

Рамная полигональная шарнирно-податливая крепь из коробчатого профиля

Обоснована форма поперечного сечения для крепления горных выработок в условиях пологого и наклонного залегания пород. Исследована работа полигональной рамной крепи из коробчатого профиля. Предложена оптимальная конструкция, в которой минимизированы изгибающие моменты, что экономит расход металлопроката в 3–5 раз. Разработаны конструктивные решения отдельных узлов и элементов новой крепи.

Ключевые слова: рамная крепь, конструкция, коробчатый профиль, узлы податливости, эффективность.

Контактная информация: ligag@ya.ru

Крепление горной выработки – один из самых трудоемких и продолжительных процессов проходческого цикла, поскольку более половины материальных затрат в себестоимости ее сооружения приходится на стоимость крепи. 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 крепь, как правило, возводят вручную, что при значительной площади сечения выработки (более 11–12 м²) весьма трудоемко, поскольку масса элемента крепи (верхняка), который необходимо смонтировать на высоте 3,5–4 м, может достигать 120–150 кг. Поэтому для горнодобывающей промышленности так актуальна проблема снижения стоимости и трудоемкости крепления.

Промышленный опыт использования рамной крепи позволил выявить следующие недостатки:

крепь не отвечает принципу оптимальности, различные эле-

менты нагружены неравномерно, подвержены значительным изгибающим моментам, что ведет к их деформации и поломке;

используемый профиль СВП неэффективен и дорог;

требуется тщательная забровка закрепного пространства, что трудновыполнимо, но без нее несущая способность крепи снижается в 5–7 раз;

расположение узлов податливости в крепи часто не совпадает с направлением смещений массива; у них низкое неравномерное сопротивление и недостаточный запас податливости;

кроме того, монтаж крепи длителен и трудоемок из-за многочисленных резьбовых соединений и значительной массы элементов.

Особо следует остановиться на выборе стального проката для элементов крепи. В работах [1, 2] представлен анализ существующих серийных профилей металлопроката и показано, что наиболее технологичен и эффективен для рамной крепи замкнутый тонкостенный профиль квадратного очертания. Его прочность на изгиб (при условии равенства масс 1 м профилей) выше, чем у стандартных спецпрофилей



Г. Г. ЛИТВИНСКИЙ,
доктор техн. наук
(Донбасский ГТУ)



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

типа СВП того же сечения в 1,5–2 раза, а при кручении – в 16–27 раз.

Поэтому целесообразно отказаться от применения неэффективного спецпрофиля СВП, который до сего времени преобладает в рамных крепях горной промышленности, и заменить его коробчатым профилем квадратной формы [1, 2]. Исходя из этого, необходима разработка конструкции новой крепи с этим профилем, обоснование оптимальной формы поперечного сечения и методики выбора прочных параметров в разных горногеологических условиях.

Цель исследований – изучение особенностей работы профиля квадратного очертания (квадратной трубы) в конструкциях крепи с учетом ее взаимодействия с массивом горных пород. Объект исследований – стальная рамная крепь из коробчатого

профиля, предмет – конструкция и параметры. *Задачи исследований* – обоснование новой конструкции крепи и отдельных конструктивных элементов из коробчатого профиля.

На основании анализа промышленного опыта применения рамной податливой крепи в различных условиях сформулируем главные требования, которым она должна удовлетворять:

отвечать принципу равнопрочности [3] и минимизировать изгибающие усилия в ее элементах, что обеспечит максимальную несущую способность на единицу массы;

сопротивление податливости должно быть постоянным и не менее 70–80 % предельной несущей способности;

необходимо, чтобы конструктивная податливость соответствовала по значению и направлению ожидаемым смещениям пород в выработку;

возможности использования элементов верхняка и рамы как временной призабойной крепи;

высокой заводской готовности при установке, масса крепи и трудоемкость монтажа должны быть минимальными.

Для сравнения конструкций крепи целесообразно ввести параметр работоспособности P_w , который позволяет учитывать в обобщенном виде особенности ее деформационно-силовой характеристики – несущей способности P и конструктивной податливости U , отнесенные к общей массе крепи m :

$$P_w = PU/m. \quad (1)$$

Чем выше параметр работоспособности крепи P_w , тем рациональнее используется металл в ее конструкции, тем она эффективнее. Физический смысл этого показателя состоит в том, что 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 P_w учтен расход материала в конструкции, причем крепь тем эффективней, чем меньше ее масса. Удобство практического применения этого показателя для крепи разных конструкций состоит в том, что входящие в него параметры легко определять из испытаний крепи или ее расчета.

