

Математическое моделирование стеновых испытаний арочных крепей в жестком режиме

Д. Н. Макшанкин,

соискатель кафедры разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом ГОУ КузГТУ

В. А. Гоголин,

д. т. н., профессор кафедры прикладной математики ГОУ КузГТУ

А. В. Ремезов,

д. т. н., профессор кафедры РМПИ ГОУ КузГТУ



В угольной и горнорудной промышленности России широко применяются арочные металлические крепи, изготавливаемые из металлических профилей. В частности, на угольных шахтах Кузбасса в последние годы доля выработок, поддерживаемых арочными металлическими крепями, составляет до 60 %. Ухудшение горно-геологических условий добычи угля, повышение требований к безопасности труда, экономичности производства требуют дальнейшего совершенствования арочных крепей.

Промышленное использование арочных крепей возможно только после стеновых испытаний, которые должны подтвердить их работоспособность. Стеновые испытания выполняются согласно ГОСТ Р 50910-96 «Крепи металлические податливые рамные» [1]. При этом предусматривается то, что число испытанных крепей одного типоразмера должно составлять не менее трех.

В натурных стеновых испытаниях крепь нагружается вертикально по центральной точке верхняка до нагрузки, когда крепь теряет несущую способность. На стенде КузНИИшахтостроя для этой цели используются гидроцилиндры от комплекса 2-ОКП-70. Потеря несущей способности фиксируется падением давления в манометрах, регистрирующих давление в гидроцилиндрах. Согласно ГОСТу, испытания проводятся в двух режимах: 1) пассивном, когда гидроцилиндры, горизонтально расположенные на высоте 1 м от концов стоек, удерживают стойки крепи от горизонтальных смещений; 2) активном, когда на эти гидроцилиндры подается нагрузка. Общая схема стеновых испытаний приведена на рис. 1.

Для вновь разработанного профиля ШП, из-за отсутствия средств на изготовление опытной партии для проведения стеновых испытаний крепей с профилем ШП, авторы предлагают метод математического моделирования данного процесса для арочной трехзвенной крепи, испытываемой в жестком режиме (крепь не имеет элементов податливости). Так как при сложном сечении профиля и арочной форме крепи ее на-

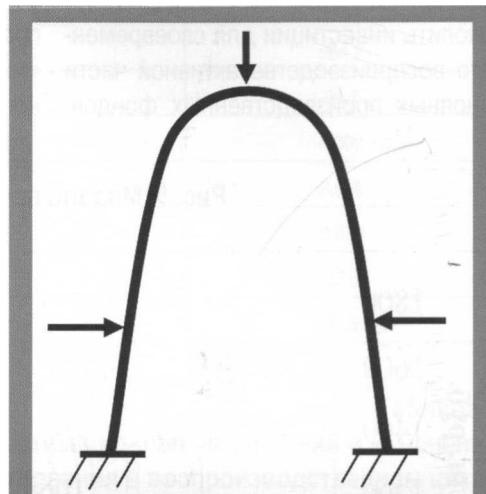


Рис. 1. Схема стеновых испытаний по ГОСТ Р 50910-96

пряженно-деформированное состояние не поддается точным аналитическим расчетам, то был использован метод конечных элементов (МКЭ). Численные расчеты были выполнены по стандартной программе для крепей из профилей СВП и ШП. Профиль СВП является стандартным при изготовлении крепей [3], а профиль ШП является новым, разработанным в Кузбасском государственном техническом университете [4, 5]. Сечения профилей приведены на рис. 2, а их геометрические характеристики в табл. 1, где y_0 – расстояние до центра тяжести.

Для проведения расчетов методом МКЭ для каждого из указанных профилей были рассчитаны их приведенные сечения в форме прямоугольников (рис. 3).

Размеры приведенных сечений профилей определялись по двум условиям: 1) равенству площадей поперечных сечений профилей F ; 2) равенству моментов сопротивлений на изгиб относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести профиля W_{x_0} [6]:

$$\begin{cases} F_1 = F_2, \\ W_{x_1} = W_{x_2}. \end{cases}$$

Таблица 1
Геометрические характеристики профилей СВП и ШП

Тип профиля	h , мм	h_1 , мм	B , мм	b_1 , мм	d , мм	d_1 , мм	y_0 , мм
СВП-22	110,0	25,6	145,5	60,0	11,0	6,2	52,7
СВП-27	123,0	29,0	149,5	59,5	13,0	7,1	58,5
ШП-21	88,0	7,0	286,2	124,0	7,0	5,0	44,0
ШП-26	98,4	8,0	309,2	133,0	8,0	7,0	49,2

