

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАМНОЙ КРЕПИ ИЗ КОРОБЧАТОГО ПРОФИЛЯ

Исследована зависимость несущей способности крепи от условий ее нагружения и взаимодействия с массивом и даны рекомендации по расчету крепи с учетом коэффициентов условий работы. Разработана методика определения предельных нагрузок на элементы крепи по потере общей устойчивости. Дан метод расчета эффективности использования металлопроката с учетом сопротивления узлов податливости и параметров коробчатого профиля для рамной податливой крепи.

Ключевые слова: *коробчатый профиль, рамная крепь, податливая крепь, несущая способность, расчет устойчивости, эффективность.*

Одним из направлений повышения эффективности горнопроходческих работ является совершенствование технологии крепления выработок, разработка и использование новых конструкций крепей, снижение стоимости и трудоемкости их возведения.

Большинство подготовительных выработок шахт Украины (свыше 90%) закреплено стальной рамной крепью из специального взаимозаменяемого профиля СВП. В среднем расходуется около 300-350 т металлопроката на каждый километр выработки. При этом возведение крепи, как правило, производят вручную, что при значительных размерах выработки (более 11-12 м²) весьма трудоемко, поскольку масса элемента крепи (верхняка), который необходимо смонтировать на высоте 3,5-4 м может достигать 160-180 кг.

Согласно действующему нормативному документу [1] выбор параметров рамной арочной крепи производится исходя из ее паспортной несущей способности. Считают, что до исчерпания податливости несущая способность крепи зависит только от сопротивления установленных на ней узлов податливости, после чего крепь обязательно переходит в жесткий режим работы, когда ее несущая способность зависит от типоразмера спецпрофиля СВП, из которого она изготовлена.

Такой подход при расчете параметров крепей часто приводит к существенным ошибкам, поскольку оказывается неучтенным ряд важных влияющих факторов: наличие забутовки и ее качество, условия контакта крепи с массивом горных пород, характер приложенной нагрузки, особенности установки и работы узлов податливости. Последние нередко могут ослабевать и разрушаться до перехода крепи в жесткий режим работы, или наоборот, - обладать излишним сопротивлением, что приводит к разрушению крепи от изгибающих моментов до ее вступления в податливую стадию работы [2]. Это значит, что во многих случаях крепь не переходит последовательно «номинальные» стадии своей работы – упругую, податливую, жесткую и работает ниже своей паспортной несущей способности.

В связи с этим особую актуальность приобретает проблема надежного и научно обоснованного определения несущей способности, а также совершенствования конструкции рамных крепей горных выработок с целью повышения ее работоспособности, экономии металлопроката, снижения трудоемкости возведения.

В работах [3, 4] выполнен анализ существующих серийных профилей металлопроката и доказано, что наиболее технологичным и эффективным для рамной крепи

является замкнутый тонкостенный профиль квадратного очертания, прочность которого при изгибе со сжатием выше, чем у стандартных спецпрофилей типа СВП того же сечения в 1,5 – 2 раза, а при кручении – в 16 – 27 раз.

Поэтому необходимо отказаться от конструктивно и экономически неэффективного спецпрофиля СВП, который в настоящее время доминирует в горной промышленности, и заменить его коробчатым профилем квадратной формы для рамных податливых крепей горных выработок.

Но для обоснованного выбора параметров рамной крепи горных выработок из коробчатого профиля необходимо разработать соответствующую методику расчетов.

Цель исследований состоит в изучении особенностей потери устойчивости несущих элементов рамной крепи горных выработок, в том числе из квадратного тонкостенного профиля металлопроката. **Объектом** исследований является рамная стальная крепь, а **предмет исследований** – параметры этой крепи с учетом взаимодействия с массивом горных пород и типа профиля, используемого для ее изготовления. **Задачей исследований** является обоснование метода расчета параметров рамных податливых крепей из коробчатого профиля.

Основная идея исследований состоит в обосновании выбора параметров рамных крепей горных выработок из коробчатого профиля на основе расчета несущей спо-

собности сжатого несущего элемента такой крепи по критерию потери его общей устойчивости.