На первом этапе необходимо остановиться на выборе формы выработки, от которой зависит форма крепи. Анализ возможных форм полигональных и арочных очертаний крепи горной выработки (рис. 1) показал, что *полигональные крепи* (рис. 1, а,

б, в) по сравнению с арочными (рис. 1, г) имеют ряд преимуществ:

отсутствуют сложные изогнутые конструктивные элементы;

масса элементов (особенно при увеличении количества сегментов (рис. 1, б, в) меньше, чем у трехзвенной арочной крепи, что значительно снижает стоимость и упрощает монтаж;

наличие шарнирных соединений позволяет устранить изгибающие моменты в конструкции, что невозможно в арочной;

полигональные крепи лучше приспособлены к наклонному и крутому залеганию пластов за счет возможности наклона элементов под плоскую кровлю выработки, т. е. имеют большую вариативность конструкции и область применения.

Из сравнения возможных форм полигональной крепи следует, что в крепи из четырех элементов (см. рис. 1, а) верхняки имеют большую длину, что снижает их прочность и устойчивость. Вариант из шести и более конструктивных элементов (рис. 1, в), требует многочисленных соединительных узлов, что усложняет технологию изготовления и трудоемкость возведения крепи.

Поэтому наиболее целесообразной, особенно при пологом и наклонном залегании пород, следует считать полигональную крепь из пяти конструктивных элементов (рис. 1, б). Такая форма отвечает требованию оптимального использования площади сечения выработки.

Для оценки прочностных показателей такой крепи выполнены расчеты методом конечных элементов с помощью программы Лира. Учтен пассивный (реактивный) отпор пород, возникающий при взаимодействии крепи с окружающим массивом. Размеры площади поперечного сечения выработки выбраны из условия наиболее распространенных сечений и полного их использования. Высота стоек принята 2 м, поскольку зазоры для прохода людей, регламентируемые Правилами безопасности, должны соблюдаться на высоте 1,8 м. Площадь поперечного сечения крепи $S = 11 \text{ м}^2$, возможная вертикальная податливость достигает 1000 мм.

Рассмотрим случай пологого залегания пород, когда верхняк крепи установлен под плоскую кровлю, а нагрузка на крепь задается смещениями пород кровли. Следовательно, крепь была загружена заданными на верхняк равномерными смещениями ΔU . При расчетах жесткость забутовки закрепного пространства задавали коэффициентом постели c . При неплотной забутовке жесткость принята

25–100 МПа/м, при плотной качественной забутовке – более 100 МПа, а тампонаж закрепного пространства соответствует жесткости 500 МПа/м.

При подборе сечений элементов крепи принято, что рама должна обеспечить несущую способность $[P] = 300$ кН, а форма сечения элементов (профиль проката) – квадратная труба. На первом этапе выполнены расчеты полигональной крепи при жесткости забутовки закрепного пространства 25–500 МПа/м.

Расчеты показали (рис. 2), что отсутствие забутовки или ее плохое качество (жесткость менее 25 МПа/м) приводит к появлению в полигональной крепи высоких изгибающих моментов, что требует применения мощных несущих элементов размерами $180 \times 180 \times 6$ мм и массой от 45,2 кг (раскосы) до 64,1 кг (верхняк и стойки). Масса всей рамы крепи составила 283 кг. Наличие забутовки закрепного пространства жесткостью забутовки менее 100 МПа/м резко снижает изгибающие моменты в крепи (в 1,7–2 раза и более) и позволяет использовать несущие элементы меньших типоразмеров. Но дальнейшее увеличение жесткости забутовки до 200 МПа и более за счет тампонажа закрепного пространства, когда $c = 500$ МПа, уже мало снижает изгибающие моменты. Таким образом, для данной расчетной схемы жесткость забутовки выше 100 МПа/м нецелесообразна, однако и менее 25–50 МПа/м недопустима.

