

© Е.В. Фесенко¹, Є.Є. Павлов¹, А.І. Новак¹¹ ТОВ "Технічний університет "Метінвест Політехніка", Маріуполь, Україна

ОПТИМАЛЬНИЙ НЕСУЧИЙ ПРОФІЛЬ ДЛЯ РАМНОГО КРІПЛЕННЯ

© E. Fesenko¹, Ye. Pavlov¹, A. Novak¹¹ Metinvest Polytechnic Technical University LLC, Mariupol, Ukraine

OPTIMAL BEARING PROFILE FOR MINING FRAME SUPPORT

Мета. Аналіз характеристик прокатних профілів різних конфігурацій і обґрунтування найбільш ефективного для застосування у рамних кріпленнях гірничих виробок.

Методи дослідження. На основі аналізу основних характеристик прокатних профілів (моментів опору вигину та крученню, площі поперечного перерізу та геометричних показників) з урахуванням безрозмірних критеріїв ефективності профілю по вигину і крученню та запропонованих відносних критеріїв виконано порівняльні розрахунки ефективності серійних профілів металопрокату.

Результати. Виконаний аналіз застосування різноманітних профілів металопрокату для виготовлення несучих елементів рамних кріплень гірничих виробок. Проаналізований досвід експлуатації кріплень зі спецпрофілів СВП та показані основні недоліки цього профілю. Сформульовані вимоги до профілю для металевих рамних кріплень. Доведено, що найбільш технологічним і ефективним для використання в рамних кріпленнях є замкнутий тонкостінний профіль квадратного обриса, який по вигину перевищує спецпрофілі СВП в 1,5 - 2 рази, а по крученню - в 16 - 27 разів.

Наукова новизна. Запропоновано методику аналізу характеристик серійних профілів прокату для визначення найбільш ефективних у якості несучих елементів металевих рамних кріплень. Для виконання аналізу і порівняння характеристик різних профілів пропонується використовувати критерії ефективності по вигину та крученню та відносні критерії, які враховують основні статичні та геометричні характеристики несучих профілів та дозволяють порівнювати між собою будь які профілі прокату, що серійно виробляються промисловістю.

Практичне значення. Використання запропонованої методики визначення найбільш ефективного металевих профілю прокату для рамних кріплень гірничих виробок дозволяє раціонально використовувати метал, суттєво скоротити його витрату при збереженні тієї ж несучої здатності рами, знизити масу окремих її елементів, трудомісткість, собівартість і час зведення кріплення, збільшити швидкість проведення і стійкість виробок.

Ключові слова: гірничі виробки, рамне металеве кріплення, несучий профіль, металопрокат, момент опору, вигин, крутіння.

Вступ. Сучасні металеві рамні кріплення підземних гірничих виробок виготовляються із сталевих прокату, при цьому понад 90% всіх гірничих виробок закріплені сталевим рамним кріпленням і на кожен кілометр протяжності гірничої виробки в середньому необхідно витратити близько 300-350 т металопрокату. При цьому зведення кріплення, як правило, здійснюють вручну, що при значних розмірах виробки (понад 11-12 м²) досить трудомістко, оскільки маса елемента

кріплення (верхняка), який необхідно змонтувати на висоті 3,5 - 4 м може досягати 160-180 кг. Тому в гірничій промисловості все більш актуальна проблема економії металопрокату при кріпленні підземних гірничих виробок.

Відомо, що найбільш економічним профілем при роботі несучого елемента на вигин є двотавр, який раніше використовували для металевих рамних кріплень, які працювали в жорсткому режимі [1, 2]. Однак в даний час від двотавру відмовилися через властиві йому істотні недоліки: низький момент опору крученню W_k (що призводить до появи неприпустимих крутильних деформацій) і жорсткого режиму роботи кріплення з двотавра, що виключає його застосування при великих зсувах породного контуру.