Ранее нами выполнены исследования по определению предельной несущей способности рамной арочной крепи в зависимости от распределения и величины действующей нагрузки, параметров забутовки закрепного пространства и контактных условий её взаимодействия с массивом [5]. Расчеты выполнены с использованием метода конечных элементов с помощью программы Лира. Особенностью этих расчетов является учет взаимодействия крепи с окружающим массивом в виде так называемого пассивного (реактивного) отпора пород, для моделирования которого использовали нелинейные конечные элементы (КЭ 264) в виде односторонней упругой связи заданной жёсткости R с массивом. Расчетные схемы крепи представлены на рисунке 1. Первая расчетная схема (рис. 1, а) соответствует случаю, когда, по данным шахтных наблюдений [6] пустоты закрепного пространства достигают 40–60 см и более. Отсутствие забутовки приводит к воздействию на крепь сосредоточенных сил, поскольку смещающиеся под действием горного давления породы вступают в контакт с крепью на точечных или локальных участках контура.

Качественная забутовка или тампонаж обеспечивают равномерную по периметру нагрузку на раму (рис. 1, в), в идеале – равномерно распределенную.

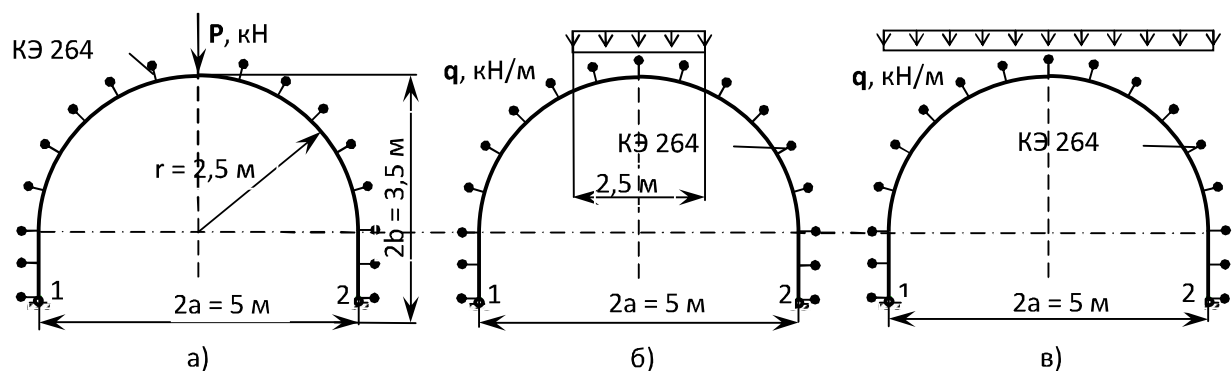


Рисунок 1 – Расчетные схемы арочной крепи при различном внешнем нагружении

Если вокруг крепи некачественная или «рыхлая» забутовка, то нагрузку на крепь нельзя считать сосредоточенной, однако она не распределена по всему периметру крепи, а действует лишь на части контура (рис. 1, б).

Рамная крепь принята стандартного типа в виде двухшарнирной циркульной арки, у которой нижние узлы 1,2 стоек опираются на почву выработки как неподвижные шарниры. Жесткость забутовки задан коэффициентом постели c , МПа/м. При этом для расчетной схемы рис. 1а принято $c < 25$ МПа/м, при неплотной забутовке (схема рис. 1б) $c = 25 \dots 100$ МПа/м, а при плотной качественной забутовке (схема рис. 1в) $c > 100$ МПа/м.

Сопротивление серийного узла податливости типа ЗПК, ЗСД принято постоянным и равным $N_k = 120$ кН.

Как показали расчеты, проведенные с помощью пакета Лира, несущая способность крепи зависит от жесткости забутовки, характера внешней нагрузки и сопротивления узлов податливости. В связи с этим нормативную несущую способность P_n [1] нельзя непосредственно использовать при выборе параметров крепи, а необходимо изменить с учетом условий ее работы для получения расчетного значения P_p путем использования предложенного нами коэффициента условий работы крепи k_y :

$$P_p = P_n \cdot k_y, \quad (1)$$

который определяется выражением:

$$k_y = k_{y1} \cdot k_{y2}, \quad (2)$$

где k_{y1} – коэффициент, зависящий от жесткости забутовки и характера действующей нагрузки;

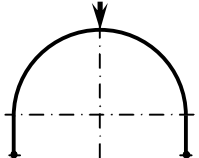
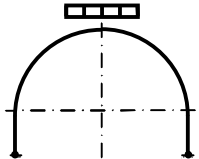
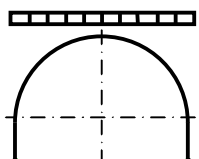
k_{y2} – коэффициент, зависящий от сопротивления узлов податливости.

Коэффициент условий работы k_y показывает, во сколько раз расчетная несущая

способность крепи P_p отличается от нормативного значения P_n , заданного в [1].

