

*д.т.н. Литвинский Г.Г.,
к.т.н. Фесенко Э.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТАЛЬНОЙ АРОЧНОЙ КРЕПИ ПРИ ЕЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Досліджено роботу сталевого аркового кріплення при його позамежному деформуванні. Виконаний аналіз послідовного утворення пластичних шарнірів при зростанні гірського тиску. Вивчено розподіл внутрішніх зусиль та виникнення небезпечних перерізів у кріпленні в залежності від жорсткості забутовки. Надані рекомендації щодо підвищення надійності та роботоспроможності кріплення.

Ключові слова: *рамне кріплення, несуча спроможність, позамежне деформування, пластичний шарнір, жорсткість забутовки.*

Исследована работа стальной арочной крепи при ее предельном деформировании. Выполнен анализ последовательного образования пластических шарниров при возрастании горного давления. Изучено распределение внутренних усилий и возникновение опасных сечений в крепи в зависимости от жесткости забутовки. Даны рекомендации по повышению надежности и работоспособности крепи.

Ключевые слова: *рамная крепь, несущая способность, предельное деформирование, пластический шарнир, жесткость забутовки.*

В основу существующих нормативных методик расчета крепи [1-5] положен упрощенный подход, не предусматривающий определения предельных внутренних усилий в крепи (продольных, поперечных сил, изгибающих моментов). В этих методиках априори задают её паспортную несущую способность как постоянную величину, независимо от условий контакта с массивом и характера приложенной нагрузки, что может привести к грубым ошибкам проектирования. В результате менее половины крепей выработок (около 30-40%) соответствуют горно-геологическим условиям, а в остальных 60-70% выработок наблюдаются негативные последствия проектных ошибок, связанных либо с переоценкой работоспособности конструкции (15-20%), либо с принятием крепи с излишним запасом прочности (40-50%) [6].

Как правило, расчет крепи по нормативным методикам [1-5] и даже с использованием более сложных подходов сопрямата и строительной механики [7 и др.] производят по первому предельному состоянию, когда максимально допустимой

считают нагрузку в опасном сечении от предельных изгибающего момента $[M]$ и продольной силы $[N]$. По умолчанию считается, что дальнейшее увеличение нагрузки недопустимо, поскольку приводит к разрушению крепи и потере ею несущей способности.

Однако опыт эксплуатации крепи и многочисленные длительные шахтные наблюдения показали, что рама крепи не разрушается внезапно (при условии надежности замковых соединений). Даже при возникновении на отдельных участках «пластических шарниров», крепь может сохранять работоспособное состояние, а иногда даже увеличить свою несущую способность. Это зависит в основном от условий взаимодействия крепи и массива горных пород: размеры закрепного пространства, наличие и качество забутовки, типа и распределения действующей нагрузки и т.д. Состояние крепи после достижения в одном из ее опасных сечений предельных момента и продольной силы считают недопустимым. Все существующие методики расчета стальных рамных

крепей не позволяют оценить несущую способность и ее возможный резерв при переходе крепи в стадию запредельного деформирования, когда, несмотря на исчерпание прочности в наиболее нагруженных сечениях, крепь сохраняет или даже увеличивает свою несущую способность.

В связи с этим весьма актуальной является проблема изучения работы различных конструкций крепи при запредельном их деформировании в условиях интенсивного проявления горного давления для разработки надежных и научно обоснованных методов расчета подземных крепей.

Цель исследований состоит в изучении особенностей запредельного деформирования горной крепи, установлении закономерностей изменения ее несущей способности при переходе в запредельные стадии деформирования с учетом характера действующей нагрузки и контактных условий взаимодействия с массивом горных пород. **Объектом** исследований является стальная арочная крепь, а **предмет исследований** – несущая способность крепи после достижения предельного состояния и перехода в запредельную стадию. **Задача исследований** – оценить изменение несущей способности крепи при ее запре-

дельном деформировании. **Основная идея** исследований состоит в учете последовательного изменения расчетной схемы крепи по мере исчерпания несущей способности отдельных ее опасных по разрушению сечений и участков и оценке остаточной работоспособности конструкции. Здесь под несущей способностью крепи понимается предельная нагрузка, которую может выдержать крепь при данной схеме нагружения.

