

Расчет эффективности рамных металлических крепей и их оптимизация



Э. В. ФЕСЕНКО,
канд. техн. наук
(Донбасский ГТУ)

Сформулирован принцип равнопрочности рамной крепи. Для оценки эффективности конструкции обоснованы локальный нормированный критерий прочности и интегральный критерий эффективности. Разработана методика расчета запаса прочности и эффективности расхода металлопроката в крепи в целом и в ее элементах. Для сравнения разных конструкций крепи предложен параметр работоспособности.

Ключевые слова: рамная металлическая крепь, критерии эффективности, напряженное состояние, запас прочности, несущая способность.

Контактная информация: fesenkoed@gmail.com

Постановка проблемы. Одна из причин роста себестоимости угля, добываемого на шахтах Украины, – увеличение затрат на крепление и поддержание выработок, вызванное переходом работ на более глубокие горизонты, где наблюдается ухудшение горно-геологических условий и повышение интенсивности горного давления. В таких обстоятельствах типовые методы проектирования и существующие конструкции металлической крепи, которой закреплено около 90 % подготовительных выработок, оказываются неэффективными, что подтверждают шахтные инструментальные замеры и наблюдения за состоянием крепи. Так, ежегодные объемы перекреплений составляют около 15 % протяженности поддерживаемых выработок [1].

Переход на использование в рамных крепях «тяжелых» профилей СВП-27 и СВП-33 и увеличение плотности установки до двух и более рам на 1 м погонной длины выработки подняли расход металла до 600–700 т на 1 км погонной длины, однако существенно не повысили надежность и устойчивость поддерживаемых выработок. В то же время нередки случаи завышенного запаса прочности отдельных элементов конструкции, что приводит к необоснованному перерасходу металла. Это происходит из-за того, что для расчета крепи используют упрощенные методы, регламентированные СОУ 10.1.00185790.011:2007 [2], а выбор параметров ограничен типовыми конструкциями, большинство из которых разработаны в середине прошлого века. Кроме того, не существует методов оценки эффективности и работоспособности крепи для анализа параметров и конструктивных элементов в целях рационального проектирования.

В связи с этим актуальна проблема разработки метода оценки эффективности работы рамной конструкции крепи в разных условиях эксплуатации на основе анализа ее напряженно-

формированного состояния для обеспечения оптимального проектирования и рационального использования металла с учетом принципа равнопрочности элементов [3].

Цель исследования – изучение закономерностей изменения напряженного состояния, запаса прочности и перерасхода материала в элементах крепи, оценка эффективности ее работы в зависимости от характера действующей нагрузки и контактных условий взаимодействия конструкции с массивом. *Объектом* исследования является металлическая рамная крепь, а *предметом* – изменение напряженного состояния ее элементов и показателей эффективности работы в зависимости от условий нагружения. *Задачи* исследования – разработать критерии оптимальности и эффективности работы элементов рамной крепи, а также методику обоснования ее рациональных параметров на основе принципа равнопрочности. *Основная идея* состоит в обеспечении принципа равнопрочности элементов крепи при ее проектировании, а также оценке эффективности работы крепи по степени нагруженности элементов

и рациональному использованию крепежного материала.

Результаты исследования. Размеры элементов рамных крепей рассчитывают и выбирают по напряжениям, возникающим в самом опасном сечении [4]. При этом параметры несущего профиля (тип, сечение) принимают одинаковыми для всей конструкции, что приводит к неэффективному использованию металла, так как часть контура рамы, в зависимости от вида внешней нагрузки, оказывается недогруженной.

Поскольку крепи в процессе работы контактируют с массивом горных пород, составляя единую деформируемую систему крепь-массив, здесь как правило не применимы обычные методы расчета, основанные на строгих аналитических решениях контактных задач теории упругости. Поэтому расчеты напряженного состояния и несущей способности подземных крепей по сложности не сопоставимы с расчетами обычных строительных конструкций.

Решение указанной проблемы возможно с помощью численного моделирования. Так, в работе [3] приведены результаты исследования закономерностей изменения несущей способности арочной металлической крепи в зависимости от параметров внешнего нагружения, контактных условий ее взаимодействия с массивом и жесткости забутовки. Вычисления выполняли с помощью программного вычислительного комплекса «Ли́ра», реализующего метод конечных элементов. Особенность расчетов – учет взаимодействия крепи с окружающим массивом в виде так называемого пассивного (реактивного) отпора пород, что заметно усложняет расчет крепи и редко учитывается в существующих методах расчета.

