

© В.В. Руських¹, О.А. Гайдай¹, І.В. Філіппов¹, С.М. Пойманов¹¹ Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

КОНСТРУКЦІЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ СИСТЕМИ КРІПЛЕННЯ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК

V. Ruskih¹, <https://orcid.org/0000-0002-5615-2797>O. Haidai¹, <https://orcid.org/0000-0003-0825-0023>I. Filippov¹, <https://orcid.org/0009-0009-3905-865X>S. Poimanov¹ <https://orcid.org/0000-0002-2932-2498>¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

STRUCTURAL DESIGN OF A RESOURCE-EFFICIENT SUPPORT SYSTEM FOR PREPARATORY MINE WORKINGS

Мета. Обґрунтування конструкції та параметрів ресурсозберігаючої системи кріплення підготовчих виробок, яка забезпечує підвищену стійкість приконтурної зони масиву в умовах складної геомеханічної ситуації, характерної для пластових родовищ Західного Донбасу.

Методика. У роботі застосовано комплексний підхід, що охоплює теоретичний аналіз напружено-деформованого стану масиву навколо підготовчої виробки, графоаналітичне визначення оптимальної форми виробки, розробку конструкції дворівневої анкерної систем кріплення нового технічного рівня та оцінку ефективності в умовах тимчасового опорного гірського тиску й повторного використання виробок.

Результати. Встановлено вплив форми поперечного перерізу гірничої виробки на її стійкість, обґрунтування доцільності використання напівеліптичного перерізу з орієнтацією великої осі у напрямку головного вертикального напруження, що дозволяє знизити концентрацію напружень на контурі виробки та забезпечити рівномірний розподіл гірського тиску. Запропоновано конструкцію кріплення підготовчої виробки нового технічного рівня у вигляді дворівневої рамно-анкерної системи, яка поєднує короткі анкери для приконтурної зони та довгі канатні анкери для стабілізації глибших шарів масиву. Технічне рішення доповнюється сітчастим армуванням, прижимними планками й металевими розстрілами, що підвищує загальну жорсткість та несучу здатність кріплення. Для складних гірничо-геологічних умов із підвищеним тиском розроблено адаптивну схему із застосуванням стояків тертя й гідравлічних елементів, здатних реагувати на зміну навантаження, що сприяє підвищенню безпеки експлуатації виробок.

Наукова новизна. Подальшого розвитку набула конструкція кріплення підготовчої виробки, яка відрізняється комплексною взаємодією несучих та опорних елементів з гірським масивом. Встановлено залежність несучої здатності сітки-затягування міжрамного простору кріплення гірничої виробки в залежності від параметрів конструктивних елементів. Наведена методика застосування запропонованої конструкції в підземних умовах.

Практичне значення. Запропонована система кріплення підвищує стійкість виробок у складних геологічних умовах, знижує металоємність конструкцій, підвищує безпеку робіт і дозволяє повторно використовувати підготовчі виробки, що сприяє ресурсозбереженню та зменшенню витрат на гірниче виробництво.

Ключові слова: кріплення виробок, анкерна система, гірничий тиск, стійкість масиву, ресурсозбереження.

Вступ. За останнє десятиріччя на шахтах Павлоградвугілля майже в два рази було збільшено довжину виїмкових стовпів та очисних вибіїв. Застосування рамно-анкерної системи кріплення підготовчих виробок дозволило впровадити в практику їх повторне використання. Однак, слід зазначити, що різні типи кріплень та матеріалів, які застосовуються на гірничих підприємствах, мають ряд недоліків, які необхідно враховувати. Не вирішеними залишаються питання металоемності застосованого рамного кріплення, що досягає 500 кг на 1 м виробки та суттєвий зазор між масивом та рамним кріпленням, що призводить до руйнування приконтурної зони виробки [1, 2].

Основна частина. М'які осадові породи обумовлюють комплексну систему кріплення гірничих виробок, оскільки сучасне рамне кріплення саме по собі не забезпечує достатньої стійкості. Для підвищення стійкості часто використовують комбінацію рамного кріплення з анкерним або бетонованим кріпленням, а також застосовують закладні суміші для заповнення порожнин. В умовах Західного Донбасу таким рішенням виступає дворівневе рамно-анкерне кріплення підготовчих виробок для повторного його використання [3].

