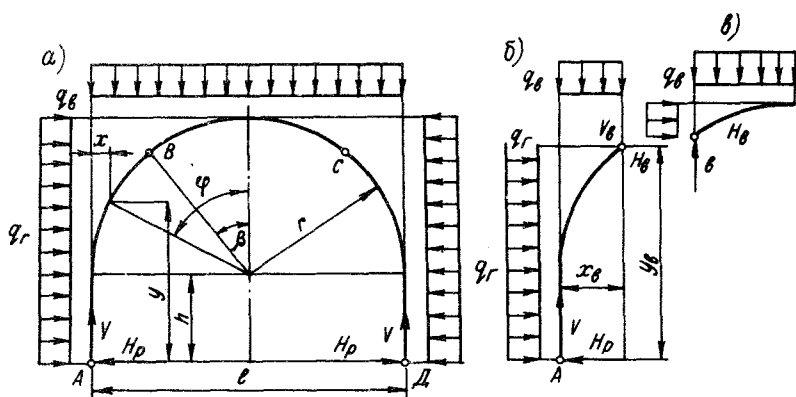


Рис.1. Расчетная схема четырехшарнирной арочной крепи

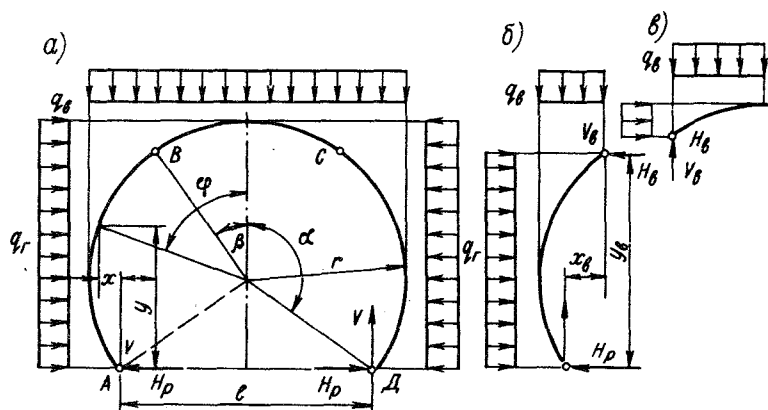


Рис.2. Расчетная схема четырехшарнирной крепи кругового очертания

каждая рама которой состоит из двух стоек и криволинейного верхняка, соединенных шарнирно. Стойка в нижней части имеет прямолинейный участок, который при установке крепи занимает вертикальное положение, а при податливости ее отклоняется внутрь выработки. К конструкциям крепи такой формы относятся арочная четырехшарнирная крепь ЛТИ и крепь АПС ИГД им. А.А.Скочинского.

Поскольку нагрузка симметричная, расчет производим для одной половины арки, например, левой.

Изгибающий момент в произвольном сечении арки определяется по формуле

$$M_x = Vx + H_p y - \frac{q_\delta x^2}{2} - \frac{q_r y^2}{2}, \quad (1)$$

где V — вертикальная опорная реакция, $V = \frac{q_s l}{2}$; H_p — горизонтальный распор; x и y — координаты сечения (начало в точке A).

Первоначально крепь рассчитываем на внешние единичные нагрузки. Приняв $q_s = 1$, а $q_r = n q_s$, получим формулу (1) в виде

$$M_{x_1} = r x + H_{p_1} y + \frac{x^2}{2} - \frac{q_r y^2}{2} . \quad (2)$$

Значение горизонтального распора получим из условия равенства нулю суммы моментов всех сил относительно шарнира в точке B $\sum M_B = 0$

$$H_{p_1} = \frac{\frac{x_B^2}{2} + \frac{q_r y_B^2}{2} - r x_B}{y_B} . \quad (3)$$