Модель арочной крепи подвергалась действию двух видов нагрузок:

- вертикальной сосредоточенной силы, приложенной к вершине, как случай предельно неблагоприятного нагружения;
- вертикальной распределенной нагрузки как типичной при расчете и проектировании крепи.

Чтобы обеспечить устойчивость конструкции крепи и предотвратить разрушения, суммарные напряжения от нормальной силы N и изгибающего момента M в опасном сечении

не должны превышать расчетное сопротивление R_y (предел текучести стали) [5]:

$$\sigma = M/(W\gamma_{c1}) + N/(\varphi A\gamma_{c2}) \leq R_y, \quad (1)$$

где W – момент сопротивления сечения, см³;

γ_{c1} и γ_{c2} – коэффициенты условий работы для изгибаемых и центрально сжатых элементов ($\gamma_{c1} = 0,8$; $\gamma_{c2} = 1,1$);

φ – коэффициент продольного изгиба [5];

A – площадь поперечного сечения профиля, см²;

R_y – расчетное сопротивление стали, МПа ($R_y = 240$ МПа).

При постепенном возрастании нагрузки на первом этапе (до исчерпания конструктивной податливости) возможен переход крепи в одну из двух предельных стадий работы – тип 1 ($M = [M]$, когда крепь разрушается от изгибающих моментов) или тип 2 ($N = N_{уз}$, когда срываются узлы податливости и крепь переходит в податливую стадию работы).

Наиболее эффективным случаем работы крепи будет одновременное исчерпание ею несущей способности по обоим факторам, т. е. по допустимым моментам в каком-либо опасном сечении и продольным силам в узлах податливости.

Исходя из этого, сформулируем **условие оптимального проектирования** рамной податливой крепи. Оно основано на анализе возможных предельных состояний двух типов: предельная нагрузка на крепь P лимитируется сопротивлением $N_{уз}$ узлов податливости либо несущей способностью элемента крепи на изгиб $[M]$, что следует использовать для достижения равнопрочности конструкции.

Принцип равнопрочности податливой крепи состоит в том, чтобы обеспечить такое сопротивление узлов податливости $[N_0]$ крепи, которое соответствует нагрузке, вызывающей предельный изгибающий момент $[M]$ в наиболее опасном сечении крепи. Этот принцип позволяет сформулировать критерии оптимальности рамной податливой крепи:

$$K_{o1} = P_M/P_N \rightarrow 1 \text{ при } K_{o2} = P_K/m_K \rightarrow \max, \quad (2)$$

где P_M – несущая способность крепи по допустимому моменту в опасном сечении;

P_N – несущая способность крепи по предельному сопротивлению узла податливости;

P_K – несущая способность податливой крепи (минимальное из расчетных значений P_M или P_N);

m_K – масса одной крепежной рамы.

В проведенных расчетах несущая способность крепи и оптимальное сопротивление узлов податливости определяли исходя из условия достижения предельного состояния в ее опасном сечении. При этом оставалось неясным, насколько напряжения в других сечениях крепи близки к предельным, какова эффективность использования металла в крепежной раме при данных условиях ее нагружения и взаимодействия с массивом.

Напряженное состояние σ любого сечения крепи определяют выражением (1). Разделив допустимое напряжение R_y на действующее σ , получим запас прочности в данном сечении, т. е.

$$\Omega = R_y/\sigma = R_y[(WA\varphi\gamma_{c1}\gamma_{c2})/(M\varphi A\gamma_{c2} + NW\gamma_{c1})], \quad (3)$$

где Ω – локальный нормированный критерий прочности, который показывает, во сколько раз действующие в сечении напряжения меньше предельных.

С помощью предложенного критерия Ω можно оценить, насколько эффективно используется металл в конструкции крепи при определенных условиях нагружения и взаимодействия с массивом. Для этого необходимо проинтегрировать локальный нормированный критерий прочности по периметру крепежной рамы, чтобы вычислить ее интегральный коэффициент запаса прочности:

$$K_{з.п} = \left(\int_0^l \Omega(s) ds \right) / l, \quad (4)$$

где l – периметр рамы крепи, м.