Основними недоліками рамно-анкерного кріплення є простір між рамою та гірським масивом, і, як наслідок, відокремлена робота анкерів (рис. 1) та сітки затягування, що не дозволяє цьому типу кріплення працювати як єдина система.



Рис. 1. Стан підготовчих виробок під час їх експлуатації

Неведене свідчить, що для поліпшення стану гірничих виробок в слабких бічних породах важливо розробити комбіновану систему кріплення, яка б враховувала специфіку геологічних умов родовища.

В зв'язку з цим авторами розроблено низку вимог, які повинно мати нове сучасне кріплення підземних гірничих виробок, щоб забезпечити ефективність, довговічність та безпеку в умовах складної експлуатації. До цих вимог відносяться:

- здатність витримувати високі статичні та динамічні навантаження, що виникають через гірський тиск, вібрації та можливі зрушення порід;
- пристосовуватися до змін геологічних умов, включаючи рух порід, деформації або просідання;
- можливість регулювання розмірів та форми кріплення для відповідності конкретним виробкам;

- стійкість до корозії, гниття, агресивних хімічних речовин;
- тривалий термін служби без потреби частої заміни;
- простота установки, що дозволяє скоротити час проведення гірничих робіт, та можливість трансформації під різні етапи експлуатації виробки;
- можливість інтеграції із сучасними механізованими системами видобутку;
- автоматизація процесу встановлення та контролю стану кріплення.

Вибір форми виробки потребує особливого обґрунтування: з механіки гірських порід відомо, що найбільш стійкою формою поперечного перерізу є еліпс (напівеліпс), велика вісь якого орієнтована в напрямку дії найбільшого головного напруження [4]. Форма кріплення у вигляді еліпса забезпечує найкращу відповідність розподілу напружень у навколишніх породах і при оптимальному розвитку проявів гірського тиску. Дана форма кріплення (рис. 2) теоретично є найбільш стійкою при сприйнятті всебічного (з переважанням вертикального) тиску порідного масиву на контур виробки.

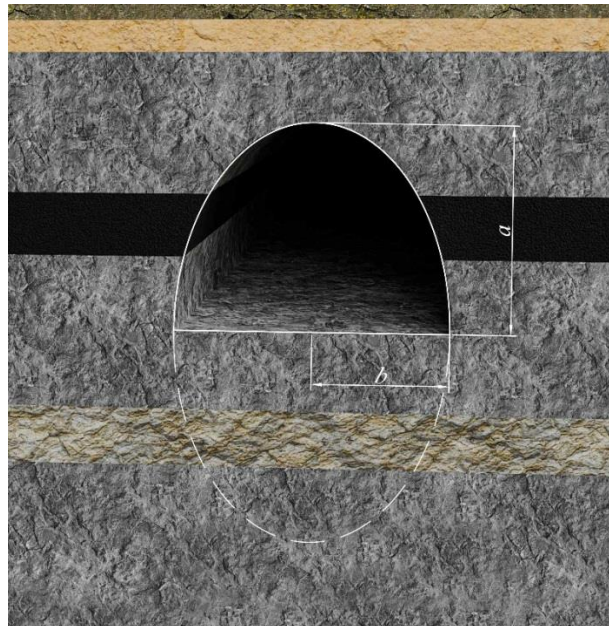


Рис. 2. Оптимальна форма поперечного перерізу гірничої виробки

Напівеліпс є геометричною формою, яка максимально відповідає склепінню природної рівноваги в породному масиві та має особливості:

- рівномірний розподіл напружень, що мінімізує концентрацію напружень у породах.
- у місцях переходу від склепіння до боків відсутні гострі кути, які могли б бути зонами концентрації напружень.
- стійкість до гірського тиску. Як показують дослідження попередніх років [1–8], напівеліптична форма виробки забезпечує найбільш природне та рівномірне сприйняття гірського тиску.

Напівеліптична форма виробки є результатом адаптації геометрії підземних споруд до природних геомеханічних умов. Вона враховує форму склепіння

природної рівноваги, що дозволяє забезпечити максимальну стійкість виробки та ефективно протистояти гірському тиску. Це робить напівеліпс найбільш доцільною формою для проектування виробок у складних гірничо-геологічних умовах [5].

