

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАМНЫХ КРЕПЕЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ

*Э.В. Фесенко, Донбасский государственный технический университет, Украина*

Сформулирован принцип равнопрочности рамной крепи. Для оценки эффективности конструкции обоснованы нормированный критерий и интегральный критерий запаса прочности. Разработана методика расчета запаса прочности и эффективности расхода металлопроката в крепи в целом и ее элементах. Предложен локальный критерий и интегральный показатель влияния формы профиля для оптимального проектирования и подбора параметров несущих элементов. Обоснован параметр работоспособности для сравнения различных конструкций крепи.

Рамная металлическая податливая крепь – самая распространенная конструкция крепи на шахтах Украины. В настоящее время ей закреплено около 90% всех горных выработок. При этом на каждый километр протяженности в среднем необходимо затратить 300-350 т металлопроката, а в структуре себестоимости угля часть затрат, связанная с креплением и поддержанием выработок составляет 7...15%.

Увеличение глубины разработки угольных месторождений приводит к усложнению горно-геологических условий и повышению интенсивности горного давления, неравномерности смещений пород и формирования нагрузки на крепь, особенно в зоне влияния очистных работ. В таких условиях типовые методы проектирования и существующие конструкции металлической крепи оказываются неэффективными, что подтверждается шахтными инструментальными замерами и наблюдениями за состоянием крепи. Так, ежегодные объемы перекреплений составляют около 15% от протяженности поддерживаемых выработок [1]. Переход на использование «тяжелых» профилей СВП-27 и 33 в рамных крепях и увеличение плотности установки до 2 и более рам/м повысили расход металла до 600...700 т/км, однако не привели к существенному повышению надежности и устойчивости поддерживаемых выработок. В то же время нередки случаи завышенного запаса прочности отдельных элементов конструкции, что приводит к необоснованному перерасходу металла.

Поэтому в большинстве горных выработок (60...70%) [1], поддерживаемых рамной металлической крепью, особенно на глубинах свыше 800 м, наблюдается несоответствие между ее напряженным состоянием и запасом прочности узлов и элементов, что приводит к перерасходу или неэффективному использованию металлопроката. Это происходит из-за того, что для расчета крепи используются упрощенные методы, регламентированные нормативными документами [2], а выбор параметров ограничен типовыми конструкциями рамной крепи, большинство из которых разработаны в середине прошлого века. Кроме того, не существует методов оценки эффективности и работоспособности рамных конструкций крепи для анализа их параметров и конструктивных элементов с целью рационального проектирования.

В связи с этим сохраняет актуальность проблема разработки метода оценки эффективности работы рамной конструкции крепи в различных условиях эксплуатации на основе анализа ее напряженно-деформированного состояния для обеспечения оптимального проектирования и рационального использования металла с учетом принципа равнопрочности элементов [3,4].

**Цель исследований** – изучить закономерности изменения напряженного состояния, запаса прочности и перерасхода материала в элементах крепи и оценить эффективность ее работы в зависимости от характера действующей нагрузки и контактных условий взаимодействия конструкции с массивом. **Объектом** исследований является металлическая рамная крепь, а **предмет исследований** – изменение напряженного состояния ее элементов и показателей эффективности работы в зависимости от условий нагружения. **Задачи исследований** –

разработать критерии оптимальности и эффективности работы элементов рамной крепи и методику обоснования рациональных ее параметров на основе принципа равнопрочности. **Основная идея** исследований состоит в обеспечении принципа равнопрочности элементов крепи при её проектировании, а также оценке эффективности работы крепи по степени нагруженности ее элементов и рациональному использованию крепежного материала.

При расчете несущей способности и выборе элементов рамных конструкций [5], в том числе и рамных крепей горных выработок [6], необходимо определить внутренние силовые факторы (продольные и поперечные силы, изгибающие моменты), построить соответствующие эпюры их распределения в элементах конструкции, выявить опасные сечения по каждому из силовых факторов. Затем на основании расчета предельных значений усилий в опасных сечениях элементов производят подбор их размеров, либо для известных параметров конструкции определяют ее предельную несущую способность в зависимости от вида действующих нагрузок.

Расчет и выбор прочных размеров элементов рамных крепей производится по напряжениям, возникающим в самом опасном сечении, при этом параметры несущего профиля (тип, сечение), как правило, принимаются одинаковыми для всей конструкции, что приводит к неэффективному использованию металла, поскольку часть контура рамы, в зависимости от вида внешней нагрузки, оказывается недогруженной.

