

## Розділ 2. Прогнозування і управління станом гірничого масиву

УДК 622.28.042.44

<https://doi.org/10.37101/ftpgp26.01.002>

### ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ КОМПОЗИТНОГО КРІПЛЕННЯ В УМОВАХ ШУ «ПОКРОВСЬКЕ»

I.V. Sheka<sup>1\*</sup>, S.M. Poimanov<sup>1</sup>, Yu.I. Demchenko<sup>1</sup>, N.Yu. Rukhlova<sup>1</sup>, O.K. Malova<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро,  
Україна

\*Відповідальний автор: e-mail: [vsheka1996@mail.com](mailto:vsheka1996@mail.com)

### DETERMINATION OF THE RATIONAL SECTION OF A COMPOSITE SUPPORT IN THE CONDITIONS OF THE POKROVSKE MINE ADMINISTRATION

I.V. Sheka<sup>1\*</sup>, S.M. Poimanov<sup>1</sup>, Yu.I. Demchenko<sup>1</sup>, N.Yu. Rukhlova<sup>1</sup>,  
O.K. Malova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: [vsheka1996@gmail.com](mailto:vsheka1996@gmail.com)

#### ABSTRACT

**Purpose.** Determination of the rational section of a composite support in the conditions of the Pokrovske Mine Administration.

**Methods.** To achieve this purpose, a computational experiment was carried out on the basis of a three-dimensional modeling of the geomechanical system of a preparatory workings with a layered isotropic rock mass at different depths of the working, using the finite element method with the nonlinear laws of change in the stress-strain state of the studied object in the Ansys Mechanical software product.

**Findings.** It has been established that the stresses in the basic version of the metal support reach maximum values (over 270 MPa) in the risers from the sole to a height of 0.8-1.1 m, symmetrically on both sides; the upper face is also affected by maximum stresses from the center of the workings in both directions by 1.4-1.5 m, which is on the verge of deformation and destruction of the support. Under the same conditions, the support made of D39 composite material does not reach the maximum stresses, except for a small zone of 0.2-0.3 m in the risers and 0.3-0.4 m in the upper face, which does not lead to the destruction of the support and changes in the cross-section of the working. Based on the aggregate results of the analysis of the state of the rock mass at great depths of mining and the composite support, a family of graphs was constructed that reflect the law-dimensional influence of geomechanical factors on the cross-section of the composite support. The cross-section of the composite support varies in a power law dependence on

the ratio of the depth of the working  $H$  and the average calculated compression resistance  $R$  of the rocks. This makes it possible to predict the stable state of the working face throughout its entire life. The established correlation is between the cross-sectional parameter of the composite support and the  $H/R$  ratio, which allowed us to formulate one of the main scientific conclusions as follows: the load on the composite support of the preparatory workings is directly proportional to the  $H/R$  ratio and inversely proportional to the cross-section of the composite support. This ensures the selection of the parameters of the composite support system with a 5-fold reduction in material consumption without compromising the stability of the working. The most suitable support cross-section will be a composite support with a cross-section of 390 mm, because when using this support, the  $\sigma_{\max}$  areas have the smallest values.

**Originality.** The most detailed geometry of the rock mass model and composite support at different depths of working in the conditions of the Pokrovske Mine Administration was developed for the first time. It is established that when using a composite support with a cross section of 390 mm, the  $\sigma_{\max}$  regions have the smallest values.

**Practical implications.** The results obtained prove that in the conditions of the Pokrovske Mine Administration at different depths of working it is more rational to use composite support with a section of 390 mm, which, together with the lightweight design and acceleration of the shift, will contribute to the development of underground coal mining.

**Keywords:** mine workings, composite support, maximum stresses, modeling, stress-strain state, rational section.

## 1. ВСТУП

Незважаючи на великий вплив тенденцій декарбонізації [1-3], проблема забезпечення стійкості гірничих виробок на вугільних шахтах залишається однією з найактуальніших у гірничому виробництві [4, 5], так як від їх експлуатаційного стану залежить ефективність та безпечність проведення гірничих робіт. Спорудження та підтримка виробленого простору досить складний процес, особливо в умовах глибоких горизонтів, де мають місце прояви нерівномірного гірського тиску, які притаманні ШУ «Покровське» [6, 7].

Необхідність створення нових засобів кріплення гірничих виробок з істотним збільшенням стабільності параметрів, а також робочих характеристик, диктується об'єктивно великими вимогами до кріплення та важкістю гірничо-геологічних умов.

Питаннями розробки та впровадження нових видів кріплення у гірничі виробки присвячено роботи В.І. Бондаренка [8, 9], І.А. Ковалевської [10], О.П. Круковського [11, 12], В.Я. Кириченка [13], Р.М. Терещука [14], Ю.М. Халимендика [15] та ін.

Автори у дослідженні [16] приділили значну увагу питанню інноваційних перспектив підземної експлуатації вугільних родовищ. В роботах [17-19] було обґрунтовано застосування композитного матеріалу вуглепластику як інноваційного у елементах кріплення гірничих виробок. Обґрунтування довело, що вуглецеві волокна мають не гірші фізико-механічні властивості аніж ме-

талеві. Наукова праця [20] характеризується тим, що автор обґрунтував закономірності деформування системи «кріплення-масив» у слабких породах у зоні впливу очисних робіт.