Замість двотавру були розроблені «спеціальні» профілі прокату (СВП, СВПУ, КГВ і ін.) [1 - 3], які з середини минулого століття широко застосовують для виготовлення металевих рамних кріплень гірничих виробок. Накопичений досвід експлуатації кріплень зі спецпрофілів СВП дозволив виявити основні недоліки цього профілю:

1. При вигині кріплення часто розширюються верхні кінці спецпрофіля стійок, потім верхняк провалюється в профіль, що призводить до неприпустимих деформацій елементів кріплення.

2. Порівняно малі радіуси заокруглень на сполученнях днища і стінок профілю викликають концентрацію дотичних напружень в цих місцях, що в поєднанні із зазначеним вище явищем сприяє відриву днища.

3. Через коливання розмірів профілю в вузлах піддатливості кінці верхняка і стійок взаємодіють з різними умовами взаємного ковзання, що порушує роботу піддатливих з'єднань кріплення.

4. Профіль відкритий, незамкнений, з відносно тонкими стінками, що обумовлює низький момент опору крученню W_k , а також швидкий знос профілю від корозії.

Аналізуючи відомі недоліки і особливості спецпрофіля, можна сформулювати вимоги до профілю для металевих рамних кріплень:

1. Високий опір вигину, крученню і втраті місцевої стійкості.
2. Підвищена стійкість до корозії.
3. Прості і надійні з'єднання елементів кріплення.
4. Зменшена витрата металу на одиницю несучої здатності.

Постановка проблеми. У зв'язку з цим залишається актуальною проблема вибору несучого профілю для виготовлення кріплень гірничих виробок, який повинен відповідати сформульованим вище вимогам для підвищення ефективності його використання у рамних кріпленнях.

Виходячи з цього, **мета досліджень** полягає в аналізі характеристик прокатних профілів різних конфігурацій і обґрунтуванні найбільш ефективного. **Об'єктом досліджень** є серійні профілі прокату, що випускаються промисловістю, **предметом досліджень** - робочі характеристики цих профілів, а **завдання досліджень** зводяться до виконання аналізу показників прокатних профілів, обґрунтуванню параметрів найбільш ефективного профілю та оцінці доцільності його використання у рамному кріпленні.

Основний матеріал. Розглянемо існуючі серійні профілі прокату, які можуть бути використані при виготовленні рамних кріплень. До їх числа відносяться: двотаври, спеціальні взаємозамінні профілі (СВП, СВПУ), труби (круглі, квадратні, прямокутні). Куточок, швелер, тавр, рейка виключені з аналізу через їх малу придатність для використання в несучих елементах гірничих кріплень.

Несуча здатність і надійність кріплення тим вище, чим краще чинить опір стисненню, вигину і крученню профіль, з якого воно виготовлено. Тому для аналізу профілів обрано такі їх характеристики: висота і ширина (h і b), товщина його полки і стінки (t і s), площа поперечного перерізу A , момент опору вигину W_x , момент опору крученню W_k .

Найбільш ефективним слід вважати профіль, у якого моменти опору вигину і крученню максимальні при мінімальній площі поперечного перерізу, тобто забезпечує найменшу витрату металу, яка пропорційна площі A :

$$W_x, W_k \rightarrow \max \quad \text{при } A \rightarrow \min$$

Для порівняння різних профілів і оцінки їх ефективності зручно використовувати критерій у вигляді безрозмірного симплекса, що визначається за формулою [4]:

$$k = \frac{W}{\sqrt{A^3}}, \quad (1)$$

для врахування роботи профілю на вигин і кручення цей критерій має вигляд:

$$k_{\text{виг}} = \frac{W_x}{\sqrt{A^3}}, \quad k_k = \frac{W_k}{\sqrt{A^3}}, \quad (2)$$

де $k_{\text{виг}}$, k_k – критерій ефективності профілю відповідно по вигину і крученню;

Таким чином, критерії $k_{\text{виг}}$ і k_k показують несучу здатність профілю по відношенню до його площі відповідно на вигин і кручення.

Прокатні профілі згрупуємо і порівняємо за площею поперечного перерізу одного з типорозмірів спецпрофіля СВП. Наприклад, розрахунок критеріїв ефективності профілів, відповідних спецпрофілю СВП 14, наведено в табл. 1.