Следует обратить внимание, что крепи подземных горных выработок в процессе своей 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 соответствующих контактных задач теории упругости. Поэтому расчеты напряженного состояния и несущей способности подземных крепей по своей сложности не сопоставимы с расчетами обычных строительных конструкций.

Решение данной проблемы возможно с помощью численного моделирования. В работе [3] с использованием метода конечных элементов с помощью программы Лира выполнены исследования закономерностей изменения несущей способности арочной металлической крепи в зависимости от параметров внешнего нагружения, контактных условий ее взаимодействия с массивом и жесткости забутовки. Особенностью расчетов является учет взаимодействия крепи с окружающим массивом в виде так называемого пассивного (реактивного) отпора пород, что заметно усложняет расчёт крепи и редко учитывается в существующих методах расчёта.

Работа податливой конструкции крепи рассмотрена на двух стадиях – 1) до срабатывания узлов податливости и 2) после их срабатывания. В первом случае крепь работает как упругая конструкция в режиме заданных нагрузок («мягкое» нагружение). Во второй стадии происходит срабатывание и проскальзывание элементов крепи в узлах податливости, а крепь работает в режиме заданных деформаций («жёсткое» нагружение).

Модель арочной крепи подвергалась действию двух видов нагрузок:

- вертикальной сосредоточенной силы, приложенной к вершине, как случай предельно неблагоприятного нагружения;
- вертикальной распределённой нагрузки, что является типичной расчетной схемой при проектировании крепи.

Очевидно, что потеря устойчивости или разрушение крепи происходит в случае, когда напряжения в наиболее опасном сечении крепи от изгибающего момента  $M$  и нормальной силы  $N$  превысят предел прочности стали.

Для элементов крепи следует учесть совместное действие в сечении изгибающих моментов и продольных сжимающих сил. При этом суммарные напряжения от нормальной силы  $N$  и от изгибающего момента  $M$  в опасном сечении крепи не должны превосходить расчетного сопротивления  $R_y$  (предела текучести стали) [7]:

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

где  $W$  – момент сопротивления сечения, см<sup>3</sup>;

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

$\varphi$  – коэффициент продольного изгиба [7];

$A$  – площадь поперечного сечения профиля, см<sup>2</sup>;

$R_y$  – расчётное 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 ( $N = N_k$ , когда срываются узлы податливости и крепь переходит в податливую стадию работы).

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

Исходя из этого, можно сформулировать **условие оптимального проектирования** рамной податливой крепи. Оно основано на анализе возможных предельных состояний двух типов: предельная нагрузка на крепь  $P$  лимитируется либо сопротивлением  $N_k$  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 её сечении. Этот принцип позволяет сформулировать критерии оптимальности рамной податливой крепи:

$$K_{o1} = \frac{P_M}{P_N} \rightarrow 1 \text{ при } K_{o2} = \frac{P_k}{m_k} \rightarrow \max, \quad (2)$$

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 значение из  $P_M$  и  $P_N$ );

$m_k$  – масса одной крепежной рамы.

В проведенных расчетах несущая способность крепи и оптимальное сопротивление узлов податливости определялись 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  $\sigma$  любого сечения крепи определяется выражением (1). Разделив допустимое напряжение  $R_y$  на действующее  $\sigma$ , получим запас прочности в данном сечении, т. е.

$$\Omega = \frac{R_y}{\sigma} = R_y \cdot \frac{W \cdot A \cdot \varphi \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{M \cdot \varphi \cdot A \cdot \gamma_{c2} + N \cdot W \cdot \gamma_{c1}}. \quad (3)$$

Значение  $\Omega$  имеет смысл локального нормированного критерия прочности (ЛНКП) и показывает, во сколько раз действующие в сечении напряжения меньше предельных.

С помощью предложенного критерия  $\Omega$  (ЛНКП) можно оценить, насколько эффективно используется металл в конструкции крепи при данных условиях ее нагружения и взаимодействия с массивом. Для этого необходимо проинтегрировать ЛНКП по всему периметру крепежной рамы для определения коэффициента запаса прочности:

$$K_{3.n.} = \frac{\int_0^l \Omega(s) \cdot ds}{l}, \quad (4)$$

где  $K_{з.п.}$  – интегральный коэффициент запаса прочности крепежной рамы;

$l$  – периметр рамы крепи, м.