Используя выражение (4), можно рассчитать коэффициент $K_{з.п}$ для рамы в целом и для отдельных элементов, приняв, что l – длина анализируемого элемента или участка крепежной рамы. Коэффициент $K_{з.п}$ показывает, во сколько раз запас прочности конструкции или ее элемента выше требуемого. С его помощью оценим степень эффективности использования материала в конструкции. Так, конструкция тем эффективнее, чем $K_{з.п}$ ближе к единице. Таким образом, коэффициент $K_{з.п}$ – **критерий эффективности** рамной конструкции, т. е. необходимо, чтобы $K_{з.п} \rightarrow 1$ при $\Omega(s) \geq 1$ по всему периметру крепи.

Излишек материала (неэффективно используемую часть) конструкции определяют из формулы

$$d_{изл} = 1 - 1/K_{з.п}, \text{ или } m_{изл} = m_k - m_k/K_{з.п} \quad (5)$$

где $d_{изл}$ и $m_{изл}$ – излишек материала конструкции в долях единицы и единицах массы;

m_k – масса конструкции или ее элемента.

Автор выполнил расчеты напряженного состояния крепи, локального нормированного критерия прочности и интегрального коэффициента запаса прочности и определил эффективность использования материала в арочной металлической крепи (размеры: ширина арки $2a = 5$ м, высота $2b = 3,5$ м, радиус дуги верхняка $r = 2,5$ м, несущий профиль СВП-22) для двух вариантов работы: первый – крепь без забутовки, нагружена вертикальной сосредоточенной силой; второй – крепь с забутовкой закрепленного пространства жесткостью $c = 100$ МПа/м под действием вертикальной равномерно распределенной нагрузки. Подробное описание расчетной схемы крепи приведено в работе [3].

Для проведения расчетов рама крепи была разбита на участки длиной 10 см, в пределах каждого вычислены средние значения изгибающих моментов M_i и продольных сил N_i , рассчитаны напряжения σ_i по формуле (1), локальный нормированный критерий прочности Ω_i по формуле (3) и перерасход металла $m_{изл.i}$ по формуле (5). Затем определены интегральные показатели $K_{з.п}$ и $m_{изл}$ по всей раме крепи. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Расчеты показывают, что напряженное состояние крепи зависит от характера действующей на крепь нагрузки и условий ее взаимодействия с массивом горных пород. Так, при действии на крепь сосредоточенной силы эпюра напряжений имеет три экстремума (см. рис. 1, а): в месте приложения нагрузки (233,2 МПа) и в боках выработки (128,6 МПа). Эпюра локального нормированного критерия прочности имеет пики ($\Omega = 16,1$) на участках расположения узлов податливости, где действуют минимальные изгибающие моменты и возникают минимальные напряжения ($\sigma = 14,9$ МПа). Прочность крепи здесь в 16,1 раза выше требуемой, что вызывает пропорциональный перерасход металлопроката на этих участках.

Для данной схемы загрузки крепи излишек стали в элементах практически по всему контуру выше 45 %, достигая на некоторых участках 90 % и более (см. рис. 1, а). Лишь на небольшой части контура (в месте приложения сосредоточенной силы), где действующие напряжения близки к пределу текучести стали $\sigma \approx R_y$, металл используется эффективно: $d_{изл} \approx 0$ %. Это доказывает, что эксплуатировать рамную крепь без забутовки, когда на нее действуют