Из расчетов следует, что взаимодействие полигональной конструкции крепи с забутовкой происходит только в районе соединения стоек с раскосами. Поэтому рассмотрим работу полигональной крепи без забутовки закрепного пространства, но с разной жесткостью расклинки узлов соединений стоек с раскосами. С этой целью определим прочностные размеры крепи для случаев, когда несущая способность рамы задана $[P] = 300$ кН, а жесткость деформирования R расклинки на стыках элементов менялась в пределах 2–50 МН/м (или 0,2–5 т/мм).

Для сравнения на завершающем этапе исследований была рассмотрена шарнирная крепь полигональной формы, в которой сопряжения раскосов со стойками и верхняком в расчетной схеме крепи шарнирные, остальные параметры модели прежние. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

С увеличением жесткости деформирования расклинки R наблюдается положительный эффект – снижение изгибающих моментов в полигональной крепи с жестким соединением элементов, что позволяет уменьшить массу крепи за счет использо-

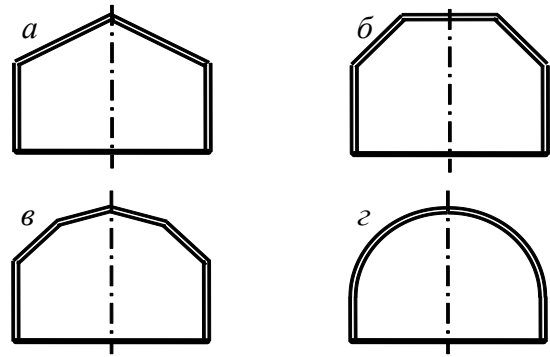


Рис. 1. Возможные формы очертаний (а – г) горных выработок.

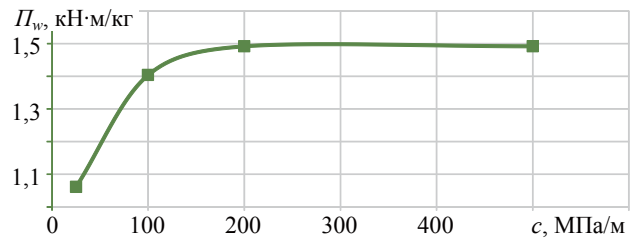


Рис. 2. Зависимость работоспособности крепи P_w от жесткости забутовки закрепного пространства c .

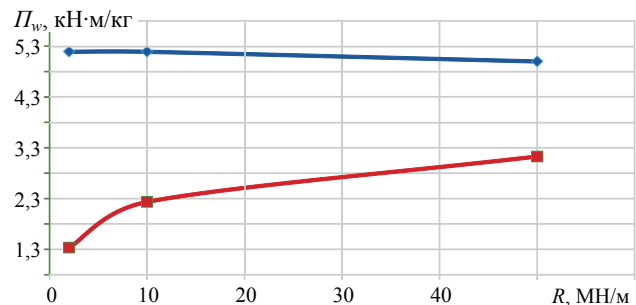


Рис. 3. Зависимости жесткости деформирования расклинки крепи R от ее работоспособности P_w .

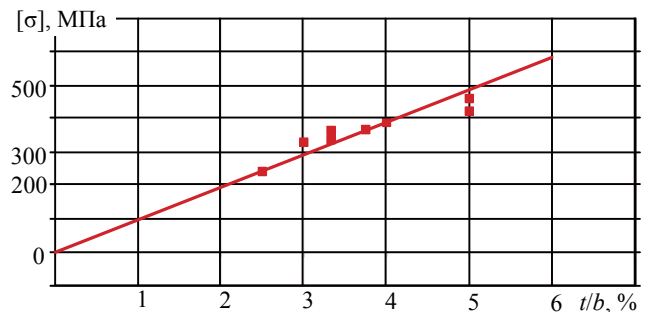


Рис. 4. Закономерность изменения предельного напряжения сжатия $[\sigma]$ квадратной трубы от соотношения толщины стенки и ширины профиля t/b , %.

вания коробчатого профиля меньшего типоразмера. При увеличении жесткости с 2 до 50 МН/м масса крепи уменьшилась с 225 до 96 кг (в 2,35 раза), а по сравнению с арочной крепью из СВП-33 – в 3,06 раза. Следовательно, при использовании полигональной крепи без шарниров (с жестким соединением элементов) для снижения изгибающих моментов в опасных сечениях необходимо в месте сопряжений раскосов со стойками применять расклинку как можно большей жесткости.