Для решения поставленной задачи следует установить зависимости распределения усилий в крепи от контактных условий на границе с массивом горных пород, последовательность смены стадий запредельного деформирования, оценить работоспособность конструкции на каждой стадии.

Рассмотрим идеализированную расчетную схему крепи, считая внешнюю нагрузку симметричной, статической и направленной вертикально вниз. Эти идеализации не слишком сказываются на оценке реальной работоспособности крепи. Расчетная схема рамной крепи КМП (рис. 1) принята в виде двухшарнирной циркулярной арки, у которой нижние узлы 1,2 стоек крепи опираются на почву выработки как неподвижные шарниры.

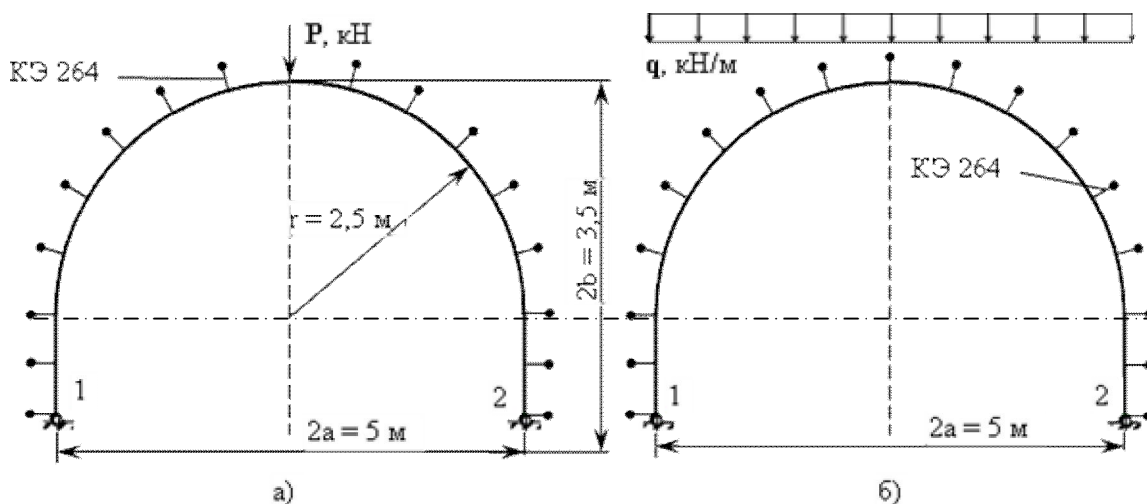


Рисунок 1 – Расчетные схемы арочной крепи при нагружении:
а) вертикальной сосредоточенной силой P ;
б) вертикальной распределенной нагрузкой q .

Расчеты выполнены с использованием метода конечных элементов с помощью программы Лира [8]. Для моделирования пассивного (реактивного) отпора пород использовали нелинейные конечные элементы (КЭ 264), которые обеспечивают одностороннюю упругую связь заданной жёсткости R [8]. При решении задачи для учета пассивного отпора коэффициент постели закрепного материала меняли в пределах $c = 0 \dots 500$ МПа/м, а значение коэффициента трения между породой и крепью принимали равным $f = 0,3$. Подробное описание расчетной схемы и обоснование параметров используемых в ней конечных элементов дано в работе [9].

Рассматривались два предельных случая нагружения рамной крепи: вертикальной сосредоточенной силой P и распределенной нагрузкой интенсивности q , все остальные возможные случаи нагружения крепи по своей опасности находятся между этими крайними случаями.

При постепенном возрастании внешней нагрузки P (q) крепь вначале деформируется упруго, а ее внутренние усилия M , N , Q линейно возрастают и в наиболее опасном сечении становятся предельными. При этом считаем, что если замки податливости исчерпали свою конструктивную податливость, то крепь перешла в жесткий режим работы. В предельном состоянии суммарные напряжения σ в опасных сечениях равны расчетному сопротивлению R (пределу текучести стали) [10]:

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

где W – момент сопротивления сечения, см³;

R – расчетное сопротивление стали, взятое по пределу текучести, МПа ($R = 240$ МПа);

φ – коэффициент продольного изгиба, зависящий от гибкости элемента и определяемый в соответствии со СНиП II-23-81* Стальные конструкции [11];

A – площадь поперечного сечения профиля, см²;

γ_{c1} , γ_{c2} – соответственно коэффициенты условий работы для изгибаемых и центрально сжатых элементов.