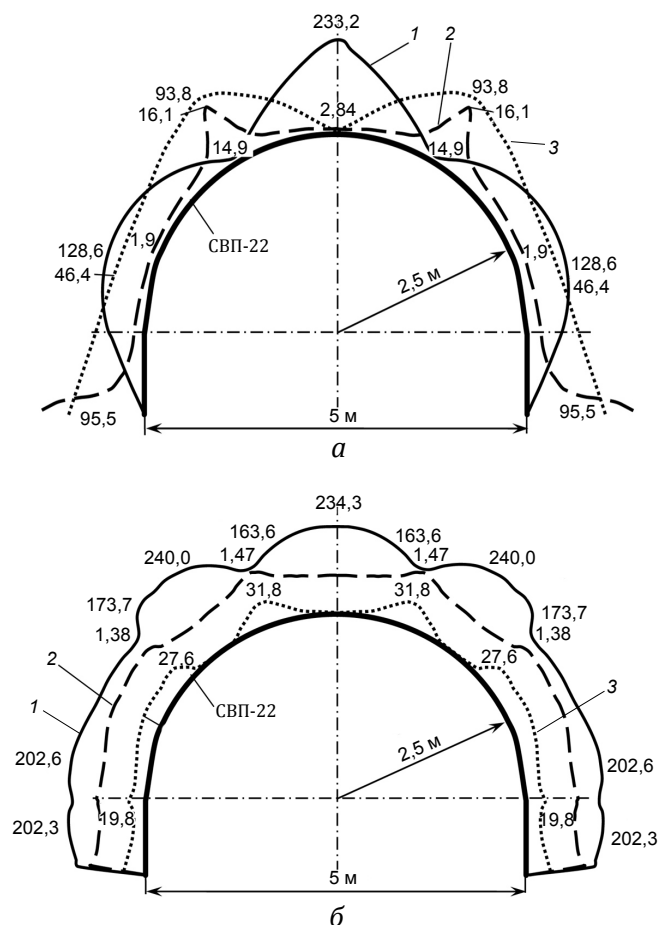


Рис. 1. Эпюры напряжений, МПа (1), локального нормированного критерия прочности (2) и излишка металла, % (3) по контуру рамной крепи при действии: а – сосредоточенной силы; б – распределенной нагрузки.

сосредоточенные силы, крайне неэффективно. Несущая способность P такой крепи, из-за возникновения в ней высоких изгибающих моментов, не превышает 25 кН, т. е. находится на недопустимо низком уровне. Интегральные показатели эффективности крепи для данной расчетной схемы: $K_{з.п} = 2,6$, т. е. явно завышен, перерасход металлопроката по всей крепежной раме составляет $d_{изл} = 61,5\%$, или $m_{изл} = 131,9$ кг (при массе рамы 215 кг). Следовательно, при таких условиях эксплуатации эффективно используется лишь 38,5 % материала крепи.

При наличии забутовки и в случае нагружения крепи распределенной нагрузкой эпюры напряжений, локального нормированного критерия прочности и излишка материала по контуру рамы изменяются более плавно (см. рис. 1, б).

Напряжения в элементах крепи колеблются от 163,6 до 240 МПа, а локальный нормированный критерий прочности соответственно от 1,47 до 1. Максимальное напряженное состояние элементов крепи ($\sigma = 240$ МПа) наблюдается в месте расположения узлов податливости, здесь же действуют максимальные изгибающие моменты. Это предъявляет повышенные требования к технологическим параметрам и надежности конструкций узлов податливости. Излишек стали во всех элементах крепи не превышает 32 %.

Интегральные показатели эффективности крепи для данной расчетной схемы $K_{з.п} = 1,24$, что значительно ближе к оптимальному значению, чем при работе крепи под действием сосредоточенных сил; перерасход металлопроката по всей крепежной раме $d_{изл} = 19,2\%$, или $m_{изл} = 41,1$ кг. Значит, в таких условиях эксплуатации эта же крепь работает эффективнее.

Однако необходимо отметить, что оценка конструкции выполнена для оптимальных условий, когда соблюдается **принцип равнопрочности** элементов. Для этого крепь должна быть оснащена узлами податливости с рабочим сопротивлением N_0 не менее 320 кН, что обеспечит ее несущую способность P_0 , равную 575 кН. Серийные узлы податливости рамных арочных крепей из спецпрофиля СВП-22 способны обеспечить сопротивление крепи в податливом режиме, равное 220 кН [2].

Пересчет интегральных показателей крепи на паспортную несущую способность дает следующие результаты: $K_{з.п} = 3,23$; перерасход металлопроката по всей крепежной раме 69 %, или 148 кг. Как видим, показатели эффективности резко ухудшились, даже по сравнению с показателями, которые характеризуют крепь без забутовки под действием сосредоточенных сил. Это объясняется высокой степенью недогруженности несущих элементов крепи, когда происходит срабатывание и проскальзывание узлов податливости задолго до исчерпания прочности профиля в его сечениях, т. е. конструкция не отвечает принципу равнопрочности элементов.