Заменяя декартовы координаты на полярные (см. рис.1) и сделав соответствующие преобразования, представим выражения (2) и (3) в упрощенном виде

$$M_{x_1} = H_{p_1} y + \frac{r^2 \cos^2 \varphi}{2} - \frac{q_r y^2}{2} , \quad (4)$$

$$H_{p_1} = \frac{q_r y_B^2 - (y_B - h)^2}{2 y_B} . \quad (5)$$

Сечения с экстремальными моментами найдем по $\frac{dM}{d\varphi} = 0$. В нашем случае на криволинейной части периметра крепи будут два сечения, подозрительные на экстремум, с координатами

$$\varphi_0 = 0 \quad (6)$$

и

$$\varphi_0 = \arccos \frac{q_r h - H_{p_1}}{r(1 - q_r)} . \quad (7)$$

На прямолинейной части периметра крепи возможно одно сечение с экстремальным моментом с координатой

$$y_0 = \frac{H_{p_1}}{q_r} . \quad (8)$$

В зависимости от геометрических размеров крепи и отношения n внешних нагрузок максимальный момент может быть в одном из трех сечений, координаты которых определяются выражениями (6), (7) и (8). За расчетное сечение принимается то, в котором изгибающий момент по абсолютной величине будет максимальным.

Предельная несущая способность крепи определяется с учетом продольной силы в опасном сечении по формуле

$$q_{\text{в.нес}} = \frac{\sigma_T}{\frac{|M_1|}{W} + \frac{|N_1|}{F}}, \quad (9)$$

где σ_T — предел текучести материала крепи (для ст.5 $\sigma_T = 2800 \text{ кг/см}^2$); M_1 , N_1 — абсолютная величина, соответственно, изгибающего момента и продольной силы в расчетном сечении арки при $q_{\text{в}} = 1$; W , F — соответственно, момент сопротивления и площадь поперечного сечения профиля арки.

Продольная сила в произвольном сечении определяется по формуле

$$N_1 = H_p \cos \varphi - r \sin^2 \varphi - q_r \cos \varphi (h + r \cos \varphi). \quad (10)$$

Сопротивление узла податливости действию продольной силы должно быть меньше ее величины, соответствующей сечению арки, где расположен узел податливости. Оно определяется по формуле

$$D = k N_x q_{\text{в.нес}}, \quad (11)$$

где k — коэффициент, учитывающий перегрузку, однородность материала, условия работы крепи и др.

Для податливой металлической крепи горизонтальных выработок k рекомендуется принимать в пределах 0,7–0,8.

Определение прочных размеров деталей, скрепляющих элементы крепи, зависит от конструкции узла податливости. Так, при применении скоб, планок и гаек (крепь АПС) необходимая площадь поперечного сечения скоб определяется по формуле

$$s = \frac{Q_x + p}{k \sigma_T}, \quad (12)$$

где Q_x — поперечная сила в сечении арки, в которой расположен узел податливости; p — суммарное максимальное усилие натяжения скоб при установке крепи; σ_T — предел текучести металла скоб (для ст. 3 $\sigma_T = 2300 \text{ кг/см}^2$).

Поперечная сила в произвольном сечении арки определяется по формуле

$$Q_x = q_{\text{в.нес}} (r \cos \varphi + H_p \sin \varphi - x \cos \varphi - q_r y \sin \varphi), \quad (13)$$

Суммарное максимальное усилие натяжения скоб зависит от их диаметра, размеров планок, типа спецпрофиля и расположения его открытой части наружу или внутрь выработки. При использовании спецпрофиля СМП-27, стандартных

скоб диаметром 24 мм, планок толщиной 16 мм p составляет: при расположении открытой части спецпрофиля к породным стенкам 1,8 - 2 т, внутрь выработки (при обратном изгибе спецпрофиля) 5,6 - 6 т на одну скобу.