Используя выражение (4) можно рассчитать коэффициент  $K_{з.п.}$  как для всей рамы в целом, так и для отдельных ее элементов, считая  $l$  длиной анализируемого элемента или участка крепежной рамы.  $K_{з.п.}$  показывает, во сколько раз запас прочности конструкции или ее элемента выше требуемого. С помощью этого коэффициента можно оценить степень эффективности использования материала в конструкции. Так, конструкция тем эффективнее, чем ближе  $K_{з.п.}$  к единице. Таким образом, коэффициент  $K_{з.п.}$  имеет смысл **критерия эффективности** рамной конструкции, т. е. необходимо стремиться  $K_{з.п.} \rightarrow 1$  при  $\Omega(s) \geq 1$  по всему периметру крепи.

Излишек материала (неэффективно используемую часть) конструкции можно определить из выражения:

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

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

$m_k$  – масса конструкции или ее элемента.

Нами произведены расчеты напряженного состояния крепи, ЛНКП и интегрального коэффициента запаса прочности  $K_{з.п.}$  и определена эффективность использования материала в арочной металлической крепи размерами: ширина арки  $2a = 5$  м, высота  $2b = 3,5$  м, радиус дуги верхняка  $r = 2,5$  м, несущий профиль СВП-22, для двух вариантов ее работы: 1 – крепь без забутовки, нагруженная вертикальной сосредоточенной силой; 2 – крепь с забутовкой закрепного 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 разбита на участки, длиной 10 см, в пределах каждого из которых определены средние значения изгибающих моментов  $M_i$ , продольных сил  $N_i$ , рассчитаны напряжения  $\sigma_i$  по формуле (1), ЛНКП  $\Omega_i$  (3) и перерасход металла  $m_{изл.i}$  (5). Затем определены интегральные показатели  $K_{з.п.}$  и  $m_{изл.}$  по всей раме крепи. Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2.

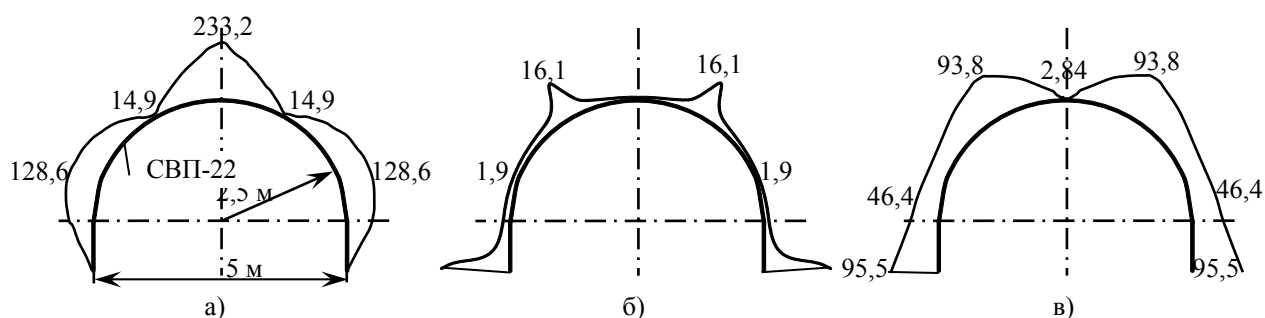


Рис. 1. Эпюры напряжений  $\sigma$ , МПа (а) ЛНКП  $\Omega$  (б) и излишка металла  $m_{изл.}$ , % (в) по контуру рамной крепи при действии сосредоточенной силы

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 3 экстремума: в месте приложения нагрузки (233,2 МПа) и боках выработки (128,6 МПа) (рис. 1, а). Эпюра ЛНКП  $\Omega$  имеет пики ( $\Omega = 16,1$ ) на участках расположения узлов податливости (рис. 1, б),

где действуют минимальные изгибающие моменты и возникают минимальные напряжения ( $\sigma = 14,9$  МПа). Прочность крепи здесь в 16,1 раза выше требуемой, что приводит к пропорциональному перерасходу металлопроката на этих участках.

Для данной схемы загрузки излишек стали в ее элементах почти по всему контуру выше 45%, достигая на некоторых участках 90% и более (рис. 1, в). 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 в очередной раз доказывает, что эксплуатировать рамную крепь без забутовки, когда на нее действуют 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:  $K_{з.н.} = 2,6$ , т.е. явно завышен, перерасход металлопроката по всей крепежной раме составляет  $d_{изл.} = 61,5$  % или  $m_{изл.} = 131,9$  кг (при массе всей рамы  $m_k \approx 215$  кг). Таким образом, можно говорить о том, что при таких условиях эксплуатации крепи эффективно используется лишь 38,5 % ее материала.