У табл. 1 відносні критерії ефективності по вигину k_1 і крученню k_2 являють собою співвідношення критеріїв профілю $k_{\text{виг}}$ і k_k і спецпрофіля СВП. Таким чином, відносний критерій k_1 показує, у скільки разів даний профіль ефективніше профілю СВП 14 по вигину, а k_2 - по крученню. Аналіз показав, що на вигин гіршим є спецпрофіль СВП, що повсюдно застосовується для кріплення, а найкращим - двотавр, у якого $k_1 = 3,33$. Це означає, що при тій же витраті металу двотавр витримає згинальні моменти в 3,33 рази більші, ніж профіль СВП. Однак ефективність двотавру по крученню неприпустимо мала (як і у профілю СВП).

Кругла труба ефективніше спецпрофіля по вигину в 1,34 ... 2,45 рази, а по крученню в десятки разів ($k_2 = 22,4$... 40,8). Однак застосування круглого профілю для виготовлення кріплення не цілком раціонально, оскільки діаметр труби більше, ніж розміри відповідного профілю СВП, що робить кріплення більш громіздким, а також утруднений монтаж міжрамних огорож.

Порівняння профілів металопрокату з площею поперечного перерізу, еквівалентною спецпрофілю СВП 14

Типорозмір профілю	Площа поперечного перерізу A , см^2	Момент опору		Критерій ефективності			
		осьовий W_x , см^3	при крученні W_k , см^3	по вигину		по крученню	
				$k_{виг}$	відносний $k_1 = k_{виг} / k_{СВП}$	k_k	відносний $k_2 = k_k / k_{СВП}$
СВП 14	18,70	40,70	4,55	0,50	1	0,06	1,0
СВПУ 14а	18,00	44,60	6,43	0,58	1,17	0,08	1,4
Двотавр 18Б1	19,58	120,08	5,20	1,39	2,77	0,06	1,0
Двотавр Т22	17,45	121,52	4,37	1,67	3,33	0,06	1,0
Труба 127x5	19,16	56,24	112,5	0,67	1,34	1,34	22,4
Труба 219x2,8	19,02	101,50	203,0	1,22	2,45	2,45	40,8
Труба 100x100x5	18,36	54,22	85,7	0,69	1,38	1,09	18,2
Труба 120x120x4	18,15	67,05	104,0	0,87	1,73	1,34	22,4
Труба 90x80x6,3	18,47	44,23	76,2	0,56	1,11	0,96	16,0
Труба 120x50x6,3	18,47	47,7	79,0	0,60	1,20	1,0	16,6
Труба 110x90x5	18,36	56,87	93,16	0,72	1,45	1,18	19,7
Труба 160x40x5	18,36	60,17	77,45	0,76	1,53	0,98	16,4
Труба 140x100x4	18,15	71,94	117,6	0,93	1,86	1,52	25,4
Труба 160x80x4	18,15	74,71	121,2	0,97	1,93	1,57	26,1

Коробчасті профілі квадратної і прямокутної форми переважають спецпрофіль СВП по вигину в 1,11 ... 1,93 рази, а по крученню в 16,0 ... 26,1 разів. При цьому лінійні розміри коробчастої труби $h \times b$ менше або співставні з розмірами спецпрофілю СВП 14 ($h \times b = 88 \times 121$ мм). Таким чином, виготовлення кріплень з коробчастих профілів прямокутного перетину не вимагатиме збільшення поперечного перерізу виробки, не створить складнощів в стикуванні елементів кріплення, спростить конструкцію піддатливих з'єднань і не ускладнить укладання міжрамних огорож. Слід врахувати, що коробчасті профілі мають високий опір крученню, що пояснюється замкнутою їх формою на відміну від відкритих профілів СВП, СВПУ і двотаврів.

Відносний коефіцієнт ефективності k_1 прямокутної труби залежить від співвідношення її лінійних розмірів h / b і товщини стінки труби t . На рис. 1 показана залежність коефіцієнта k_1 для труби з $t = 5$ мм від співвідношення її розмірів h / b , а на рис. 2 - залежність коефіцієнта ефективності по вигину $k_{виг}$ від відносної товщини стінки t / h для замкнутих квадратних профілів металопрокату.