Проанализировав напряженное состояние крепи, рассмотрим проектирование рациональных параметров рамы. Преобладающим видом внутренних усилий в конструкции или ее элементе могут быть изгибающие моменты M

или продольные сжимающие усилия N , что необходимо учитывать при проектировании оптимальных параметров крепи для повышения эффективности ее работы.

В первом случае на прочность элемента в основном влияет его момент сопротивления W , а не площадь поперечного сечения A профиля, поэтому для уменьшения массы соответствующего элемента целесообразно принимать профиль с максимальным моментом сопротивления W_{\max} при минимальной площади A_{\min} . Такими характеристиками обладают замкнутые профили проката прямоугольного очертания, вытянутые в плоскости действия изгибающих моментов, которые могут быть использованы в конструкциях рамных крепей [6].

Во втором случае (низкие изгибающие моменты M при значительных продольных усилиях N), когда на напряженное состояние элемента влияет не форма, а площадь его поперечного сечения, можно использовать профили меньших геометрических размеров при отсутствии значительных крутящих моментов.

Исходя из изложенного, одним из возможных вариантов повышения эффективности крепи под действием сосредоточенных сил и при отсутствии забутовки предлагается следующее решение. Примем в качестве несущего замкнутый профиль прямоугольного очертания с высокой характеристикой сопротивления изгибу: $W \rightarrow \max$ при $A \rightarrow \min$. Для разных участков периметра крепи целесообразны разные типоразмеры профиля, поскольку, как показали исследования, значительный периметр контура крепи оказывается недогруженным, в то время как на некоторых его участках напряжения близки к предельным (см. рис. 1, а). Стыковка выбранного профиля производится с помощью разработанных авторами конструкций узлов, позволяющих надежно соединять отдельные элементы [7]. Приняты следующие типоразмеры профилей: прямая часть стоек: $90 \times 60 \times 4$ мм, $W = 26,11 \text{ см}^3$, $A = 10,95 \text{ см}^2$; арочный свод: $120 \times 90 \times 4$ мм, $W = 53,58 \text{ см}^3$, $A = 15,75 \text{ см}^2$; в центре свода для обеспечения повышенного сопротивления крепи изгибающим моментам установлен элемент усиления способом труба в трубе длиной 75 см с параметрами: $140 \times 100 \times 2,5$ мм, $W = 53,58 \text{ см}^3$, $A = 15,75 \text{ см}^2$.

Для крепи, которая находится под действием равномерно распределенной нагрузки,

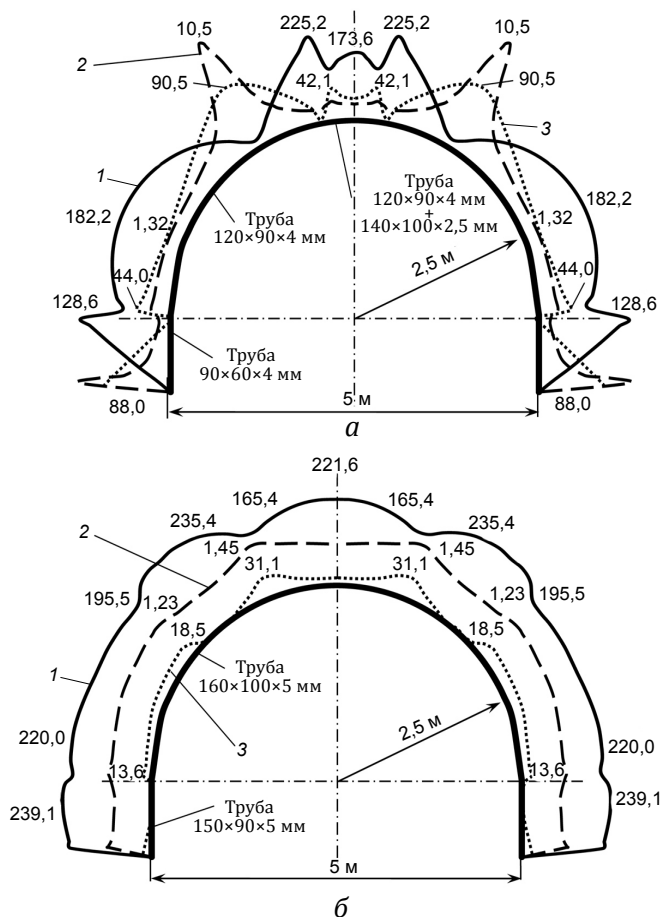


Рис. 2. Эпюры напряжений, МПа (1), локального нормированного критерия прочности (2) и излишка металла, % (3) по контуру рамной крепи из коробчатого профиля при действии: а – сосредоточенной силы; б – распределенной нагрузки.