Различаем четыре характерных случая нагружения стальной арочной крепи:

1) сосредоточенная сила, приложенная в центре свода крепи без забутовки закрепного пространства, когда $c = 0$ (рис. 1, а);

2) то же, но с «рыхлой» забутовкой – $c = 25$ МПа/м;

3) вертикальная равномерно распределенная нагрузка без забутовки (рис. 1, б);

4) то же, но с «рыхлой» забутовкой.

Случай 1. При нагружении крепи сосредоточенной силой опасное сечение 1 находится в вершине арки непосредственно под приложенной силой (рис. 2, а). При этом допустимый изгибающий момент в опасном сечении с учетом нормальной силы N согласно (1) составляет $[M_I] = 14,21$ кН·м. Исходя из этого, несущая способность крепи $[P_I] = 25,1$ кН. Эта нагрузка соответствует наступлению предельного состояния крепи.

При дальнейшем увеличении нагрузки $P > 25,1$ кН, крепь переходит в запредельную стадию работы за счет пластического деформирования спецпрофиля. Поскольку сталь – пластичный материал, будем считать, что в опасном сечении не происходит хрупкого разрушения, а возникает так называемый «пластический шарнир». Это значит, что металл здесь не может оказывать сопротивление больше предельного, когда спецпрофиль выдерживает фиксированный изгибающий момент, в данном случае $[M_I] = 14,21$ кН·м.

Для дальнейшего решения задачи необходимо внести изменения в расчетную схему с учетом перераспределения усилий. Поскольку в сечении 1 возник пластический шарнир, введем в это сечение идеальный шарнир и загрузим его постоянным моментом $[M_I] = 14,21$ кН·м, действующим в направлении, противоположном внешней нагрузке (рис. 2, б).

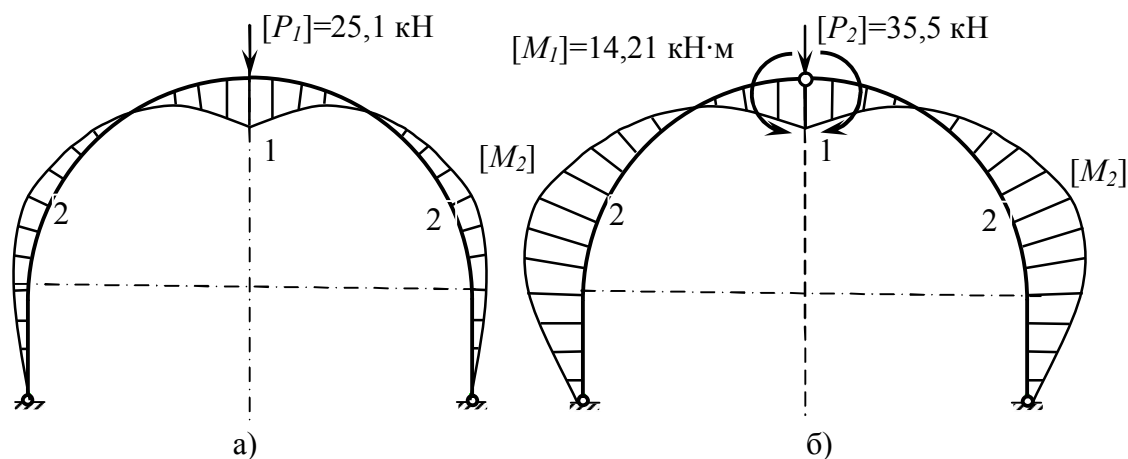


Рисунок 2 – Эпюры изгибающих моментов M (сосредоточенная сила без забутовки) до а) и после б) наступления предельного состояния

Теперь, при росте внешней нагрузки $P_2 > [P_1]$, момент в сечении 1 из-за наличия здесь пластического шарнира остается постоянным, изгибающие моменты растут линейно на всем периметре крепи, а опасными становятся сечения 2.