Положительно, что при шарнирном соединении элементов полигональной крепи изгибающие моменты в них почти отсутствуют. Для учета возможных случайных эксцентриситетов в реальных шарнирных соединениях при расчете элементов крепи моменты в опасных сечениях приняты $M = 0,1$ кН·м. Поэтому все элементы шарнирной крепи оказываются почти центрально сжатыми, что позволяет значительно уменьшить типоразмеры несущих профилей. Площадь поперечного сечения элементов крепи находится в пределах 7,74–10,6 см², а их масса незначительна: верхняя и стойки – 12,2 кг, раскосы – 10,6–11,7 кг.

Масса рамы шарнирной полигональной крепи из коробчатого профиля несущей способностью $[P] = 300$ кН не превышает 58–60 кг, что в 1,6 раза меньше массы наиболее эффективной крепи с нешарнирным соединением элементов (96 кг) и в 4,9 раза меньше массы арочной крепи той же несущей способности из СВП-33. Показатель работоспособности P_w для таких крепей см. на рис. 3.

При расчетах несущей способности крепи предельно допустимое напряжение принято равным

пределу текучести стали $R_y = 240$ МПа. Особенности местной потери устойчивости квадратных труб во время испытаний на сжатие подробно описаны в работе [4]. В целях уточнения реальной прочности сжатых трубчатых элементов крепи в лаборатории кафедры «Строительные геотехнологии» Донбасского ГТУ проведены испытания типоразмеров труб от 40×40 до 120×120 мм с разной толщиной стенки t . Установлено, что предельно допустимое напряжение $[\sigma]$ при сжатии трубы во многом зависит от соотношения толщины ее стенки и ширины b профиля t/b (рис. 4). Это объясняется особенностью местной потери устойчивости замкнутых профилей под действием сжимающих нагрузок в виде последовательного образования гофр на стенках. Следовательно, при расчете несущей способности коробчатого профиля на центральное сжатие необходимо использовать не предел текучести стали R_y , а допустимое напряжение $[\sigma]$, определенное по графику (см. рис. 4) с учетом коэффициента продольного изгиба φ , зависящего от длины элемента [5]. Для определения допустимого напряжения $[\sigma]$ с достаточной точностью можно использовать уравнение

$$[\sigma] = 10^4(t/b). \quad (2)$$

Уровень достоверности аппроксимации составляет 0,75, что вполне удовлетворительно в условиях случайных отклонений при потере местной устойчивости стенок квадратных труб при их сжатии.

Учтем эту закономерность (2) при проектировании шарнирной полигональной крепи. Выбран

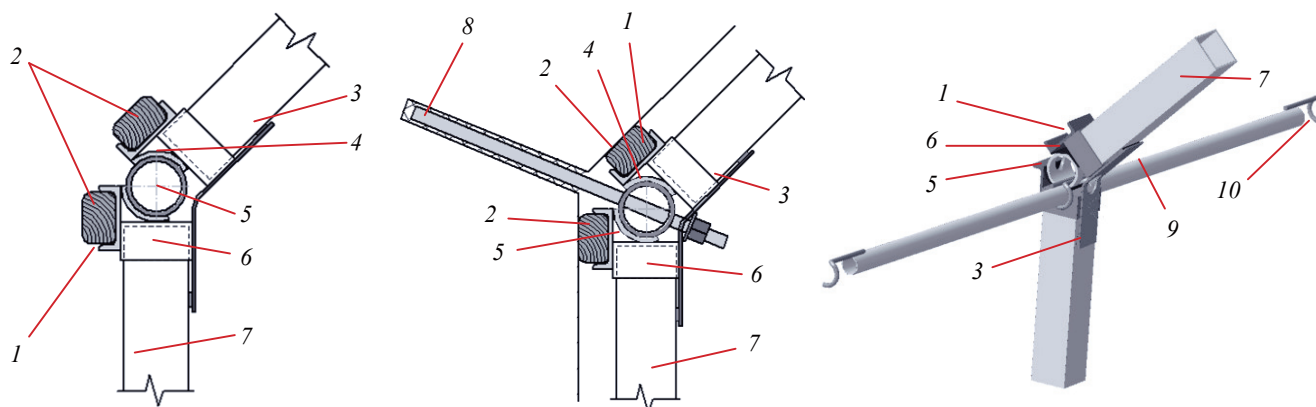


Рис. 5. Шарнирный узел соединения несущих элементов крепи: 1 – отрезок швеллерной формы для установки расклинки; 2 и 4 – сегментная вставка; 3 – планка; 5 – труба-шарнир; 6 – обойма; 7 – несущий элемент крепи; 8 – анкер; 9 – межрамная стяжка; 10 – клиновой фиксатор.