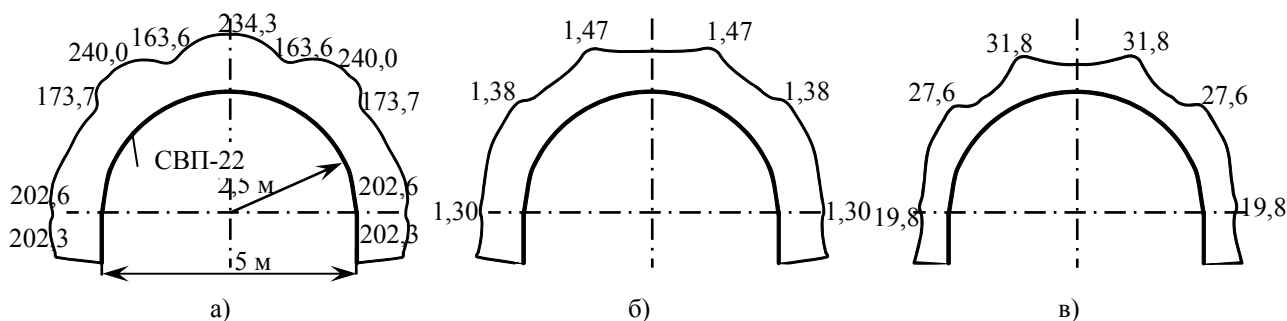


Рис. 2. Эпюры напряжений  $\sigma$ , МПа (а) ЛНКП  $\Omega$  (б) и излишка металла  $m_{изл.}$ , % (в) по контуру рамной крепи при действии распределенной нагрузки

При наличии забутовки и нагружении крепи распределенной нагрузкой эпюры напряжений  $\sigma$ , ЛНКП  $\Omega$  и излишка материала  $d_{изл.}$  по контуру рамы изменяются более плавно (рис. 2). Напряжения в элементах крепи колеблются от  $\sigma = 163,6$  МПа до 240 МПа, а ЛНКП соответственно от  $\Omega = 1,47$  до 1,0. Максимальное напряженное состояние элементов крепи ( $\sigma = 240,0$  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, применяемым в таких крепях. Излишек стали в элементах крепи не превышает 32 % на некоторых участках контура.

Интегральные показатели эффективности крепи для данной расчетной схемы:  $K_{з.н.} = 1,24$ , что значительно ближе к оптимальному значению, чем в предыдущем случае; перерасход металлопроката по всей крепежной раме составляет  $d_{изл.} = 19,2$  % или  $m_{изл.} = 41,1$  кг. Значит, в таких условиях эксплуатации та же крепь работает более эффективно.

Однако, необходимо отметить, что оценка конструкции произведена для оптимальных условий, когда соблюдается принцип равнопрочности ее элементов. Для этого крепь должна быть оснащена узлами податливости с рабочим сопротивлением не менее  $N_o = 320$  кН, что обеспечит ее несущую способность  $P_o = 575$  кН. Серийные узлы податливости рамных арочных крепей из спецпрофиля СВП-22 способны обеспечить сопротивление крепи в податливом режиме  $P = 220$  кН [2]. Пересчет интегральных показателей крепи на паспортную несущую способность дает следующие результаты:  $K_{з.н.} = 3,23$ , перерасход металлопроката по всей крепежной раме составляет  $d_{изл.} = 69$  % или  $m_{изл.} = 148$  кг. Как

видим, показатели эффективности резко ухудшились, даже по сравнению с крепью 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 ее элементов.

Напряженное состояние любого сечения конструкции определяется выражением (1), которое можно записать в виде  $\sigma = \sigma_M + \sigma_N$ . Соотношение между  $\sigma_M$  и  $\sigma_N$  зависит от внешнего нагружения и контактных условий взаимодействия крепи с массивом. Преобладающим видом внутренних усилий в конструкции могут быть изгибающие моменты  $M$  или продольные сжимающие усилия  $N$ .

Анализ напряженного состояния конструкции крепи в целом и отдельных ее элементов необходим для определения вида преобладающих внутренних усилий, что, в свою очередь, позволит установить эффективные параметры несущего профиля при минимальных затратах материала.

Введем понятие локального критерия формы профиля ( $LK\Phi$ ), разделив напряжения, создаваемые изгибающими моментами  $\sigma_M$ , на суммарные напряжения в сечении  $\sigma$ :

$$LK\Phi = \frac{\sigma_M}{\sigma}. \quad (6)$$

$LK\Phi$  может принимать значения от 0 до 1 и показывает, на сколько форма несущего профиля влияет на суммарные напряжения  $\sigma$ . При  $LK\Phi = 0$ , напряжения в сечении создаются только продольными силами (центральное сжатие) и его прочность зависит исключительно от площади сечения металла  $A$ . Когда  $LK\Phi = 1$ , в сечении действует только изгибающий момент (чистый изгиб), а на прочность влияет момент сопротивления  $W$ . Это значит, что на напряженное состояние элемента в данном случае в большей степени оказывает влияние форма несущего профиля, а не его площадь. При  $LK\Phi = 0,5$ , вклад в суммарные напряжения  $\sigma$  изгибающих моментов и продольных сил одинаков.