Согласно (1) допустимый изгибающий момент для этого сечения – $[M_2] = 13,56$ кН·м, поскольку здесь иная, несколько большая нормальная сила N . При наступлении первого предельного состояния $P = [P_1]$, момент в сечении 2 был равен $M_2 = 7,31$ кН·м. Таким образом, внешнюю нагрузку после возникновения первого пластического шарнира можно увеличивать до тех пор, пока момент в сечении 2 не достигнет значения $M_2 = [M_2] = 13,56$ кН·м. Такая нагрузка $[P_2]$ соответствует наступлению второй стадии предельного состояния, которую вызвало появление пластических шарниров в сечениях 2. Согласно проведенным расчетам крепи во второй запредельной стадии $[P_2] = 35,5$ кН. Увеличение нагрузки на крепь $P > [P_2]$ недопустимо, поскольку система без забутовки закрепного пространства становится кинематически изменяемой, т.е. крепь полностью теряет устойчивость и не может воспринимать внешние нагрузки.

Как следует из расчетов, запас прочности крепи при ее работе в запредельной стадии для данной схемы составляет $\Delta P = [P_2] - [P_1] = 35,5 - 25,1 = 10,4$ кН или 40%. Однако такая схема работы крепи опасна тем, что возникновение второй стадии предельного состояния, – пластических шарниров в сечениях 2, – приводит к резкой потере устойчивости и разрушению крепи.

Случай 2. Он учитывает наличие забутовки закрепного пространства. Опасное сечение 1, как и в предыдущем случае, находится в центре арки под приложенной силой (рис. 3, а). Допустимый изгибающий момент в опасном сечении 1 $[M_1] = 12,45$ кН·м, а несущая способность крепи по первому предельному состоянию $[P_1] = 56,9$ кН.

Опасные сечения 2 находятся в районе узлов податливости крепи, для них предельно допустимый момент по расчету составляет $[M_2] = 10,09$ кН·м, а нижняя часть рамы оказалась загруженной незначительно. При переходе рамы во вторую запредельную стадию следует ввести в расчетную схему пластический шарнир с моментом $[M_1] = 12,45$ кН·м (рис. 3, б). Несущая способность крепи на второй за-

предельной стадии равна $[P_2] = 96$ кН. Возникновение пластических шарниров в сечениях 2, в отличие от случая 1, не приводит к кинематической изменчивости расчетной схемы из-за наличия забутовки закрепного пространства.

После введения в расчетную схему дополнительных шарниров (опасные сечения 2) с постоянным моментом $[M_2] = 10,09$ кН·м и при дальнейшем увеличении внешней нагрузки $P > [P_2]$, происходит рост пластических зон разрушения крепи, т.е. растут размеры пластических шарниров. Это значит, что дальше повышать нагрузку на крепь нельзя из-за возможной

потери общей устойчивости конструкции. Таким образом, запас прочности крепи при ее работе в запредельной стадии для данной схемы составляет $\Delta P = [P_{max}] - [P_1] = 96 - 56,9 \approx 40$ кН или 70%.

Случай 3. Опасное сечение 1 находится в стойках крепи (рис. 4, а), где и возникают пластические шарниры на первой стадии запредельного состояния. Допустимый изгибающий момент в опасном сечении 1 составляет $[M_1] = 13,17$ кН·м, а несущая способность крепи по первому предельному состоянию $[q_1] = 14,9$ кН/м.

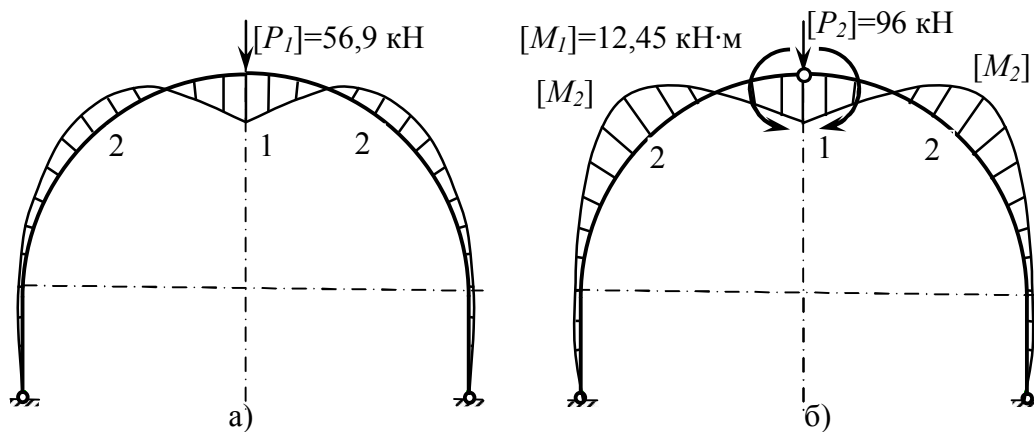


Рисунок 3 – Эпюры изгибающих моментов M (сосредоточенная сила, забутовка) до а) и после б) наступления предельного состояния