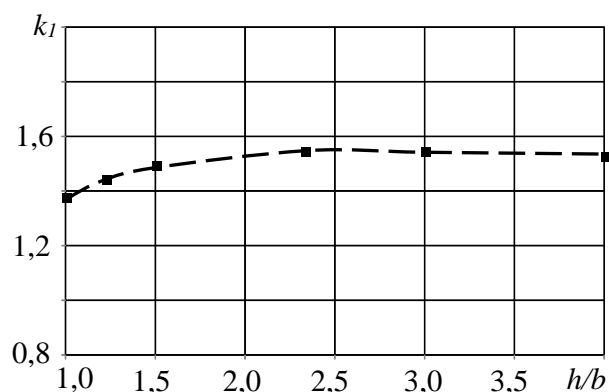


Рис.1. Залежність відносного коефіцієнта ефективності профілю k_l від співвідношення його розмірів при $t = 5$ мм

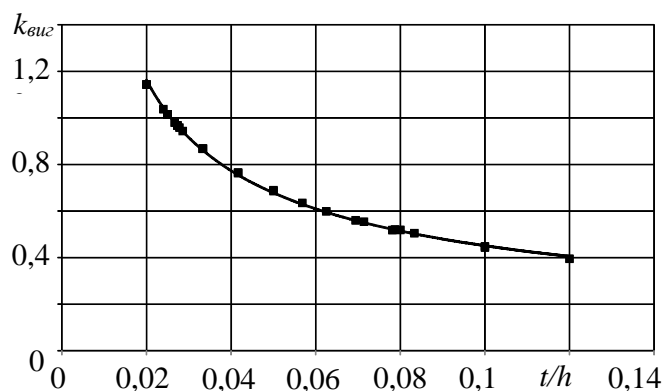


Рис.2. Залежність коефіцієнта ефективності профілю $k_{vиг}$ від відносної товщини стінки t/h

З рис. 1 випливає, що ефективність трубчастого профілю прямокутного перерізу по вигину при зміні його розмірів h/b від 1,0 до 4,0 змінюється незначно (в діапазоні $k_l = 1,38 \dots 1,55$). Необхідно урахувати, що профілі з $h/b > 2$ нетехнологічні через громіздкість, на них незручно укладати затяжку, і, найголовніше, вони мають знижений момент опору W_y .

Отже, для виготовлення рамних кріплень з усього різноманіття профілів металопрокату найбільш ефективним є квадратний коробчастий профіль. Як видно з табл. 1, ефективність такого профілю підвищується при збільшенні розмірів і зменшенні товщини стінки. При зменшенні його відносної товщини стінки з $t/h = 0,12$ до $t/h = 0,02$, ефективність по вигину збільшується приблизно в 3 рази (рис. 2). Однак товщину стінки профілю t не можна надмірно зменшувати через небезпеку місцевої втрати стійкості, хоча товщина стандартних профілів розрахована на можливість місцевої втрати стійкості і тому не вимагає перевірки.

Великою перевагою замкнутих профілів є можливість їх внутрішнього заповнення складом, що тужавіє (бетоном), що перетворює їх в труботетон. Це істотно підвищує несучу здатність, загальну і місцеву стійкість кріплення. Заповнення трубчастого профілю доцільно проводити після монтажу кріплення, що підвищить показники міцності профілю на 25 - 35% і різко знизить ймовірність загальної та місцевої втрати стійкості.

У табл. 2 виконано порівняння спецпрофілів СВП з найбільш ефективними квадратними коробчастими профілями. Для кожного типорозміру спецпрофіля СВП підібрані два трубчастих профілю - один відповідає площі A поперечного перерізу спецпрофіля СВП, інший - моменту опору вигину W_x .

Квадратний трубчастий профіль істотно ефективніше спецпрофіля СВП по вигину і крученню. Так, заміна спецпрофіля СВП квадратної трубою підвищує ефективність кріплення по згинаючих навантаженнях в 1,5 - 2 рази, по крученню - в 16 - 27 разів, при цьому витрата металу скорочується в 1,25 - 1,6 разів.