Выполненные исследования позволили определить коэффициенты условий работы k_y рамной арочной крепи (табл. 1) в зависимости от стадии работы (податливая, жесткая), характера действующей нагрузки (сосредоточенная, распределенная), сопротивления узлов податливости.

Таблица 1 – Коэффициенты условий работы крепи k_y для различных расчетных схем

Схема								
Забутровка	отсутствует или выполнена на локальном участке контура							
	min				max			
Режим	П		Ж		П		Ж	
Узел	л		л		л		л	
k_y	0,13		0,08		0,3		0,2	
Схема								
Забутровка	неплотная по всему контуру							
	min				max			
Режим	П		Ж		П		Ж	
Узел	1	2	3	л	1	2	3	л
k_y	0,8	1,0	1,15	0,7	0,8	1,0	1,55	0,95
Схема								
Забутровка	плотная или тампонаж							
	min				max			
Режим	П		Ж		П		Ж	
Узел	1	2	3	л	1	2	3	л
k_y	0,8	1,0	3,2	2,0	0,8	1,0	3,4	2,1

Примечание. 1 – крепь с узлом податливости АПЗ.030, 2 – с узлом податливости ЗПК или ЗСД, 3 – с узлом податливости оптимального сопротивления N_o , л – узел податливости любой конструкции; режимы работы крепи: П – податливый, Ж – жесткий.

Определим несущую способность рамной арочной крепи из условия потери общей устойчивости несущего профиля, используя выражение [7]:

$$[P] = R_y \cdot A \cdot \varphi, \quad (3)$$

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

A – площадь поперечного сечения профиля, см²;

φ – коэффициент продольного изгиба, зависящий от гибкости элемента λ и определяемый в соответствии со СНиП II-23-81* Стальные конструкции [8].

Рассмотрим потерю устойчивости элемента крепи, имеющего длину, равную половине периметра рамы. При этом за его расчетную длину l_{ef} при определении гибкости λ принято расстояние от свода крепи до места опирания стойки на почву (рис. 2).

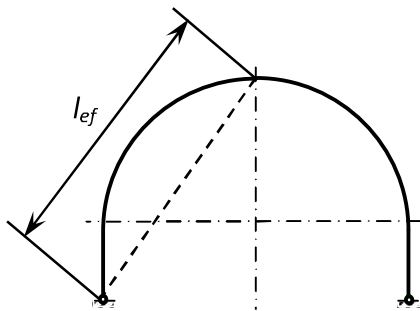


Рисунок 2 – Схема к определению расчетной длины элемента крепи l_{ef}

Считаем, что элемент находится под действием центральных сил сжатия, действующих вдоль его оси. Считаем, что изгибающий момент в плоскости рамы компенсируется усилиями со стороны расклинки и забутовки закрепного пространства и поэтому потерю устойчивости элемента в этой плоскости можно не учитывать. Как идеализацию примем, что наиболее опасной является потеря устойчивости из плоскости рамы, при этом соблюдается равенство нулю изгибающих моментов,

действующих в этой плоскости. Такая расчетная схема соответствует наличию во круг установленной крепи плотной забутовки или тампонажа закрепного пространства, когда изгибающие моменты в крепи малы по сравнению с продольными сжимающими усилиями. Принятые допущения в расчетной схеме идут в запас прочности крепи, величину которого можно оценить при более точной расчетной схеме.

Поэтому потеря общей устойчивости крепи из-за наличия пассивного отпора пород происходит в плоскости перпендикулярной плоскости самой рамы, что учтено в расчете использованием моментов инерции несущего профиля относительно соответствующей оси. Такой вид потери устойчивости рамной крепи часто наблюдается на практике в горных выработках при интенсивном проявлении горного давления. Особенно реальна такая расчетная схема для рамной крепи трапециевидного или прямоугольного очертания, когда расчетная длина элемента равна длине стойки крепи.

Расчет несущей способности $[P]$ выполнен для выработок с типовыми размерами поперечного сечения арочной формы, а результаты представлены в таблице 2. Здесь определена допустимая нагрузка на половину рамы крепи $[F]$, а для расчета несущей способности $[P]$ всей рамы, исходя из условия симметрии, необходимо $[F]$ увеличить в два раза. В последнем столбце показано отношение сопротивления замка податливости крепи $[N]$ к рассчитанной допустимой нагрузке $[F]$, выраженное в процентах. Значение $[N]$ для каждого типа СВП взято из [1].