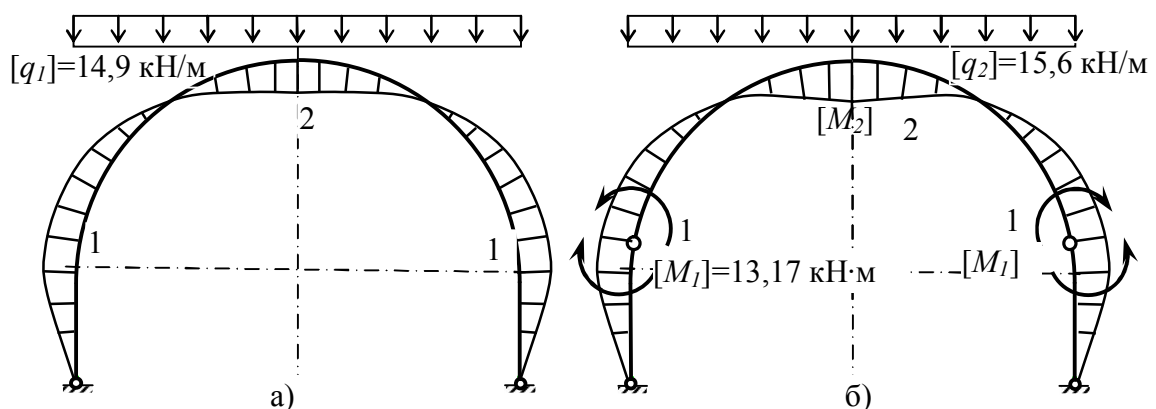


Рисунок 4 – Эпюры изгибающих моментов M (распределенная нагрузка без забутовки) до а) и после б) наступления предельного состояния

Анализ дальнейшей работы крепи при возрастании нагрузки следует производить после введения в расчетную схему двух симметричных пластических шарниров с постоянным моментом $[M_1] = 13,17 \text{ кН}\cdot\text{м}$ (рис. 4, б). Далее увеличиваем нагрузку на крепь $q > [q_1]$ до ее перехода во вторую стадию запредельного состояния, когда в опасном сечении 2 в вершине крепи момент достигнет предела, равного $[M_2] = 14,07 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и здесь также возникнет пластический шарнир, третий по счету. Предельная нагрузка на крепь, соответствующая второй стадии запредельного состояния, составила $[q_2] = 15,6 \text{ кН/м}$. Дальнейшее увеличение нагрузки на крепь невозможно из-за ее перехода в кинематически изменяемую конструкцию из-за отсутствия забутовки. Поэтому запас прочности крепи при ее работе во второй запредельной стадии для данной схемы почти не возрастает и составляет $\Delta q = [q_2] - [q_1] = 15,6 - 14,9 = 0,7 \text{ кН/м}$ или 5%.

Случай 4. Эпюра изгибающих моментов (рис. 5, а) включает четыре опасные сечения по числу условных максимумов на эпюре изгибающих моментов. Возникновение пластических шарниров в крепи происходит последовательно в сечении 1,

2, 3 и в сечении 4. Допустимый изгибающий момент в опасном сечении 1, где возникают пластические шарниры в первом предельном состоянии составляет $[M_1] = 8,17 \text{ кН}\cdot\text{м}$, а несущая способность крепи по первому предельному состоянию равна $[q_1] = 98 \text{ кН/м}$.

Вводя пластические шарниры в сечения 2, 3 и решая задачу последовательно для второй, третьей и четвертой стадий запредельного состояния, определяем допустимые моменты в опасных сечениях и несущую способность крепи для каждой стадии: $[M_2] = 5,84 \text{ кН}\cdot\text{м}$, $[q_2] = 107,4 \text{ кН/м}$; $[M_3] = 3,43 \text{ кН}\cdot\text{м}$, $[q_3] = 116 \text{ кН/м}$. Появление пластических шарниров в сечениях 4 ограничивает возможность дальнейшего увеличения нагрузки на крепь из-за роста зон пластического разрушения и потери общей устойчивости рамы. Таким образом, допустимый момент для сечения 4 составил $[M_4] = 3,22 \text{ кН}\cdot\text{м}$, а максимальная несущая способность крепи – $[q_4] = 117,6 \text{ кН/м}$. Поэтому, запас прочности крепи при ее работе в запредельной стадии для данной схемы составляет $\Delta q = [q_4] - [q_1] = 117,6 - 98 = 19,6 \text{ кН/м}$ или 20%.