Для півеліпса справедливо правило золотого перерізу - відношення частин і цілого, при якому відносини частин між собою і найбільшої частини до цілого рівні. Такі відносини спостерігаються в природі, відкриті в науці та дотримуються мистецтва. На «золотих відрізках» ґрунтуються різні системи та способи пропорціонування в архітектурі. Співвідношення двох величин a та b при якому більша величина відноситься до меншої так само, як сума цих величин до більшої, тобто

$$\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a} \quad (1)$$

є універсальним.

Конструкція ресурсозберігаючої системи кріплення гірничої виробки

Згідно наведеним вимогам, авторами запропонована наступна ресурсозберігаюча конструкція кріплення нового технічного рівня. (рис. 3).

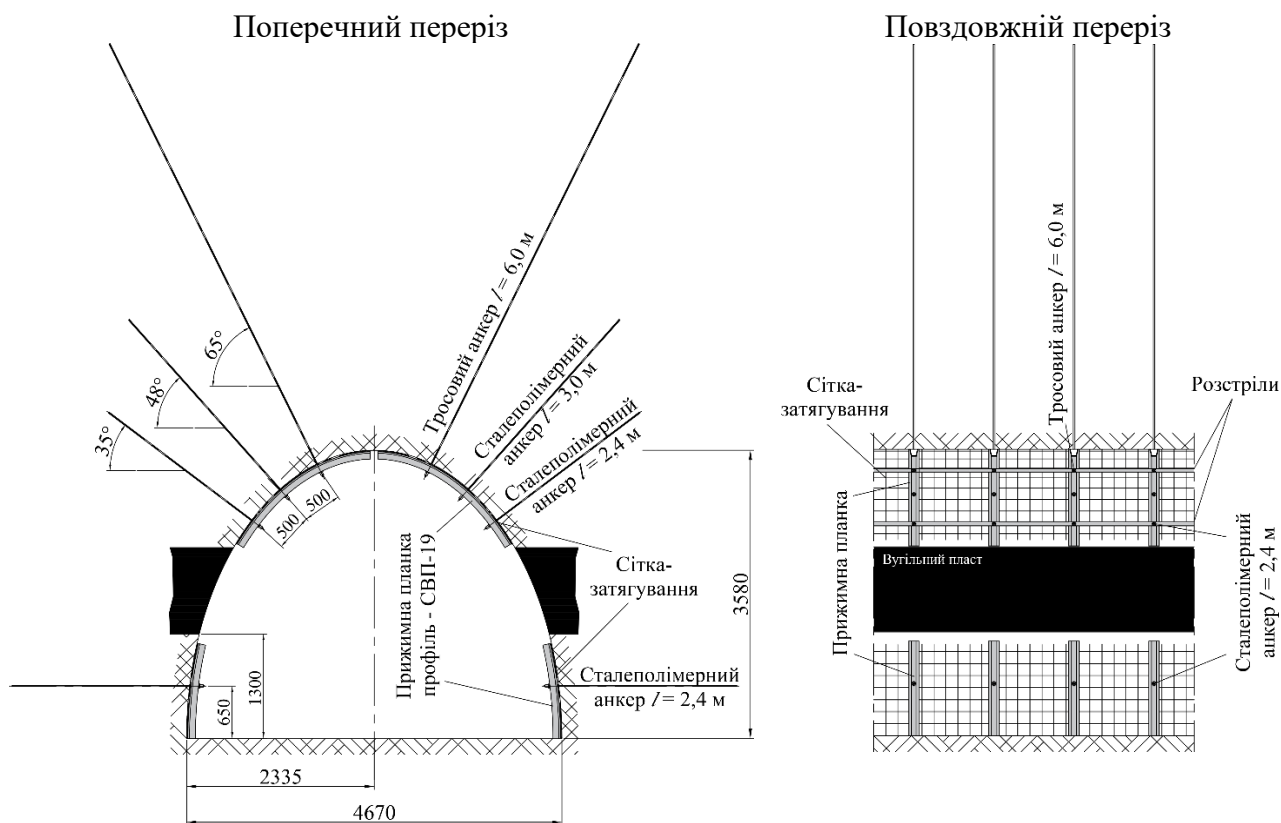


Рис. 3. Конструкція кріплення виробки в гірському масиві

Представлена конструкція кріплення розроблена для умов підготовчої виробки перетином $11,7 \text{ м}^2$ в світлі. У якості форми, як зазначалось раніше, запропоновано напівеліпс. Верхня частина конструкції складається з дворівневого рамно-анкерного кріплення, металевої сітки частини якої пов'язані між собою