Таблица 2
Геометрические характеристики профилей крепей и их приведенных сечений

Тип профиля	Момент сопротивления, W_x , см ³	Площадь сечения профиля, F , см ²	Вертикальный размер приведенного сечения, R , см	Горизонтальный размер приведенного сечения, L , см
СВП-22	74,8	27,91	16,08	1,74
СВП-27	100,2	34,37	17,49	1,96
ШП-21	75,45	26,68	16,97	1,57
ШП-26	104,6	33,47	18,75	1,79

Используя известные значения F и W_x , были найдены параметры приведенного прямоугольного сечения:

$$\begin{cases} F = R \cdot L \\ W_x = \frac{L \cdot R^2}{6} \end{cases}, \quad \text{откуда} \quad \begin{cases} R = \frac{W_x \cdot 6}{F} \\ L = \frac{F}{R} \end{cases}$$

где R и L – соответственно высота и ширина приведенного сечения профиля (Табл. 2). Так как конструктивные элементы крепей изготавливаются из горячекатаной стали, то при расчетах были приняты соответствующие деформационные и прочностные характеристики этого материала: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м², коэффициент поперечных деформаций $v = 0,25$, прочность на

растяжение $4 \cdot 10^8$ Н/м² [2]. Рамная крепь рассчитывалась как конструкция, находящаяся в плоском напряженном состоянии. Такое решение связано с тем, что горизонтальный размер приведенного сечения L на порядок меньше вертикального размера R . (см. табл. 2.) Основные уравнения плоского напряженного состояния крепи, связывающие напряжения σ , τ и деформации ε , γ имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= 0, \\ \varepsilon_z &= -\frac{v}{E} \cdot (\sigma_x + \sigma_v), \\ \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - v \cdot \sigma_v), \\ \varepsilon_v &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_v - v \cdot \sigma_x), \\ \gamma_{xy} &= \frac{2 \cdot (1+v)}{E} \cdot \tau_{xy} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -f_y \end{cases}$$

В рассматриваемом случае можно пренебречь весом рамы, так как внешние нагрузки значительно превосходят этот вес, и к тому же рама испытывается в горизонтальном положении. Так что $f_x = f_y = 0$.

В первую очередь было проверено соответствие расчетных результатов с результатами стендовых испытаний крепей для двух типоразмеров профилей: СВП-22, СВП-27. Результаты стендовых испытаний были предоставлены администрацией института «КузНИИшахтострой» (Протокол № 17 стендовых сертификационных испытаний металлической податливой трехзвенной крепи арочной формы типа АКП, эллиптической формы типа КАПЭ и металлической жесткой коробовой формы типа ЮКК, изготовленной на Шахтинском ремонтно-механическом за-

Уравнения статического равновесия записываются следующим образом:

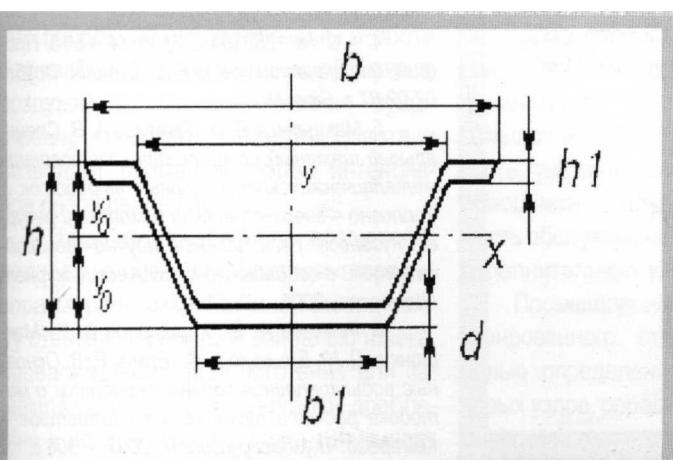


Рис. 2. Профили крепей СВП и ШП

Рис. 3. Переход к приведенному сечению профиля.

Таблица 3

Результаты стендовых испытаний и численных расчетов арочных крепей в жестком режиме

Тип профиля	Несущая способность по стендовым испытаниям, кН	Несущая способность по расчетам, кН	Погрешность расчета несущей способности, %	Прогиб верхняка по испытаниям, мм	Прогиб верхняка по расчетам, мм	Погрешность расчета смещений верхняка, %
СВП-22	352	312	11	284	260	4,9
СВП-27	415	381	8,2	342	350	2,3
ШП-21	-	344	-	-	273	-
ШП-26	-	402	-	-	366	-

воде ОАО «Ростовшахтострой» от 30 июля 2007 г.). Это было необходимо для выяснения адекватности применения метода расчета МКЭ для арочных крепей. Вертикальное нагружение рамной крепи проводилось с нагрузки 15 кН. Геометрия рамной крепи СВП-22 и векторы смещения в масштабе 1:5 в предельном случае нагружения (потере несущей способности) показаны на рис. 4. Аналогичная качественная картина изменения геометрии крепи при потере ее несущей способности в испытаниях в жестком режиме наблюдалась у крепей всех типов профилей.