предложены такие параметры: прямая часть стоек: $150 \times 90 \times 5$ мм, $W = 88,88 \text{ см}^3$, $A = 22,4 \text{ см}^2$; арочный свод: $160 \times 100 \times 5$ мм, $W = 105,23 \text{ см}^3$, $A = 24,36 \text{ см}^2$.

Результаты расчета напряженного состояния предложенных конструкций, локального нормированного критерия прочности и перерасхода металла в элементах крепи показаны на рис. 2.

В крепи из коробчатого профиля под действием сосредоточенных сил эпюры σ , Ω и $m_{\text{изл}}$ имеют несколько экстремумов (см. рис. 2, а), однако общие показатели эффективности конструкции по сравнению с крепью из СВП той же несущей способности существенно улучшились. Так, локальный нормированный критерий прочности по всей раме не превышает 10,5 (было 16,1), излишек металла на значительной

части контура снижен до 24 % (было не менее 45 %). Интегральные показатели эффективности крепи также улучшились и составили: $K_{з.п} = 1,76$, т. е. сократился в 1,5 раза, перерасход металлопроката по всей крепежной раме $d_{изл} = 43,2$ % (61,5 % для СВП-22), или $m_{изл} = 51,6$ кг. Кроме того, общая масса рамы крепи уменьшилась с 215 до 119,5 кг, или в 1,8 раза. Таким образом, экономия металла на одной раме составила 95,5 кг, или 95,5–191 т на 1 км выработки в зависимости от шага установки крепи.

Несмотря на достаточно высокие показатели эффективности крепи из СВП под действием равномерно распределенной вертикальной нагрузки, замена спецпрофиля коробчатым профилем проката позволила дополнительно их улучшить. Расчет показал (см. рис. 2, б), что общее напряженное состояние элементов крепи, изменение локального нормированного критерия прочности и излишка металла стало более равномерным. Интегральные показатели составили: $K_{з.п} = 1,13$ (уменьшился в 1,1 раза), перерасход металлопроката по всей крепежной раме $d_{изл} = 11,9$ % (19,2 % для СВП-22), или $m_{изл} = 21,8$ кг. Общая масса крепи уменьшилась с 215 до 184 кг (в 1,17 раза), что позволяет сэкономить 31–62 т металла на 1 км выработки.

На базе предложенных показателей Ω , $K_{з.п}$, $d_{изл}$, $m_{изл}$ можно оценить эффективность рамных крепей в конкретных условиях эксплуатации и установить способы оптимизации для улучшения этих показателей. Однако интегральные критерии эффективности $K_{з.п}$ и $d_{изл}$ не позволяют сравнивать крепи с разными параметрами (тип несущего профиля, конструкция узлов податливости), работающие в различных условиях. Поэтому целесообразно ввести параметр работоспособности, учиты-

вающий в обобщенном виде особенности деформационно-силовой характеристики крепи:

$$P_W = PU/m, \quad (6)$$

где P – несущая способность, кН;

U – конструктивная податливость, м;

m – общая масса крепи, кг.

Чем выше параметр работоспособности крепи, тем рациональнее используется металл в конструкции, тем она эффективнее. Физический смысл этого показателя состоит в том, что он, с одной стороны, одновременно учитывает главные параметры конструкции при ее взаимодействии с массивом, т. е. несущую способность и деформируемость в податливом режиме, которые надо максимизировать. С другой стороны, в параметре работоспособности учтен расход материала в конструкции, причем крепь тем эффективнее, чем меньше ее масса. Удобство практического применения этого параметра в том, что входящие в него показатели легко определить при испытании крепи или из ее расчета.

Сравним рассчитанные варианты крепи по показателю работоспособности, считая, что на крепи из трубчатого профиля установлены узлы податливости, подробное описание которых приведено в работе [8]. Такие узлы обеспечивают податливость не менее половины высоты стойки крепи. Для данных расчетов примем податливость крепи из трубчатого профиля $U_{тр} = 500$ мм. Податливость крепи из спецпрофиля СВП составляет 300 мм. Результаты расчетов параметра работоспособности P_W рамных крепей приведены в таблице.