На несущую способность четырехшарнирной крепи влияет расположение шарниров на периметре арки (рис. 1, точки B и C). Если положение их выбрано неверно, изгибающие моменты в верхняке и в стойке по абсолютной величине будут отличаться друг от друга, что снижает несущую способность крепи в целом. Меняя местоположение шарниров, можно добиться равенства абсолютных величин экстремальных моментов верхняка и стойки, что позволит полностью использовать несущую способность крепи.

Рассмотрим случай, когда сечения с экстремальными моментами расположены в вершине арки и на криволинейной части стойки, координаты которых определяются формулами, соответственно, (6) и (7).

Условие равенства абсолютных величин экстремальных моментов в этих сечениях определяется уравнением

$$M_0 = -M_{\varphi_0} \quad (14)$$

Оба момента определяются выражением (4) при соответствующих координатах сечений.

Подставив в выражения (4) и (14) значения величин и решая его относительно ординаты шарнира y_B , получим уравнение

$$\begin{aligned} (1 - q_{\Gamma})y_B^4 + 4(1 - q_{\Gamma})(h + r)y_B^3 - [4(1 - q_{\Gamma})(h + r)^2 + 6h^2]y_B^2 + \\ + 4h^2(h + r)y_B + h^4 = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение (15) является уравнением четвертой степени и может быть решено известными в математике методами.

Ордината шарнира B определяется действительным корнем уравнения при значении его в пределах $0 < y_B < (h + r)$.

Для случая, когда сечения с экстремальными моментами находятся в вершине арки и на прямолинейной части стойки, коэффициенты уравнения (15) будут другими.

Аналитическое решение уравнения четвертой степени трудоемко. С достаточной для практических целей точностью и сравнительно быстро рациональное расположение шарниров может быть выбрано после нескольких вычислений по вышеуказанным формулам.

Арочная четырехшарнирная крепь кругового очертания рассчитывается аналогично. Однако некоторые формулы для определения усилий в элементах крепи в связи с другим геометрическим очертанием ее контура (рис. 2) будут отличаться.

Так же, как и в предыдущем случае, расчет производим для левой половины арки на внешние единичные нагрузки.

Изгибающий момент в произвольном сечении

$$M_{x_1} = \frac{lx}{2} + H_p y - \frac{x^2}{2} - \frac{q_{\Gamma} y^2}{2}.$$

Горизонтальный распор

$$H_{p_1} = \frac{x_a^2 - q_{\Gamma} y_a^2 - l x_b}{2 y_b} .$$

Сечения с экстремальными моментами найдем по $\frac{dM}{d\varphi}$. В крепи кругового очертания будут два таких сечения с координатами $\varphi_0 = 0$ и

$$\varphi_0 = \arccos \frac{q_{\Gamma} r \cos(180 - \alpha) - H_{p_1}}{r(1 - q_{\Gamma})} .$$

Дальше крепь рассчитывается по формулам (9) - (12).

Рациональное положение шарниров выбирается аналогично рассмотренному выше.

Правильность изложенной методики расчета проверена в различных бассейнах многолетними инструментальными наблюдениями за работой четырехшарнирной металлической крепи в шахтных условиях.

Л и т е р а т у р а

1. Гелескул М.Н., Киселев Е.С. Конструирование и расчет железобетонных рамных крепей. Госгортехиздат, 1961.
2. Давыдов С.С. Расчет и проектирование подземных конструкций. Стройиздат, 1950.
3. Инструкция по применению металлической арочной податливой крепи постоянного сопротивления в подготовительных выработках угольных шахт. Изд. ИГД им. А.А.Скочинского, 1971.
4. Насонов Л.Н. Механика горных пород и крепление горных выработок. "Недра", 1969.
5. Смирняков В.В., Мирзаев Г.Г. Металлическая крепь с новыми узлами податливости. Горный журнал, 1963, № 9.
6. Смирняков В.В., Мирзаев Г.Г., Бокий В.Б. Опыт применения арочной крепи из спешпрофиля с новыми узлами податливости. В сб. Современные вопросы шахтного строительства, Изд. ЛПИ, 1971.