Для оценки конструкции в целом или отдельного ее элемента необходимо проинтегрировать  $LK\Phi$  по всему периметру крепежной рамы (длине элемента):

$$K_\phi = \frac{\int_0^l LK\Phi(s) ds}{l}, \quad (7)$$

где  $K_\phi$  – интегральный показатель влияния формы профиля;

$l$  – периметр рамы или длина элемента крепи, м.

Анализ  $K_\phi$  позволяет перейти к эффективному проектированию и подбору элементов рамных крепей. При  $K_\phi > 0,5$ , для уменьшения массы соответствующего элемента крепи и повышения эффективности его работы необходимо принять профиль с максимальным моментом сопротивления  $W_{max}$  при минимальной массе  $A_{min}$ . Такими характеристиками обладают замкнутые профили проката прямоугольного очертания, вытянутые в плоскости действия изгибающих моментов, которые могут быть использованы в конструкциях рамных крепей [8]. При  $K_\phi < 0,5$ , в основном на напряженное состояние элемента влияет не форма, а площадь его поперечного сечения. В таких условиях можно использовать профили меньших геометрических размеров при отсутствии значительных крутящих моментов.

Результаты расчета  $LK\Phi$  по контуру крепи и  $K_\phi$  для рассмотренных двух вариантов нагружения представлены на рисунке 3.

При действии на крепь сосредоточенных сил и отсутствии забутовки закрепного пространства напряжения в сечениях ее элементов вызваны преимущественно изгибающими моментами.  $LK\Phi$  по всему контуру крепи превышает 0,63, доходя до 0,99 в месте приложения внешней нагрузки (рис. 3, а). Интегральный показатель  $K_\phi$  составил 0,89.

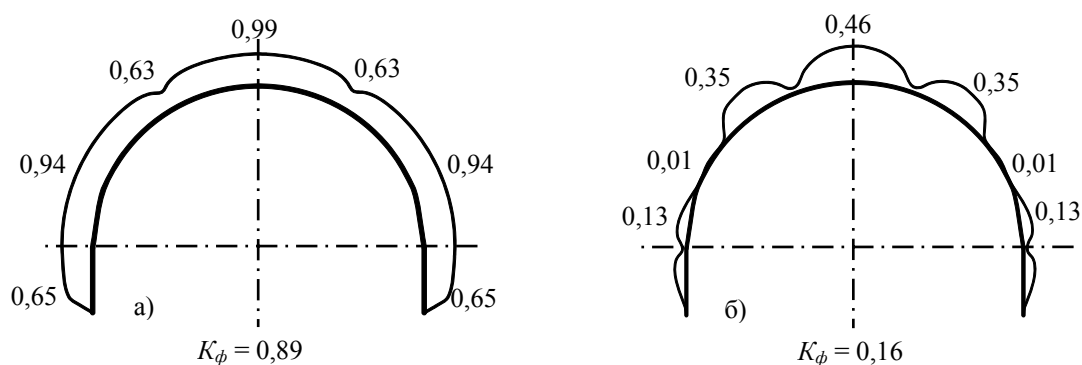


Рис. 3. Эпюры локального критерия формы ( $LKF$ ) по контуру рамной крепи: а) – крепь без забутовки при сосредоточенной силе; б) – крепь с забутовкой под действием равномерно распределенной нагрузки

Внешняя нагрузка в виде распределенных сил с забутовкой закрепного пространства вызывает в элементах крепи преимущественно продольные сжимающие усилия.  $LKF$  по контуру рамы распределен неравномерно, однако его максимальное значение не превышает 0,46 (рис. 3, б). На некоторых участках контура  $LKF$  падает до 0,01, что говорит о том, что напряжения  $\sigma$  в соответствующих элементах крепи возникают от действия только продольных усилий при отсутствии изгибающих моментов. Интегральный показатель  $K_\phi = 0,16$ .

Анализ напряженного состояния крепи и интегрального показателя влияния формы поперечного сечения  $K_\phi$  позволяет перейти к проектированию рациональных параметров рамы.