На этом рисунке темный цвет показывает области разрушения крепи. Места разрушения крепи находились по критерию разрушения Мора:

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} \cdot \sigma_2 > \sigma_p$$

где σ_1 , σ_2 – наибольшее и наименьшее главные напряжения; $\sigma_p/\sigma_{сж}$ – пределы прочности металла на растяжение и сжатие, $\sigma_p/\sigma_{сж} = 0,1$.

Как показывает сопоставление ре-

зультатов экспериментальных стендовых испытаний с результатами теоретических численных расчетов основных параметров крепей СВП – 22,27 и ШП – 21,26, принятых ГОСТом, различие теоретических и экспериментальных значений в среднем составляет 4–7 % (табл. 3). Значения этих погрешностей находятся в диапазоне отклонений, допускаемых при стендовых испытаниях и выпуске арочных крепей. Для сопоставления работоспособности крепей с профилем СВП и ШП проведено численное моделирование крепей с новым профилем ШП – 21, 26, для видов исполнения и типоразмеров крепей АКП-9,8 и АКП-13,8. Основные результаты этих численных экспериментов приведены в табл. 3. Как видно из этой таблицы, отклонения расчетных значений параметров для крепей с профилями СВП-22, 27 от экспериментальных составляют в среднем: для прогиба верхняка – 3,6 %; для несущей способности рамы – 9,6 %. Несущая способность крепей с профилем ШП-21 превосходит несущую способность крепей с профилем СВП-22 на 10 %, а с профилем ШП-26 – на 6 % по сравнению с профилем СВП-27.

Основные выводы.

1. Математическое моделирование методом МКЭ является альтернативой экспериментальным стендовым испытаниям арочных крепей в жестком режиме.

2. Арочная крепь с новым профилем ШП имеет более высокую несущую способность по сравнению с профилем СВП на 6–10 %, как и существующие крепи и может быть использована при изготовлении арочных крепей с сортаментом 21, 26.

3. Арочные трехзвенные крепи с профилем ШП-21, 26 вполне могут быть применены на практике для крепления подготовительных выработок. □

Литература

- Государственный стандарт Российской Федерации. Крепи металлические податливые рамные. Методы испытаний. (ГОСТ Р 50910). Госстандарт России. М.:1996. – 12 с.
- Государственный стандарт СОЮЗА ССР. Профили горячекатаные СВП для крепи горных выработок. Сортамент. (ГОСТ 186-62-83). М.:1983. – 3 с.
- Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 51748-2001 Крепи металлические податливые рамные. Крепь арочная. Общие технические условия. Госстандарт России. М.: 2001. – 15 с.
- А.С. № 1288304 Е 21 11/14, 11/15. Профиль для шахтной крепи/ В. В. Егошин. Опубл. 07.02.87 г. Бюл. № 5.
- Макшанкин Д. Н., Ремезов А. В. Специальный шахтный профиль для изготовления металлических крепей горных выработок // Топливно – энергетический комплекс и ресурсы Кузбасса: региональный научно-производственный и социально-экономический журнал. / Кемерово, 2006. – С. 61–63.
- Ремезов А. В., Харитонов В. Г., Макшанкин Д. Н., Брынько А. Ф., Ермак В. В. Основные виды крепления горных выработок и методика расчета технических параметров. / Кемерово, «Кузбассиздат», 2007. – 306 с.
- Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела.– М.: Наука, 1979. – 744 с.

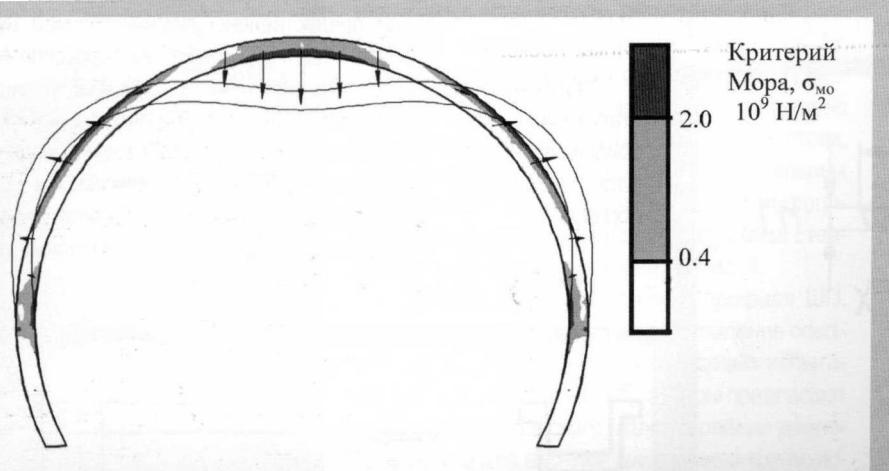


Рис. 4. Изменение геометрии крепи, векторы смещения и распределение остаточной прочности при потере несущей способности крепи.