Допустимая нагрузка $[F]$ во всех расчетах оказалось выше сопротивления узлов податливости $[N]$. Это значит, что несущая способность крепи для данной расчетной схемы всегда лимитируется сопротивлением установленных на ней узлов податливости, а отношение $[N] / [P]$ показывает, насколько эффективно используется материал крепи в конструкции и его можно назвать коэффициентом эффективности ис-

пользования материала в крепи ($K_3 = [N] / [P] * 100\%$).

Как видно из таблицы 2, при установке рамной арочной крепи из СВП в выработке с плотной забутовкой закрепного пространства или его тампонажем, эффективность использования металлопроката в среднем составляет около 25 %, т.е. всего ¼ массы рамы крепи. Причиной этого является весьма низкое сопротивление серийных узлов податливости, используемых в настоящее время в рамных арочных крепях из СВП. И это несмотря на то, что в расчетной схеме занижено (с целью запаса по устойчивости) допустимая нагрузка по потере устойчивости стойки крепи. Кроме того, применение серийных узлов податливости делает нецелесообразным переход на более качественные стали при изготовлении проката крепи.

Повышение сопротивления узлов податливости до оптимального уровня позволит повысить эффективность использования металлопроката в рамных крепях горных выработок в 3-4 раза или во столько же увеличить их несущую способность.

Используя предложенный подход, выполним расчет и подбор коробчатых профилей квадратного сечения для тех же выработок. При этом принимаем, что необходимая несущая способность рамы для всех сечений составляет $[P] \approx 300$ кН, а сопротивление узла податливости для профиля коробчатой формы находится в пределах $[N] = 0,7...0,8 [P]$. Конструкции узлов податливости для рамной крепи из коробчатого профиля с подобными характеристиками разработаны на кафедре «Строительные геотехнологии» ДонГТУ. Новый узел податливости для коробчатого профиля использует идею вдавливания одного профиля внутрь другого, при этом сопротивление узла обусловлено усилиями трения между стенками взаимодействующих профилей, что обеспечивает уровень несущей способности узла вплоть до прочности сечения профиля на сжатие (поданы заявки на патент).

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Расчет допустимой нагрузки на рамную крепь из СВП по потере общей устойчивости несущего элемента

Площадь сечения выработки до осадки $S, \text{ м}^2$	Расчетная длина стойки $l_{ef}, \text{ м}$	Тип СВП	Площадь сечения СВП $A, \text{ см}^2$	Момент инерции $I_y, \text{ см}^4$	Гибкость элемента λ	Коэффициент продольного изгиба ϕ	Допустимая нагрузка на стойку $[F], \text{ кН}$	Сопротивление узла податливости $[N], \text{ кН}$	$K_3 = [N]/[F], \%$
6,4	3,06	14	18,70	282,3	79	0,69	310	75	24
6,4	3,06	17	21,73	382,3	73	0,73	381	90	24
7,3	3,21	17	21,73	382,3	76	0,71	370	90	24
7,3	3,21	19	24,44	464,0	74	0,73	428	100	23
8,5	3,50	19	24,44	464,0	80	0,69	405	100	25
8,5	3,50	22	27,91	566,3	78	0,70	469	110	23
10,4	3,76	22	27,91	566,3	84	0,66	442	110	25
12,8	4,18	27	34,37	731,5	91	0,61	503	125	25
14,5	4,40	27	34,37	731,5	95	0,58	478	125	26
14,5	4,40	33	42,53	1218	82	0,67	684	155	23
17,3	4,81	27	34,37	731,5	104	0,51	421	125	30
17,3	4,81	33	42,53	1218	90	0,61	623	155	25

Таблица 3 – Расчет параметров выработок с рамной крепью из коробчатого профиля проката

Площадь сечения выработки до осадки S , м ²	Расчетная длина стойки l_{ef} , м	Типоразмер коробчатого профиля	Площадь сечения профиля A , см ²	Момент инерции I_y , см ⁴	Гибкость элемента λ	Коэффициент продольного изгиба φ	Допустимая нагрузка на стойку [F], кН	Несущая способность крепи [P], кН	$A_{СВП}/A_{КП}$
6,4	3,06	90x90x4	13,35	161,8	88	0,63	203	325	1,63
7,3	3,21	90x90x4	13,35	161,8	92	0,61	196	313	1,63
8,5	3,50	90x90x4,5	14,87	177,8	101	0,56	200	320	1,88
10,4	3,76	90x90x4,5	14,87	177,8	109	0,52	185	296	1,88
12,8	4,18	100x100x4,5	16,67	247,5	108	0,52	208	333	2,06
14,5	4,40	100x100x4,5	16,67	247,5	114	0,49	197	314	2,55
17,3	4,81	100x100x5	18,36	270,9	125	0,44	193	308	2,32