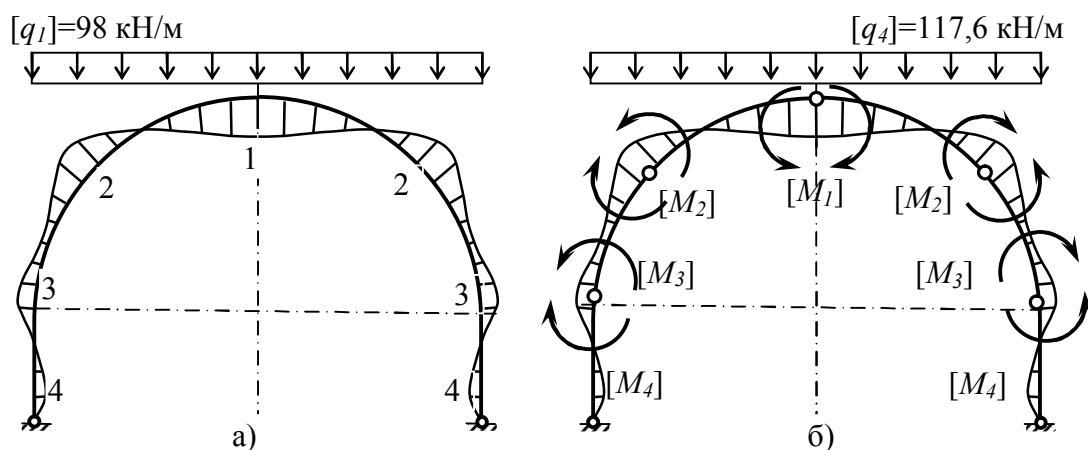


Рисунок 5 – Эпюры изгибающих моментов M (распределенная нагрузка, забутовка) до а) и после б) наступления предельного состояния

Определения смещений крепи на разных стадиях работы не представляет трудностей и не превышают нескольких сантиметров, поэтому нет необходимости в их вычислении.

Результаты определения несущей способности крепи при ее запредельном деформировании для всех рассмотренных схем загрузки представлены в таблице 1.

Максимальной несущей способностью обладает крепь, загруженная распределенной нагрузкой с забутовкой закрепного пространства. Отсутствие забутовки и нагружение крепи сосредоточенной силой приводят к уменьшению ее несущей способности с 490 кН до 25,1 кН или в 19,5 раз (в жестком режиме работы). Это подтверждает существенное влияние забутовки закрепного пространства и характера внешней нагрузки на несущую способность крепи.

Отметим, что при моделировании использован ряд идеализаций. Так, сопротивление пластических шарниров принято постоянным, хотя при реальном деформировании стальной крепи в месте перегиба спецпрофиль СВП, как правило, теряет свою форму за счет резкого уменьшения высоты и сопротивление такого шарнира по мере деформирования падает. Поэтому несущая способность крепи в запредельной стадии деформирования будет меньше расчетной. Из этого следует, что расчет несущей способности рамных крепей необходимо вести по первому предельному

состоянию, а повышение несущей способности в запредельной стадии можно отнести в запас прочности крепи, тем более что возникновение нескольких пластических шарниров по контуру рамы не следует допускать из соображений безопасной эксплуатации крепи и недопущения резкой потери ее несущей способности.

Выполненные исследования еще раз подтвердили, что характер действующей на крепь внешней нагрузки и свойства материала закрепного пространства оказывают существенное влияние на распределение и величину внутренних усилий. Количество условных экстремумов на эпюре изгибающих моментов определяет число опасных сечений, в которых возможно последовательное появление пластических шарниров. Наличие косонаправленных нагрузок на крепь в пределах до 15-20° приводит к изменению последовательности возникновения пластических шарниров, но несущественно изменяет полученные результаты.