Максимальной работоспособностью обладает крепь из коробчатого профиля под дейст-

Тип профиля	Внешняя нагрузка на крепь		Забутовка	Несущая способность крепи, кН	Масса крепи, кг	Параметр работоспособности
	сосредоточенными силами	равномерно распределенная				
СВП	+	–	Нет	25	215	0,035
СВП	–	+	Есть	220	215	0,31
СВП	–	+	Есть	575	215	0,80
Труба	+	–	Нет	25	119,5	0,10
Труба	–	+	Есть	220	184	0,60
Труба	–	+	Есть	575	184	1,56

вием вертикальной распределенной нагрузки с забутовкой закрепного пространства, спроектированная с учетом принципа равнопрочности. Ее параметр работоспособности почти в 2 раза выше, чем у крепи из СВП, работающей в тех же условиях, и в 45 раз превосходит параметр работоспособности крепи из СВП под действием сосредоточенных сил. Это свидетельствует о том, что эксплуатировать рамную арочную крепь без забутовки, когда на нее действуют сосредоточенные силы, крайне неэффективно. Для обеспечения оптимальной работы рамных арочных крепей горных выработок следует так проектировать их параметры, чтобы они соответствовали конкретным горно-геологическим условиям и особенностям формирования внешней нагрузки на крепь.

Выводы. Для оптимального проектирования рамной крепи необходимо руководствоваться принципом равнопрочности, согласно которому конструкция должна иметь одинаковый запас прочности по изгибающим моментам в опасных сечениях и продольным силам в узлах податливости.

Предложенные локальный нормированный критерий прочности и интегральный критерий эффективности позволяют оценить работу рамной крепи в конкретных условиях нагружения и взаимодействия с массивом, установить запас прочности и эффективность использования металлопроката как в отдельном конструктивном элементе, так и в крепежной раме в целом.

Для повышения эффективности рамной металлической крепи целесообразно применять замкнутый профиль проката прямоугольного очертания. Замена спецпрофиля СВП на трубчатый профиль проката снижает расход металла на 31–95,5 кг на одну раму крепи при сохранении той же несущей способности.

Сравнение рамных арочных крепей, работающих в различных условиях эксплуатации и выполненных из разных типов несущих профилей, с помощью предложенного параметра работоспособности показало, что наиболее эффективна конструкция из коробчатого профиля проката с забутовкой закрепного пространства под действием равномерно распределенной вертикальной нагрузки, у которой работоспособность в 2 раза выше, чем работоспособность такой же крепи из спецпрофиля СВП и в 45 раз превосходит работоспособность крепи из СВП под действием сосредоточенных сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинский Г. Г. Стальные рамные крепи горных выработок / Г. Г. Литвинский, Г. И. Гайко, Н. И. Кулдыркаев. – К.: Техника, 1999. – 216 с.
2. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони: СОУ 10.1.00185790.011:2007. – Офіц. вид. – К.: Мін-во вугіл. пром-ті України, 2007. – 113 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України).
3. Литвинский Г. Г. Исследование предельных состояний рамной крепи / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко // Наук. вестн. НГУ. – Дніпропетровськ, 2013. – № 3. – С. 26–33.
4. Баклашов И. В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – М.: Студент, 2012. – 542 с.
5. Маилян Р. Л. Строительные конструкции: учеб. пособие / Р. Л. Маилян, Д. Р. Маилян, Ю. А. Веселев. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 880 с.
6. Литвинский Г. Г. Оптимальный прокатный профиль для рамной крепи / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко // Вісті Донец. гірн. ін-ту. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – Вып. 1(32). – С. 198–203.
7. Пат. 105728 Україна, МПК Е 21 D 11/14 (2006.01). Кріплення рамно-анкерне з коробчастого профілю / Е. В. Фесенко, Г. Г. Литвинський; заявники і патентовласники Г. Г. Литвинський, Е. В. Фесенко. – № а201306605; заявл. 27.05.13; опубл. 10.06.14, Бюл. № 11.
8. Фесенко Э. В. Разработка узла податливости для крепи из коробчатого профиля / Э. В. Фесенко, Г. Г. Литвинский // Изв. вузов. Горный журнал. – 2016. – № 1. – С. 35–42.