Как показывают проведенные исследования, часто значительный периметр контура крепи оказывается недогруженным, в то время как на некоторых его участках напряжения близки к предельным (рис. 1). В таких условиях для повышения эффективности использования металла крепи следует проектировать конструкции с различными характеристиками профилей на различных участках крепи. Это возможно при использовании в качестве несущего замкнутого прямоугольного профиля проката (прямоугольной трубы).

Исходя из вышеизложенного, одним из возможных вариантов повышения эффективности крепи под действием сосредоточенных сил и отсутствии забутовки, может быть следующее решение. Проектируем в качестве несущего замкнутый профиль прямоугольного очертания с высокими характеристиками сопротивления изгибу, учитывая расчет  $LKF$  и  $K_\phi$ , т.е.  $W \rightarrow \max$  при  $A \rightarrow \min$ . Для различных участков периметра крепи целесообразно принять разный типоразмер профиля. Его стыковка производится с помощью разработанных нами конструкций узлов, позволяющих обеспечить надежное соединение отдельных элементов [9]. Приняты следующие типоразмеры профилей: прямая часть стоек:  $90 \times 60 \times 4$   $W = 26,11 \text{ см}^3$ ,  $A = 10,95 \text{ см}^2$ ; арочный свод:  $120 \times 90 \times 4$   $W = 53,58 \text{ см}^3$ ,  $A = 15,75 \text{ см}^2$ ; в центре свода для обеспечения повышенного сопротивления крепи изгибающим моментам установлен элемент усиления способом «труба в трубе» длиной 75 см с параметрами:  $140 \times 100 \times 2,5$   $W = 53,58 \text{ см}^3$ ,  $A = 15,75 \text{ см}^2$ .

Для крепи под действием равномерно распределенной нагрузки предложены следующие параметры: прямая часть стоек:  $150 \times 90 \times 5$   $W = 88,88 \text{ см}^3$ ,  $A = 22,4 \text{ см}^2$ ; арочный свод:  $160 \times 100 \times 5$   $W = 105,23 \text{ см}^3$ ,  $A = 24,36 \text{ см}^2$ .

На рисунках 4, 5 показаны результаты расчета напряженного состояния предложенных конструкций, ЛНКП и перерасхода металла в элементах крепи.

В крепи из коробчатого профиля под действием сосредоточенных сил эпюры  $\sigma$ ,  $\Omega$  и  $m_{изл.}$  имеют несколько экстремумов (рис. 4), но несмотря на это, общие показатели эффективности конструкции по сравнению с крепью из СВП той же несущей способности

существенно улучшились. Так, ЛНКП  $\Omega$  по всей раме не превышает 10,5 (было 16,1), излишек металла на значительной части контура снижен до 24 % (было не менее 45 %).

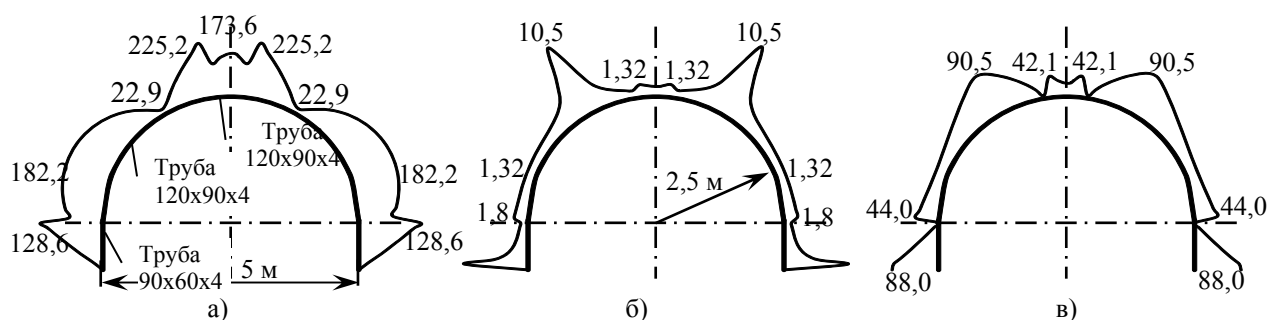


Рис. 4. Эпюры напряжений  $\sigma$ , МПа (а) ЛНКП  $\Omega$  (б) и излишка металла  $m_{изл.}$ , % (в) по контуру рамной крепи из коробчатого профиля при действии сосредоточенной силы

Интегральные показатели эффективности крепи также улучшились и составили:  $K_{з.н.} = 1,76$ , т.е. сократился в 1,5 раза, перерасход металлопроката по всей крепежной раме составляет  $d_{изл.} = 43,2$  % (61,5 % для СВП-22) или  $m_{изл.} = 51,6$  кг. Кроме того, следует обратить внимание, что масса всей рамы крепи уменьшилась с 215 кг 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 каждый километр выработки в зависимости от шага установки крепи.