ный профиль для верхняка и стоек – тонкостенная квадратная труба размерами 100×100×2 мм и соотношением $t/b = 2\%$. Согласно уравнению (2), допустимое напряжение для трубы $[\sigma] = 200$ МПа, что меньше расчетного $R_y = 240$ МПа. Поэтому, чтобы обеспечить требуемую несущую способность крепи, необходимо использовать трубу с той же площадью поперечного сечения, но с большим соотношением t/b . Например, труба размерами 80×80×2,5 мм имеет $t/b = 3,1\%$ и $[\sigma]$ для нее составляет 310 МПа. Использование такого профиля для стоек и верхняка обеспечивает заданную несущую способность крепи с большим запасом.

Принимаем во внимание, что наиболее неблагоприятные условия эксплуатации конструкции новой крепи наблюдаются в подготовительных выработках в зоне интенсивного проявления повышенного горного давления. Для этого разработаны узлы податливости и шарнирные узлы соединения крепи из коробчатого профиля [6]. На рис. 5 показана конструкция шарнирного узла соединения элементов полигональной крепи.

Концы элементов крепи вставлены в обоймы, между которыми размещена труба-шарнир. При этом одна из обойм, труба-шарнир и отрезок швеллерной формы скреплены между собой сваркой. Взаимный поворот несущих элементов в шарнирном узле происходит по поверхностям трубы-шарнира и сегментной вставки, которая сварена с соответствующими обоймой и отрезком швеллерной формы. С помощью планки обоймы соединены между собой под заданным углом. Шарнирный узел снабжен двумя расклинками. Труба-шарнир, сегментная вставка и планка имеют радиальные соосные прорезы, через которые можно устанавливать анкер.

Соседние рамы крепи соединены между собой с помощью разработанных авторами межрамных стяжек в виде трубы с клиновыми фигурными фиксаторами на концах. Межрамная стяжка упирается торцом в обойму и торец трубы-шарнира, при этом клиновидный фиксатор проходит сквозь трубу-шарнир и плотно закрепляет межрамную стяжку на раме крепи.

Благодаря тому что в шарнирных узлах установлены расклинки, при нагружении крепи внешние силы будут приложены преимущественно на шарнирные узлы, что обуславливает существенное снижение изгибающих моментов в несущих элементах. Предусмотрено также, что форма крепи варьируется в зависимости от горно-геологических условий,

углов падения пород и т. д. За счет изменения длины элементов крепи, углов соединения несущих элементов между собой, мест размещения шарниров и узлов податливости можно выбрать наиболее целесообразную конфигурацию крепи, когда внешние нагрузки в виде сосредоточенных сил распределены через расклинки на шарнирные узлы, при этом достигается согласование направлений максимальных смещений контура выработки с оптимальным направлением работы узлов податливости.

Поскольку в крепи отсутствуют болтовые соединения, значительно ускоряется и облегчается монтаж. Шарнирный узел можно быстро смонтировать при возведении крепи, так как он изготовлен и заранее собран на заводе. Благодаря применению разъемных шарнирных узлов крепь можно использовать повторно. Конструкция межрамной стяжки, в которой не предусмотрены резьбовые соединения, позволяет быстро и надежно монтировать соседние рамы. При установке анкеров в шарнирных узлах потребность в межрамных стяжках отпадает.

Узел податливости крепи (рис. 6) состоит из несущих элементов профиля, у одного из них (элемента 3) стенки предварительно крестообразно деформированы, а в середине нижнего элемента установлены параллельно продольной оси неподвижные фигурные клинья. Соединяемые несущие элементы 1 и 5 на своих концах имеют фаски. Участок соединения помещен в обойму, которая плотно прилегает к элементу 5 и держится на упорах.