крючками. Сітка є несучім елементом конструкції та прижимається до гірничого масиву за рахунок прижимної планки з профілю СВП-19. Опорними елементами конструкції слугують штангові та тросові анкери, які проходять наскрізь через планку та затягується гайками. Профіль СВП-19 обрано у якості прижимної планки за умов можливості трансформації конструкції під різні стадії експлуатації підготовчої виробки.

Представлена конструкція кріплення, загублюючись в гірничий масив до 6 м протидіє процесам розшарування порід тим самим зміцнюючи приконтурну частину гірничої виробки. Зажата сітка затягування бортів виробки не дозволить розшаровуватися породам покрівлі в міжанкерному просторі.

Для придання жорсткості конструкції кріплення та розміщення армування, прижимні планки поєднуються між собою металевими розстрілами.

Перевагою представленої технологічної схеми є:

- застосування канатних анкерів в якості кріплення посилення в виробках з рамним, рамно-анкерним і анкерним кріпленням[6];
- зменшення кількості динамічних проявів в зоні опорного тиску в районі очисного забою і підвищення безпеки робіт на сполученнях, місцях перевантаження гірничої маси і розміщення обладнання;
- створення ефективних і безпечних умов для проведення робіт на сполученнях очисного забою зі штреком, а також проходу людей і транспортування обладнання;
- підвищення продуктивності очисного забою за рахунок скорочення часу кінцевих операцій (пересування головній і хвостовій частині забійного конвеєра), виключення застосування механізованого кріплення сполучення, пересування якої в виїмковій циклі займає чимало часу і індивідуальної кріплення посилення на сполученні зі штреком [9];
- зниження трудомісткості кінцевих операцій.

В зонах підвищеного гірського тиску та впливу очисних робіт передбачено застосування додаткових елементів кріплення, а саме, у якості кріплення підсилення центральної частини виступають гідравлічні стояки або дерев'яні ремонтини, які встановлюються під балку СВП профіля та слугують одночасно не тільки, як кріплення посилення, але і як кріплення сполучення очисного вибою зі штреком та кріплення посилення при вторинних посадках основної покрівлі позаду очисного вибою (рис. 4).

Для підсилення кріплення з борту виробки використовуються дві балки з СВП-19, одна з яких має повздовжній переріз для з'єднання її з прижимною планкою. Балки з'єднуються між собою двома хомутами та працюють по принципу стояка тертя, маючи певну податливість. Конструкція дозволяє встановлювати її під різним кутом тим самим більш ефективно протидіяти проявам гірського тиску. Про стан виробки в місці встановлення анкера сигналізує контурний датчик «Світлофор».

Представлена конструкція кріплення гірничої виробки в основному складається із стандартизованих елементів. Однак необхідно визначити параметри сітки затягування, яка слугує опорним елементом всій конструкції