Порівняння спецпрофілів СВП з профілями замкнутого квадратного перетину

Типорозмір профілю	Площа поперечного перерізу A , см^2	Момент опору		Критерій ефективності			
		осьовий W_x , см^3	при крученні W_k , см^3	по вигину		по крученню	
				$k_{виг}$	відносний $k_1 = k_{виг}/k_{СВП}$	k_k	відносний $k_2 = k_k/k_{СВП}$
СВП 14	18,7	40,7	4,55	0,50	1	0,06	1,0
Труба 120x120x4	18,15	67,05	104	0,87	1,73	1,34	22,4
Труба 110x110x3	12,61	43,33	66,82	0,97	1,94	1,49	24,9
СВП 17	21,73	50,3	5,88	0,50	1	0,06	1
Труба 140x140x4	21,35	93,09	143,7	0,94	1,89	1,46	25,1
Труба 120x120x3	13,81	52,06	80,1	1,01	2,03	1,56	26,9
СВП 19	24,44	61,3	7,74	0,51	1	0,06	1
Труба 160x160x4	24,55	123,4	189,8	1,01	1,99	1,56	24,4
Труба 120x120x4	18,15	67,05	104,1	0,87	1,70	1,35	21,0
СВП 22	27,91	74,8	9,9	0,51	1	0,07	1
Труба 160x160x4	24,55	123,4	189,8	1,01	2,0	1,56	23,3
Труба 120x120x5	22,36	80,91	126,7	0,77	1,51	1,2	17,9
СВП 27	34,37	100,2	15,98	0,50	1	0,08	1
Труба 180x180x5	34,36	192,99	297,7	0,96	1,92	1,48	18,5
Труба 150x150x4	22,95	107,71	166,0	0,98	1,96	1,51	18,9
СВП 33	42,53	133,5	23,71	0,48	1	0,09	1
Труба 200x200x6	45,63	283,27	438,1	0,92	1,91	1,42	16,7
Труба 150x150x5	28,36	130,95	203,2	0,87	1,81	1,35	15,8

Застосування рамних кріплень з квадратного замкнутого профілю дозволить значно знизити масу кожної рами кріплення. Наприклад, арубне кріплення площею поперечного перерізу $14,5 \text{ м}^2$ з профілю СВП 33 має масу 333 кг (без урахування піддатливих елементів, болтів, міжрамних стяжок), а така ж арка з квадратного замкнутого профілю матиме масу 222 кг. Таким чином, при установці кріплення з кроком 0,5 м, економія металу на 1 км виробки складе 222 т.

Заповнення внутрішньої порожнини профілю складом, що тужавіє дозволить, крім істотного підвищення несучої здатності і стійкості, в два рази зменшити швидкість корозії через неможливість попадання кисню всередину коробчастого профілю.

Висновки. 1. Спецпрофілі СВП мають найнижчу ефективність по вигину і крученню в порівнянні з іншими профілями металопрокату.

2. Найбільш технологічним і ефективним для використання в рамних кріпленнях є замкнутий тонкостінний профіль квадратного обрису, який по вигину перевищує спецпрофілі СВП в 1,5 - 2 рази, а по крученню - в 16 - 27 разів (табл. 2).

3. Заповнення коробчастого профілю кріплення складом, що тужавіє збільшує несучу здатність ще на 25 - 35%, виключає можливість його загальної і місцевої втрати стійкості, в два рази зменшує швидкість корозії металу.

4. Використання коробчастого профілю для гірничого кріплення дозволить скоротити витрату металу в 1,25 - 1,6 рази при збереженні тієї ж несучої здатності рами, знизити масу окремих її елементів, трудомісткість, собівартість і час зведення кріплення, збільшити швидкість проведення і стійкість виробок.

5. Проведеними дослідженнями доведено, що необхідно відмовитися від конструктивно і економічно неефективного спецпрофілю і замість нього перейти на виготовлення рамних кріплень гірничих виробок з коробчастого профілю металопрокату.