Эффективность использования коробчатого профиля показана в последней колонке таблицы 3 в виде отношения площади поперечного сечения спецпрофиля СВП $A_{СВП}$, рекомендуемого для данного поперечного сечения выработки, к площади подобранного для этого же сечения коробчатого профиля $A_{КП}$. Полученное отношение показывает, во сколько раз масса крепи из СВП больше массы такой же крепи из коробчатого профиля. При этом необходимо учесть, что несущая способность рамной крепи из коробчатого профиля для всех типовых сечений выработок постоянна ($[P] \approx 300$ кН), тогда как в крепях из СВП она много меньше и только для самых больших сечений (15-18 м²) достигает 310 кН [1].

Выводы

Предложенный коэффициент условий работы крепи k_y позволяет учитывать конкретные условия контактного взаимодействия крепи с массивом путем корректировки нормативного значения несущей способности (табл. 1) при расчете пара-

метров рамных податливых крепей горных выработок.

Результатами численного анализа работы рамной крепи в различных условиях взаимодействия с массивом показано, что отступления от технических условий возведения крепи (неровный контур, пустоты закрепного пространства, неплотная забутовка и др.) создают сосредоточенные нагрузки и снижают несущую способность крепи в 3-10 раз.

Низкое сопротивление серийных узлов податливости рамных крепей из СВП приводит к неэффективному использованию металлопроката (в среднем около 25%) при установке крепи с плотной качественной забутовкой закрепного пространства или его тампонажем.

Повышение сопротивления узлов податливости до оптимального уровня позволит в 3-4 раза увеличить несущую способность крепи в податливом режиме.

Коробчатый профиль проката для рамных податливых крепей позволит существенно (в 1,6...2,5 раза) снизить потребле-

ние стального проката или обеспечить вы-
сокую несущую способность рамы.

Задачами дальнейших исследований яв-
ляются разработка методик расчета опти-
мальных параметров рамной крепи из ко-

робчатого профиля для различных горно-
геологических и горнотехнических усло-
вий, создание новых комбинированных
конструкций рамных и анкерных крепей.

Библиографический список

1. 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.
2. Литвинский Г.Г. Исследование предельных состояний рамной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Науковий вісник НГУ. — Дніпропетровськ, 2013. — №3. — С. 26 – 33.
3. Литвинский Г.Г. Исследование эффективности прокатных профилей для рамной крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Уголь Украины. — 2012. — №11. — С. 11 – 14.
4. 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.
5. Литвинский Г.Г. Обоснование выбора предельной несущей способности рамной арочной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Уголь Украины. — 2013. — №4. — С. 3 – 7.
6. Бабиюк Г.В. Управление надежностью горных выработок: монография. — Донецк: Світ книги, 2012. — 420 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. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. — М. 2011. — 172 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Бабиюком Г. В.

Статья поступила в редакцию 30.10.13.

д.т.н. Литвинський Г. Г., к.т.н. Фесенко Е. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РАМНОГО КРІПЛЕННЯ З КОРОБЧАСТОГО ПРОФІЛЮ

Досліджено залежність несучої спроможності кріплення від умов його навантаження та взаємодії з масивом і надані рекомендації по розрахунку кріплення з урахуванням коефіцієнтів умов роботи. Розроблено методіку визначення граничних навантажень на елементи кріплення при втраті загальної стійкості та розрахунку ефективності використання металопрокату з урахуванням опору вузлів піддатливості. Виконано розрахунок параметрів коробчастого профілю для рамного піддатливого кріплення.

Ключові слова: *коробчастий профіль, рамне кріплення, піддатливе кріплення, несуча спроможність, втрата стійкості.*

Litvinsky G. G., Fesenko E. V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

RESERCH OF FRAME SUPPORTS CHARACTERISTICS FROM BOX SECTION ELEMENTS

The interaction's dependences of the bearing capacity with the loading conditions of the roof supports researched. The recommendations for the calculation of roof support with the service factors are gave. The method of determination of the limit loads on the roof support elements for the loss of

overall stability is worked-out. Method of determining the efficiency of roof support was designed with the resistance of yielding unit. The calculation of the parameters for the box section frame yielding support is executed.

Key words: *box section, frame support, yielding support, bearing capacity, the loss of stability, calculation of stability, efficiency.*