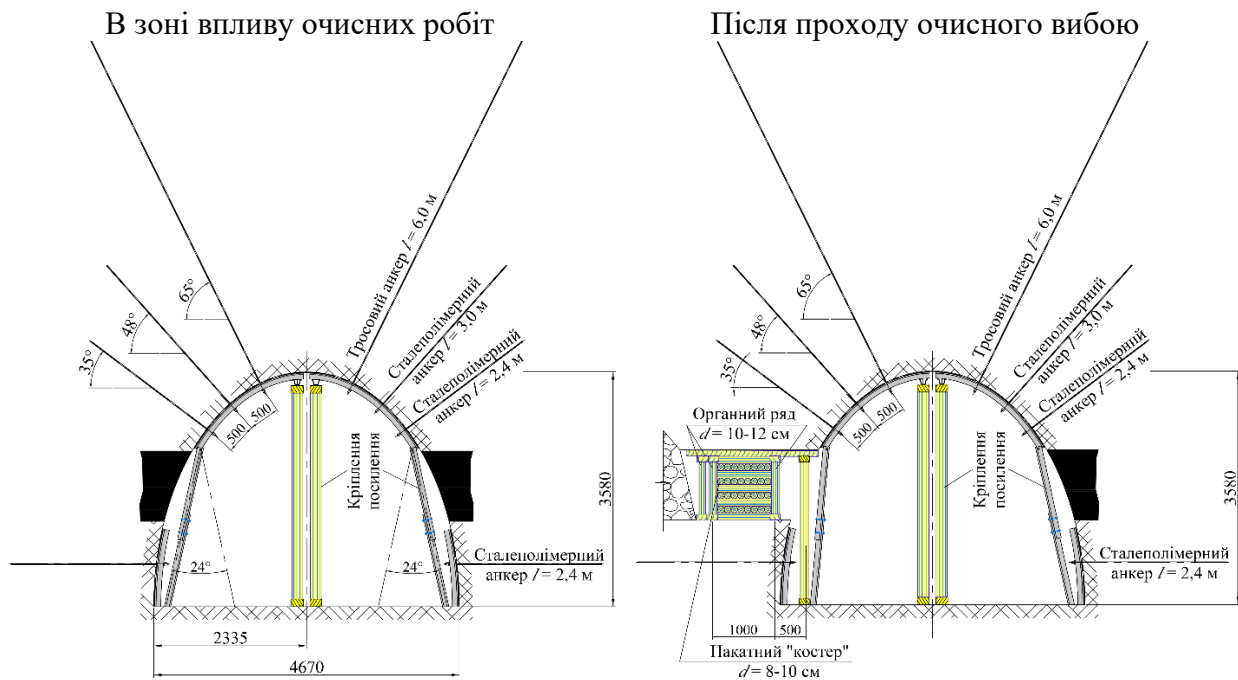


Рис. 4. Конструкція кріплення на різних стадіях експлуатації

Несуча здатність одного прутка сітки визначається за формулою [9]:

$$F_u = S \cdot \sigma_p, \text{Н} \quad (2)$$

де S – площа перетину прутка сітки, м^2 ; σ_p – міцність на розрив сталі, 500 МПа

Загальна несуча здатність сітки визначається за формулою [8]:

$$F_{total} = (n_h + n_v) \cdot F_u, \text{Н} \quad (3)$$

де n_h – кількість горизонтальних прутків на 1м^2 виробки, од; n_v – кількість вертикальних прутків на 1м^2 виробки, од;

Кількість прутків на 1м^2 виробки визначаємо за формулою [8]:

$$n_h = n_v = \frac{1000}{h_{кл}}, \text{од} \quad (4)$$

де $h_{кл}$ – розмір комірки сітки, м.

Наведена задача зводиться до визначення раціональної товщини прутка та розміру комірки сітки. Отже загальна математична модель для визначення навантаження на сітку має вигляд:

$$F_{total} = \frac{\pi \cdot d^2}{2 \cdot h_{кл}} \cdot \sigma_p, \text{Н} \quad (5)$$

де d – діаметр прутка сітки, мм;

Результати розрахунків представлені в таблиці 1. За результатами побудовано графік залежності несучої здатності сітки від її параметрів (рис. 5) та встановлено аналітичну залежність між цими параметрами.

Таблиця 1

Результати розрахунку параметрі сітки

Комірка, мм	Діаметр прутка, мм					
	5	6	7	8	9	10
100x100	1570,0	1308,3	1121,4	981,2	872,2	785,0
110x110	1899,7	1583,1	1356,9	1187,3	1055,4	949,8
120x120	2260,8	1884,0	1614,8	1413,0	1256,0	1130,4
130x130	2653,3	2211,1	1895,2	1658,3	1474,05	1326,6
140x140	3077,2	2564,3	2198,0	1923,3	1709,5	1538,6
150x150	3532,5	2943,8	2523,2	2207,8	1962,50	1766,2