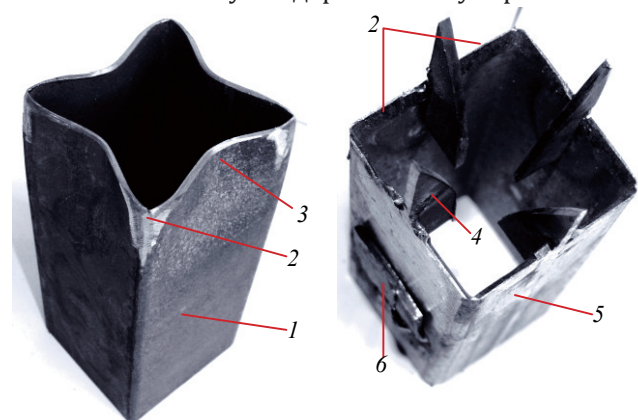


Рис. 6. Узел податливости крепи из коробчатого профиля до испытаний: 1 и 5 – несущие элементы профиля; 2 – фаска несущего элемента; 3 – несущий элемент, у которого стенки предварительно крестообразно деформированы; 4 – фигурные клинья; 6 – упор.

При смещении несущего элемента 1 под действием внешней нагрузки по направлению элемента 5 клинья 4 своими кромками взаимодействуют со стенками элемента 1, создавая силы трения между поверхностями трения, тем самым обеспечивая податливость конструкции и ее сопротивление продольным нагрузкам.

Обойма препятствует разрыву стенок элемента 5 и нежелательному деформированию фигурных клиньев 4 во время смещения несущих элементов 1 и 5 один относительно другого в узле податливости. Таким образом, создаются постоянные силы трения в узле и его надежная работа.

Предложенная конструкция узла гарантирует конструктивно неограниченную податливость и возможность широкого регулирования силы его сопротивления. При необходимости обеспечения максимального сопротивления узла следует использовать несущие элементы 1 и 5 одинакового типоразмера без фигурных клиньев. Для уменьшения силы сопротивления несущий элемент 1 должен иметь размеры меньшие, чем у элемента 5. Кроме того, сопротивление податливости можно регулировать путем изменения размеров фигурных клиньев.

Выводы. Спецпрофиль СВП для рамных крепей из-за его малой эффективности целесообразно заменить профилем в виде квадратной трубы.

Для крепления выработок наиболее рациональна полигональная крепь из пяти элементов, что позволяет полнее использовать площадь сечения выработки в свету, снизить массу отдельных элементов, отказаться от использования сложных в изготовлении и более дорогих гнутых элементов.

Шарнирная полигональная крепь из коробчатого профиля податливостью до 1 м и более перспективна для крепления горных выработок. Так, ее применение дает экономию металлопроката в 3–4 раза больше, чем использование арочной крепи из СВП-33 такой же несущей способности. Масса каждого элемента новой крепи не превышает 15–20 кг.

Разработанный узел податливости крепи из коробчатого профиля имеет высокую постоянную несущую способность, значительную податливость, полную конструктивную готовность использования в крепи, простую конструкцию, малую металлоемкость, небольшую трудоемкость установки и невысокую стоимость.

Предложенная конструкция крепи позволяет заметно повысить несущую способность, надежность и удобство соединения элементов, обеспечивает высокую скорость монтажа в выработке, устраняет необходимость в плотной забутовке, а требует только расклинки узлов соединения стоек с раскосами.

Таким образом, новую конструкцию рамной крепи из коробчатого профиля после промышленных испытаний целесообразно рекомендовать к широкому использованию для крепления подготовительных выработок шахт и рудников.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Литвинский Г. Г. Оптимальный прокатный профиль для рамной крепи / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко // Вісті Донецького гірничого ін-ту. – 2013. – Вып. 1(32). – С. 198 – 203.
3. Литвинский Г. Г. Исследование предельных состояний рамной крепи / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 3. – С. 26 – 33.
4. Литвинский Г. Г. Экспериментальные исследования потери устойчивости несущих элементов крепи из коробчатого профиля / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко // Сб. науч. трудов Донбасского ГТУ. – 2013. – Вып. 40. – С. 8 – 13.
5. Стальные конструкции: СП 16.13330.2011. Актуализирован ред. СНиП II-23-81*. – М., 2011. – 172 с.
6. Пат. 88666 Украина, МПК Е 21 D 11/14 (2006.01). Вузол піддатливості для кріплення з коробчастого профілю / Г. Г. Литвинський, Е. В. Фесенко; заявл. 28.10.2013; опубл. 25.03.14, Бюл. № 6.