Зависимость распределения изгибающих моментов по периметру крепи от жесткости забутовки закрепного пространства показана на рисунке 6 для распределенной нагрузки (расчетная схема на рис. 1, б), которая отвечает требованиям ТУ для рамных крепей горных выработок. Исследовалась разная степень жесткости забутовки (коэффициент постели $c = 0...500$ МПа/м), что отражено в таблице 2.

Таблица 1 – Несущая способность крепи $[P_{ij}]$ (в знаменателе - % к $[P_{i,l}]$) на запредельных стадиях деформирования

Схема загрузки	Стадии запредельного деформирования i				Число пластических шарниров
	I	II	III	IV	
1	25,1/100	35,5/140	-	-	1
2	56,9/100	96/170	-	-	1
3	74,5/100	78/105	-	-	2
4	490/100	537/110	580/118	588/120	5

Примечание: i - номер схемы, a, j - номер стадии деформирования

Таблица 2 – Характеристика забутовки закрепного пространства

Рисунок	Качественная характеристика забутовки	Коэффициент постели, МПа/м
б, а	Нет забутовки	0
б, б	Очень рыхлая, некачественная	5
б, в	Рыхлая	25
б, г	Обычная	100
б, д	Плотная качественная	300
б, е	Тампонаж закрепного пространства	500

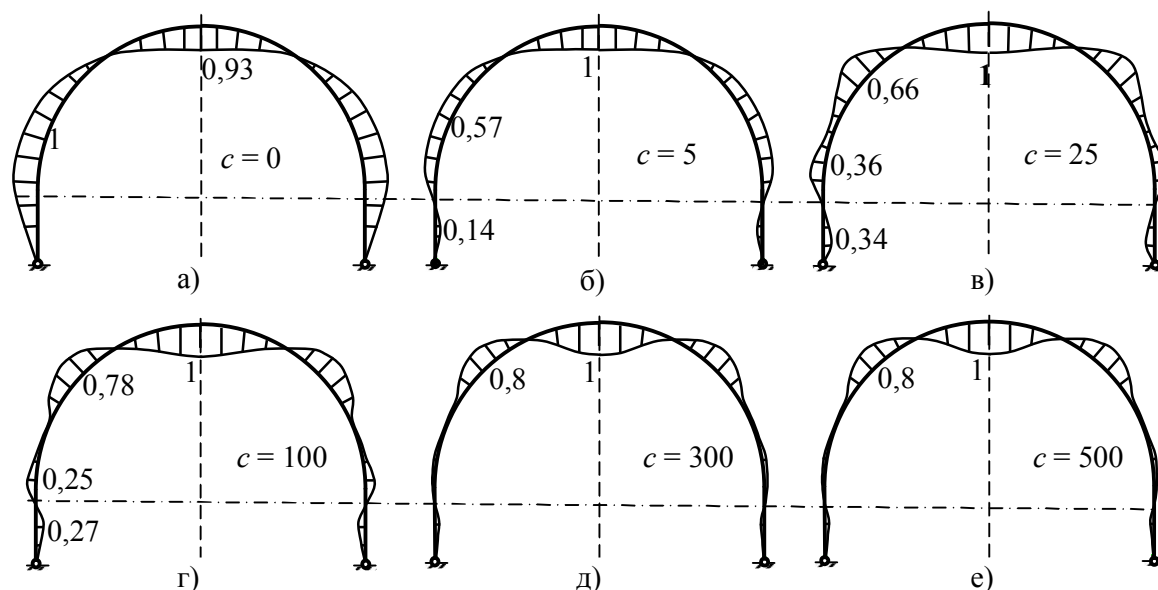


Рисунок 6 – Эпюры относительных изгибающих моментов $m=M/M_{max}$ при различной жесткости забутовки $c = 0...500$ МПа/м

Наиболее неблагоприятна эпюра моментов в крепи без забутовки (рис. 6, а). Это значит, что по всему периметру крепи действуют примерно одинаковые изгибающие моменты с максимумом в стойках. Момент в опасном сечении верхняка составляет 93% максимального. Моменты почти во всех сечения крепи весьма высоки по абсолютному значению, что способствует низкой несущей способности рамы. Место появления пластического шарнира в такой крепи почти неопределенно. Это дополнительно доказывает, что устанавливать крепь без забутовки не следует.