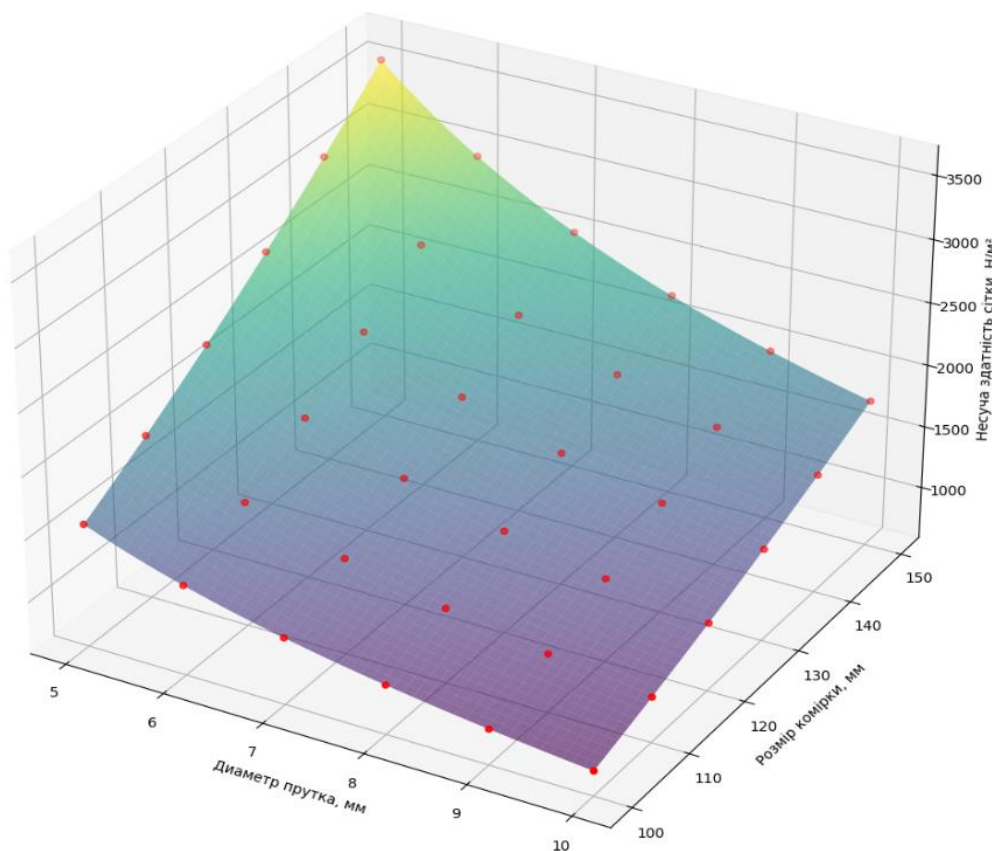


Рис. 5. Графік залежності несучої здатності сітки зтягування від розміру комірки та діаметру прутка

Для узагальнення результатів прийнято функціональну залежність у вигляді степеневого закону:

$$P = a \cdot d^b \cdot s^c, \text{ Н/м}^2 \quad (6)$$

де: P – несуча здатність сітки, Н/м²; d – діаметр прутка, мм; s – розмір комірки, мм; a, b, c – коефіцієнти, що визначаються методом найменших квадратів.

Апроксимація виконана у середовищі Google Collab за допомогою функції curve fit з пакету scipy.optimize та отримані наступні коефіцієнти для залежності (6): $a = 0,785$; $b = -1$; $c = 2$. Отримані коефіцієнти свідчать про наступне:

- зі збільшенням діаметра прутка несуча здатність зменшується обернено пропорційно (показник ступеня $b = -1$);
- зі збільшенням розміру комірки несуча здатність зростає пропорційно квадрату розміру ($c = 2$);
- коефіцієнт $a = 0,785$ задає масштаб залежності та одиниці вимірювання.

У інженерному вигляді залежність несучої здатності від параметрів сітки буде мати вигляд:

$$P = 0,785 \frac{s^2}{d}, \text{Н/м}^2 \quad (7)$$

Отримана формула повністю відтворює експериментальні дані з похибкою менше 1 %.