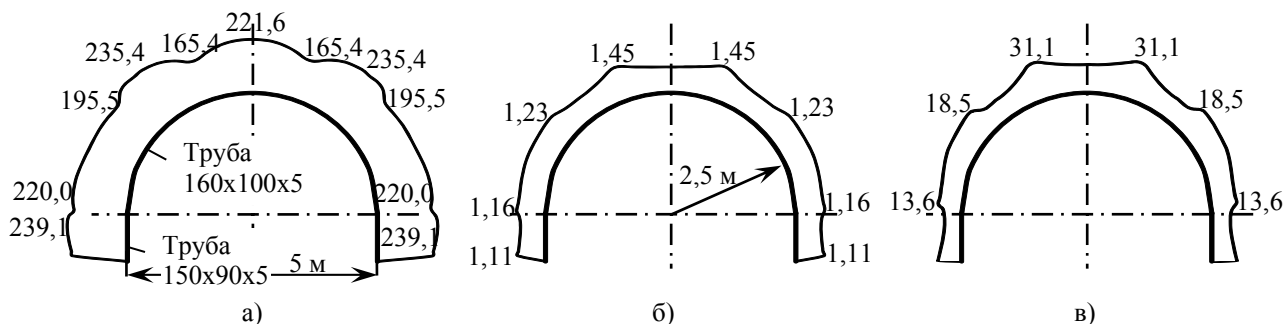


Рис. 5. Эпюры напряжений  $\sigma$ , МПа (а) ЛНКП  $\Omega$  (б) и излишка металла  $m_{изл.}$ , % (в) по контуру рамной крепи из коробчатого профиля при действии распределенной нагрузки

Несмотря на достаточно высокие показатели эффективности крепи из СВП под действием равномерно распределенной вертикальной нагрузки, замена спецпрофиля коробчатым профилем проката позволила обеспечить дополнительное их улучшение. Расчет показал (рис. 5): общее напряженное состояние элементов крепи, изменение ЛНКП и излишка металла стало более равномерным. Расчет интегральных показателей дает:  $K_{з.н.} = 1,13$  (уменьшился в 1,1 раза), перерасход металлопроката по всей крепежной раме составляет  $d_{изл.} = 11,9$  % (19,2 % для СВП-22) или  $m_{изл.} = 21,8$  кг. Общая масса крепи уменьшилась с 215 кг до 184 кг или в 1,17 раза, что дает экономию металла 31...62 т/км выработки.

Предложенные показатели  $\Omega$ ,  $K_{з.н.}$ ,  $d_{изл.}$ ,  $m_{изл.}$ , ЛКФ дают возможность оценить эффективность рамных крепей в конкретных условиях их эксплуатации и установить способы оптимизации для улучшения этих показателей. Однако интегральные критерии эффективности  $K_{з.н.}$  и  $d_{изл.}$  не позволяют производить сравнение конструкций, работающих в разных условиях. Так, критерий  $K_{з.н.}$  для крепи из СВП под действием сосредоточенной силы оказался ближе к оптимальному значению, чем этот же критерий для крепи из СВП



нормативной несущей способности под действием распределенной нагрузки с забутовкой закрепного пространства ( $K_{з.н.1} = 2,6$ ;  $K_{з.н.2} = 3,23$  при  $K_{з.н.онм} = 1$ ), хотя несущая способность крепи во втором случае на порядок выше, чем в первом. Поэтому для сравнения различных конструкций крепи целесообразно ввести параметр работоспособности  $\Pi_w$ , который позволяет учитывать в обобщенном виде особенности деформационно-силовой ее характеристики, – величину несущей способности  $P$ , кН и конструктивной податливости  $U, м$ , отнесенные к общей массе крепи  $m$ , кг:

$$\Pi_w = \frac{P \cdot U}{m}, \frac{кН \cdot м}{кг}. \quad (8)$$

Чем выше параметр работоспособности крепи  $\Pi_w$ , тем более рационально используется металл в ее конструкции, тем она эффективнее. Физический смысл этого показателя состоит в том, что он одновременно отражает главные параметры конструкции при ее взаимодействии с массивом, т.е. несущую способность и деформируемость в податливом режиме, которые надо максимизировать. С другой стороны, в показателе  $\Pi_w$  учтен расход материала в конструкции, причем крепь тем эффективней, чем меньше ее масса. Удобство практического применения показателя  $\Pi_w$  для крепи разных конструкций состоит в том, что входящие в него параметры легко определяются из испытаний крепи или ее расчета.