Увеличение жесткости забутовки с 5 МПа/м до 100 МПа/м приводит к росту числа экстремумов на эпюре моментов (рис. 6, б-г). Максимальный момент M_{max} действует в центре верхняка. Второе опас-

ное сечение расположено в районе узлов податливости крепи, где действует момент 0,57...0,78 от максимального, увеличиваясь с ростом жесткости забутовки. Для обеспечения надежной работы крепи при таких параметрах загрузки необходима установка узлов податливости не только с высокой несущей способностью по продольным усилиям, но и с повышенным сопротивлением изгибу.

Дальнейшее повышение жесткости забутовки со 100 МПа/м до 500 МПа/м (тампонаж) приводит к уменьшению числа экстремумов изгибающих моментов до двух (рис. 6, д, е). При этом наиболее загруженным оказывается верхняк, а в стойках изгибающие моменты практически отсутствуют. Второе опасное сечение по-прежнему находится в районе узлов по-

датливости, что обуславливает повышенные требования к конструкциям этих узлов. Необходимо отметить, что соотношение момента во втором опасном сечении к максимальному M_{max} , действующему в центре верхняка, при жесткости забутовки $c = 100 \dots 500$ МПа/м остается постоянным $\approx 0,8 M_{max}$. Кроме того, незначительно изменяется и общий вид эпюр для этих условий, а сравнение эпюр для плотной забутовки (рис. 6, д) и тампонажа (рис. 6, е) показывает их полную идентичность, как по соотношениям действующих в сечениях крепи моментов, так и по их абсолютным значениям. Полученные результаты показывают необходимость и достаточность использования рыхлой забутовки ($c = 25 \dots 50$ МПа/м), которую можно получить взрывным способом [12].

Выводы

1. Впервые исследованы запредельные стадии работы стальной рамной крепи при разных схемах ее нагружения.

2. В запредельной стадии работы крепь обладает запасом прочности по несущей способности от 5% до 70% в зависимости от характера внешней нагрузки и свойств забутовки. Это значит, что при возникновении первого предельного состояния крепь не сразу выключается из работы, а

может продолжать воспринимать нагрузки.

3. Нецелесообразно допускать нагружение крепи сосредоточенными нагрузками из-за весьма низкого значения несущей способности крепи и малого запаса возможных пластических шарниров, что может вызвать внезапные разрушения крепи.

4. Расчет несущей способности рамных крепей необходимо вести по первому предельному состоянию, поскольку реальная несущая способность в запредельной стадии деформирования, когда сопротивление изгибу пластических шарниров в опасных сечениях крепи при деформировании падает, может снизиться и стать меньше расчетной.

5. Поскольку участок крепи в районе узлов податливости опасно перегружен моментами, конструкция узлов следует рассчитывать на восприятие таких моментов.

6. Недопустимо возводить арочные рамные крепи без забутовки закрепного пространства из-за появления высоких изгибающих моментов на большей части периметра рамы. При этом достаточно даже рыхлой забутовки с жесткостью $c = 25 \dots 50$ МПа/м, что можно обеспечить способом взрывного разупрочнения приконтурных пород.

Библиографический список

1. СОУ 10.1.00185790.011:2007 / Міністерство вугільної промисловості України; ДонВУГІ, УкрНДІпроект. – К.: Мінвуглепром України, 2007. – 116 с.
2. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1982. – 30 с.
3. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
4. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Л.: ВНИМИ, 1986. – 222 с.
5. Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок. – Санкт-Петербург: ВНИМИ, 1991. – 125 с.
6. Литвинский Г.Г. Стальные рамные крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Г.И. Гайко, Н.И. Кулдыркаев. – К.: Техника, 1999. – 216 с.
7. Баклашов И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. Учебник для вузов / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1992. – 543 с.
8. Литвинский Г.Г. Расчет крепи горных выработок на ЭВМ: учебн. пособ / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко, Е.В. Емец. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – 174 с.
9. Литвинский Г.Г. Исследование работоспособности шахтной крепи с позиций принципа равнопрочности / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Матеріали міжнародної конференції «Форум

гірників – 2012». – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2012. – Т.2. – С. 7–16.

10. 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.

11. СНиП II-23-81* Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1990. – 134 с.

12. Литвинский Г.Г. Способ обеспечения устойчивости горной выработки взрывной разгрузкой пород кровли / Г.Г. Литвинский, Е.Е. Павлов // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2010». – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2010. – С. 168–177.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Гайко Г.И.