Виконавши аналіз набуваємо висновку що раціональними параметрами сітки є діаметр прутка 7мм з коміркою 120x120 або 8мм з коміркою 130x130 мм, яку і застосовуємо для подальших розрахунків.

Загальний вигляд гірничої виробки закріпленої запропонованим кріпленням наведено на рис. 6.

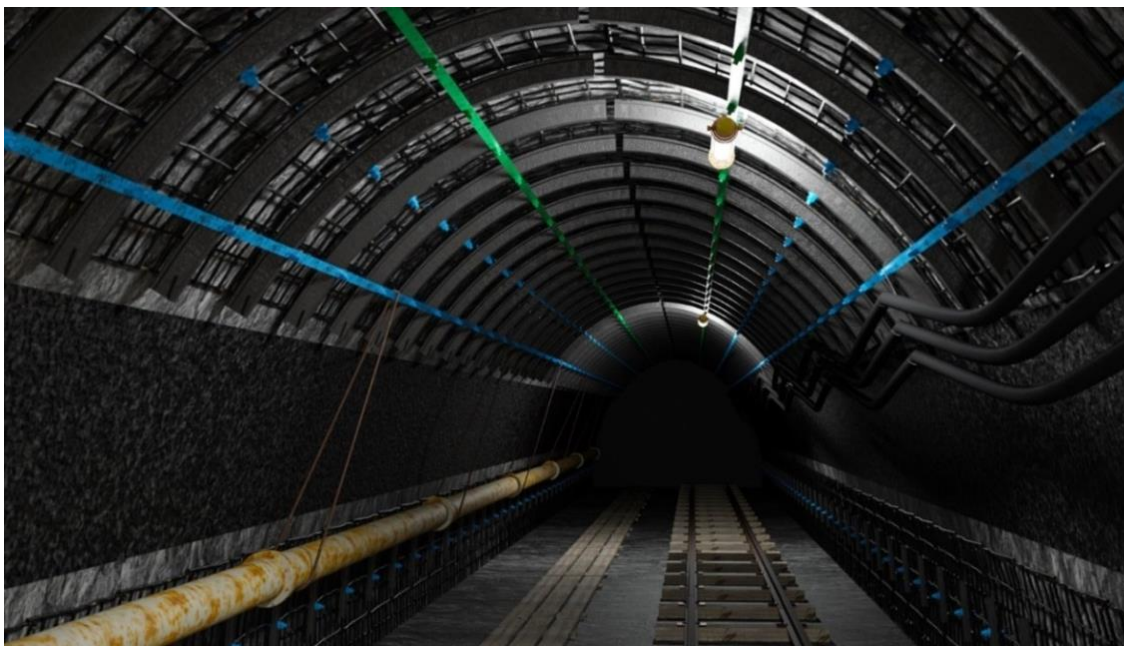


Рис. 6. Загальний вигляд запропонованого кріпленням

Підсумуючи, запропонована конструкція вирішує проблему металоємності кріплення та проміжку між рамами кріплення та гірничим масивом. Це надасть можливість зменшити собівартість та підвищити швидкість проведення підготовчих виробок.

Висновки. У статті обґрунтовано доцільність впровадження ресурсозберігаючої системи кріплення підготовчих виробок на основі дворівневого анкерного кріплення, що забезпечує підвищену стійкість у складних гірничо-геологічних умовах. Зазначено, що оптимальною формою поперечного перерізу виробки є напівеліпс, який максимально відповідає геометрії склепіння природної

рівноваги та забезпечує рівномірний розподіл гірського тиску без концентрації напружень.

Застосування канатних анкерів глибокого закладення та штангових анкерів дозволяє ефективно протидіяти процесам розшарування та деформацій у приконтурній зоні. Конструкція кріплення із використанням металевої сітки, прижимних планок, ремонтин та стояків тертя забезпечує адаптивну взаємодію з породним масивом, знижує ризик динамічних проявів та підвищує безпеку робіт.

Особливістю системи є її модульність і можливість повторного використання гірничих виробок, що сприяє зменшенню металоємності та підвищенню ефективності видобувних робіт. Таким чином, розроблена система кріплення не лише підвищує стабільність виробок, а й відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження та безпеки у вугільній галузі.