Сравним рассчитанные варианты крепи по показателю работоспособности (8), при этом считаем, что на крепи из трубчатого профиля установлены узлы податливости, подробное описание которых приведено в работе [10]. Такие узлы обеспечивают податливость не менее половины высоты стойки крепи, для данных расчетов примем  $U_{тр} = 500$  мм. Податливость крепи из спецпрофиля СВП  $U_{сп} = 300$  мм. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Табл. 1 Расчет показателя работоспособности  $\Pi_w$  рамных крепей.

Тип профиля	Внешняя нагрузка		Забутовка	Несущая способность, кН	Масса крепи, кг	$\Pi_w$
	Сосредоточенная сила	Равномерно распределенная				
СВП	+	-	нет	25	215	0,035
СВП	-	+	есть	220	215	0,31
СВП	-	+	есть	575	215	0,8
Труба	+	-	нет	25	119,5	0,1
Труба	-	+	есть	220	184	0,6
Труба	-	+	есть	575	184	1,56

Максимальной работоспособностью обладает крепь из коробчатого профиля под действием вертикальной распределенной нагрузки с забутовкой закрепного пространства, спроектированная с учетом принципа равнопрочности. Ее показатель  $\Pi_w$  почти в два раза выше, чем у крепи из СВП в тех же условиях и в 45 раз превосходит показатель работоспособности крепи из СВП под действием сосредоточенных сил. Это в очередной раз доказывает, что эксплуатировать рамную арочную крепь без забутовки, когда на нее действуют сосредоточенные силы, крайне неэффективно. Для обеспечения оптимальной работы рамных арочных крепей горных выработок необходимо так проектировать их параметры, чтобы они соответствовали конкретным горно-геологическим условиям и особенностям формирования внешней нагрузки на крепь.

#### Выводы.

1. 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.

2. Предложенные локальный нормированный критерий прочности  $\Omega$  (ЛНКП) и интегральный критерий эффективности  $K_{з.н.}$  позволяют оценить работу рамной крепи в

конкретных условиях ее нагружения и взаимодействия с массивом, установить запас прочности и эффективность использования металлопроката как в отдельном конструктивном элементе, так и в крепежной раме в целом.

3. Показатели эффективности работы металлической рамной арочной крепи находятся на недопустимо низком уровне: при ее нагружении сосредоточенными силами из-за возникновения высоких изгибающих моментов в элементах крепи (перерасход металла  $d_{изл.} = 61,5 \%$ ), а при действии равномерно распределенной нагрузки – из-за несоблюдения принципа равнопрочности, что приводит к высокой степени недогруженности несущих элементов ( $d_{изл.} = 69 \%$ ).

4. Анализ напряженного состояния крепи с помощью локального критерия формы ( $LK\Phi$ ) и интегрального показателя влияния формы профиля  $K_\phi$  позволил обосновать применение замкнутого профиля проката прямоугольного очертания для повышения ее эффективности. Замена спецпрофиля СВП на трубчатый профиль проката снижает расход металла на одну раму крепи от 31 до 95,5 кг при сохранении той же несущей способности.

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

#### Список литературы

1. Литвинский Г.Г. Стальные рамные крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Г.И. Гайко, Н.И. Кулдыркаев. – К.: Техника, 1999. – 216 с.
2. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. — Прийнято та надано чинності: наказ Мінвуглепрому України від 09.01.07 № 494. — К.: Мінвуглепром України, 2007. — 113 с.
3. Литвинский Г.Г. Исследование предельных состояний рамной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2013. – №3. – С. 26 – 33.
4. Литвинский Г.Г. Обоснование выбора предельной несущей способности рамной арочной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Уголь Украины. – 2013. – №4. – С. 3 – 7.
5. Баклашов И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия — М.: Студент, 2012. 542 с.
6. Баклашов И.В. Строительные конструкции зданий и сооружений горных предприятий. / И.В. Баклашов, В.Н. Борисов — М.: Недра, 1985. 263 с.
7. Маилян Р.Л. Строительные конструкции: Учебное пособие / Р.Л. Маилян, Д.Р. Маилян, Ю.А. Веселев. Изд. 2-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 880 с.
8. Литвинский Г.Г. Оптимальный прокатный профиль для рамной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – Вып. 1(32). – С. 198 – 203.
9. Пат. 105728 Україна, МПК Е 21 D 11/14 (2006.01). Кріплення рамно-анкерне з коробчастого профілю / Литвинський Г.Г., Фесенко Е.В.; заявл. 27.05.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11 – 6 с.
10. 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.