Перелік посилань

1. Литвинский, Г.Г., Гайко, Г.И. & Кулдыркаев, Н.И. (1999). *Стальные рамные крепи горных выработок*. Киев: Техника.
2. Каретников, В.Н., Нуждихин, В.Б. & Клейменов, А.Г. (1989). *Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник*. Москва: Недра.
3. Зигель, Ф.С. & Компаниец, В.Ф. (1992). Арочные крепи из новых профилей проката. *Уголь Украины*, 10, 59 – 61.
4. Тимошенко, С.П. & Дж. Гере (1976). *Механика материалов*. Москва: Мир.

АННОТАЦИЯ

Цель. Анализ характеристик прокатных профилей различных конфигураций и обоснование наиболее эффективного для применения в рамных крепях горных выработок.

Методы исследования. На основе анализа основных характеристик прокатных профилей (моменты сопротивления изгибу и кручению, площади поперечного сечения и геометрических показателей) с учетом безразмерных критериев эффективности профиля по изгибу и кручению и предложенных относительных критериев выполнены сравнительные расчеты эффективности серийных профилей металлопроката.

Результаты. Выполнен анализ применения различных профилей металлопроката для изготовления несущих элементов рамных крепей горных выработок. Проанализирован опыт эксплуатации крепей из спецпрофилей СВП и показаны основные недостатки этого профиля. Сформулированы требования к профилю для металлической рамной крепи. Доказано, что наиболее технологичным и эффективным для использования в рамных крепях является замкнутый тонкостенный профиль квадратного очертания, который по изгибу превышает спецпрофили СВП в 1,5 - 2 раза, а по кручению - в 16 - 27 раз.

Научная новизна. Предложена методика анализа характеристик серийных профилей проката для определения наиболее эффективных в качестве несущих элементов металлических рамных крепей. Для выполнения анализа и сравнения характеристик различных профилей предлагается использовать критерии эффективности по изгибу и кручению и относительные кри-

терии, учитывающие основные статические и геометрические характеристики несущих профилей и позволяют сравнивать между собой любые серийно выпускаемые промышленностью профили проката.

Практическое значение. Использование предложенной методики определения наиболее эффективного металлического профиля проката для рамных крепей горных выработок позволяет рационально использовать металл, существенно сократить его расход при сохранении той же несущей способности рамы, снизить массу отдельных ее элементов, трудоемкость, себестоимость и время возведения крепи, увеличить скорость проведения и устойчивость выработок.

Ключевые слова: *горная выработка, рамная металлическая крепь, несущий профиль, металлопрокат, момент сопротивления, изгиб, кручение.*

ABSTRACT

Objective. Analysis of the characteristics of various configurations rolled profiles and substantiation of the most effective for use in frame supports in mine workings.

Research methods. Based on the analysis of the main characteristics of rolled profiles (moments of resistance to bending and torsion, cross-sectional area and geometric significates), taking into account dimensionless criteria for the efficiency of a profile in bending and torsion and the proposed relative criteria, comparative calculations of the serial metal-roll profiles efficiency were performed.

Findings. The analysis of the use of various profiles of rolled metal for the manufacture of bearing elements of frame supports of mine workings is carried out. The experience of operating supports from special profiles SVP is analyzed and the main disadvantages of this profile are shown. Requirements for the profile for metal frame support are formulated. It has been proven that the most technologically advanced and efficient for use in frame supports is a closed thin-walled square profile, which in bending exceeds the special profiles SVP by 1.5 - 2 times, and in torsion - 16 - 27 times.

The originality. A method for analyzing the characteristics of serial rolled profiles is proposed to determine the most effective metal frame supports as load-bearing elements. To analyze and compare the characteristics of various profiles, it is proposed to use efficiency criteria for bending and torsion and relative criteria that take into account the main static and geometric characteristics of the bearing profiles and allow you to compare any commercially available rolled profiles.

Practical implications. The use of the proposed method for determining the most effective metal profile of rolled products for frame supports of mine workings makes it possible to efficiently use metal, significantly reduce its consumption while maintaining the same bearing capacity of the frame, reduce the weight of its individual elements, labor intensity, cost and time of support erection, increase the speed and stability mine workings.

Keywords: *mine working, frame metal support, bearing profile, rolled metal, moment of resistance, bending, torsion.*