Перелік посилань

1. Бондаренко, В.І., Яковенко, В.Г., Петльований, М.В., Ковалевська, І.А., & Драгун, Д.В. (2024). Аналіз особливостей вивалоутворення приконтурних порід виїмкових виробок та шляхи їх стійкістю. *Збірник наукових праць НГУ*, (76), 127–141. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.127>
2. Haidai, O., Ruskykh, V., Ulanova, N., Prykhodko, V., Cabana, E. C., Dychkovskiy, R., Howaniec, N., & Smolinski, A. (2022). Mine Field Preparation and Coal Mining in Western Donbas: Energy Security of Ukraine—A Case Study. *Energies*, 15(13), 4653. <https://doi.org/10.3390/en15134653>
3. Sakhno, I., Sakhno, S., & Vovna, O. (2020). Assessing a risk of roof fall in the development mine workings in the process of longwall coal mining in terms of Ukrainian mines. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 72–80. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.072>
4. Dembure, T., Masethe, R., & Zvarivadza, T. (2025). Advanced Optimisation Of Ground Support Systems for Enhancing Underground Tunnel Stability in Geologically Adverse Conditions. *Rock Mechanics Letters*, 2(1), 66–75. Internet Archive. <https://doi.org/10.70425/rml.202501.9>
5. Хорольський, А.О. (2020). Проєктування технології кріплення виробок в складних гідрогеологічних умовах. *Геотехнічні проблеми розробки родовищ*, 11–15.
6. ДСТУ 60.2-00017541-019:2004 (2004). Кріплення шахтних виробок анкерне (Галузевий стандарт України).
7. Грінюв, В.Г., Хорольський А.О., & Виноградов Ю.О. (2019). Технологічні аспекти спорудження виробок у складних гідрогеологічних умовах. *Геотехнічна механіка*, 149, 132–141.
8. Bondarenko, V., Kovalevska, I., & Prokopenko, K. (2018). *Research of the application of combined anchor systems for the maintenance of re-used mining workings*.
9. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., Барабаш, М.В., Снігур, В.Г., & Гусєв О.С. (2017). *Комбіновані анкерні системи для повторного використання гірничих виробок: монографія*. Дніпро: ТОВ «ЛізуновПрес».

ABSTRACT

Purpose. Justification of the parameters of a resource-saving support system for preparatory workings, which ensures increased stability of the contour zone of the rock mass under complex geomechanical conditions characteristic of seam deposits in the Western Donbas.

The methods. The study employs a comprehensive approach encompassing theoretical analysis of the stress-strain state of the rock mass, graphical-analytical determination of the optimal working cross-sectional shape, modeling of two-level support systems, and evaluation of their effectiveness under mining pressure and reuse conditions.

Findings. The decisive influence of the cross-sectional shape on the stability of preparatory mine workings was established. The feasibility of using a semi-elliptical cross-section oriented with the major axis along the direction of the principal vertical stress was substantiated. This approach reduces stress concentration along the contour of the working and ensures uniform distribution of mining pressure. An improved support design was proposed in the form of a two-level frame-anchor system, combining short anchors for the contour zone and long cable anchors for stabilizing deeper rock layers. The technical solution is complemented by mesh reinforcement, pressure plates, and metal props, which enhance the overall stiffness and load-bearing capacity of the support. For complex mining-geological conditions with elevated pressure, an adaptive scheme using friction props and hydraulic elements capable of responding to load changes was developed, promoting increased safety in working operation.

The originality. The design of the support system for a preparatory mine working has been further developed, featuring a comprehensive interaction between the load-bearing and supporting elements and the rock mass. A relationship has been established between the load-bearing capacity of the mesh used for tightening the inter-frame space of the mine support and the parameters of its structural elements. A methodology for applying the proposed support design under underground conditions is presented.

Practical implementation. The proposed support system increases the stability of workings in complex geological conditions, reduces the metal intensity of structures, enhances operational safety, and allows for the reuse of preparatory workings, thereby promoting resource conservation and reducing mining production costs.

Keywords: *support systems, anchor system, mining pressure, rock mass stability, resource conservation.*

дата першого надходження статті до видання	03.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	04.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	05.09.2025