У дослідженні [21] автори розкрили суть рішення з оптимізації ресурсозберігаючого обслуговування гірничих виробок. У роботі [22] значна увага приділена питанню стійкості гірничих виробок, що закріплені рамно-анкерною системою кріплення. Колектив авторів у наукових працях [23-25] розробив систему прийняття рішень, яка дозволяє оптимізувати параметри експлуатації, знизити собівартість видобутку, вибрати структуру технологічних зв'язків з заданим рівнем продуктивності. Наукові праці [26, 27], які опубліковані закордонними вченими, присвячено обґрунтуванню та впровадженню нових ресурсозберігаючих технологій кріплення гірничих виробок.

Аналізуючи дослідження [28-30] можна зробити висновок, що зі збільшенням глибини проведення виробки, потребується зміна спецпрофілю СВП, змінюється і його питома вага, за рахунок чого збільшується трудоємність робіт, що виконуються, темпи проведення виробок зменшуються, а величина конструктивної піддатливості стає невеликою, що обумовлюється незадовільним станом гірничих виробок.

Колектив авторів кафедри гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка» під керівництвом проф. Бондаренка В.І. у своїх роботах [31-37] спираючись на досвід використання аналітичних методів розрахунку НДС гірського масиву та системи кріплення виробки обґрунтовували взаємодію композитного кріплення із гірським масивом за різної постановки задачі.

Також слід зазначити, що незважаючи на досить складне становище у вугільній промисловості України, в цілому ряді підприємств виконуються роботи з розробки нових способів кріплення зі значним ресурсозбереженням.

Виходячи із вищесказаного, метою роботи є визначення раціонального перерізу композитного кріплення в умовах ШУ «Покровське». Необхідно оцінити зміну напружено-деформованого стану (НДС) у кріпленні, яке пропонується до використання та визначати переріз, який буде раціональним.

## **2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Для досягнення поставленої мети роботи дослідження проводилось за допомогою математичного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) у пакеті прикладних програм Ansys Mechanical.

Проведення обчислювального експерименту передбачало повний комплекс досліджень по збору даних, обробці та проведенню розрахунку і аналізу отриманих результатів. Таким чином, розв'язання задачі із застосуванням МСЕ необхідно розділити на кілька основних етапів, таких як: постановка задачі, обґрунтування та створення геометричної моделі, обґрунтування фізико-механічних властивостей матеріалів, додавання граничних умов, побудова сітки скінченних елементів, проведення автоматичного розрахунку системи рівнянь та аналіз одержаних результатів.

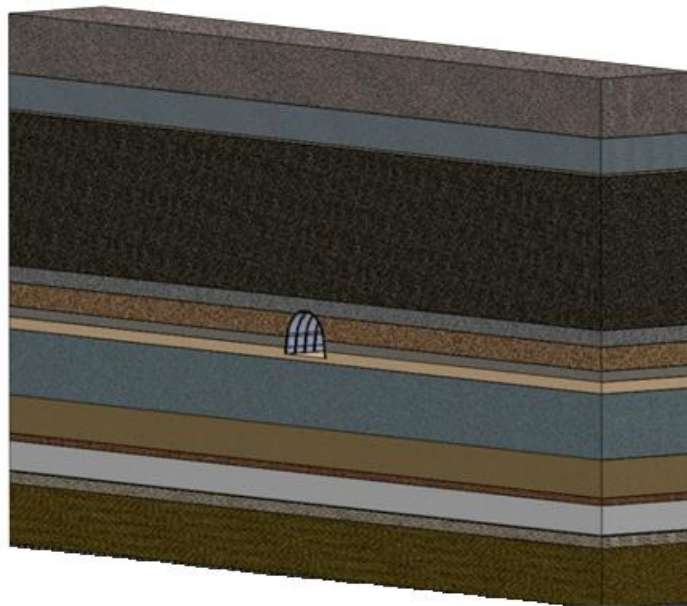
Використання подібної методики дозволяє отримати максимально точні результати дослідження для конкретних гірничо-геологічних умов відповідно до схеми кріплення виробок, а також поточної виробничої ситуації.

Обчислювальний експеримент проводився в три етапи для різних видів кріплення (металева та композитне). Для об'єктивності аналізу отриманих результатів всі однотипні епюри були приведені до загального градієнта відображення та єдиних інтервалів зміни показників.

Під час проведення обчислювальних експериментів вдалося врахувати максимальну кількість негативних факторів, які прямо чи опосередковано впливають на збереження перерізу виробки та роботу композитного кріплення. Отримано та проаналізовано велику кількість даних про стан гірського масиву та композитного кріплення.

Кожен шар моделювався як окрема деталь необхідного розміру з відповідними механічними характеристиками. Відповідно до геологічного прогнозу, що базується на даних геологорозвідувальних свердловин № 3495 та № 4186, для конвеєрного штреку.

За допомогою комп'ютерного моделювання у програмному продукті Ansys Mechanical було детально змодельовано кріплення із композитних матеріалів та шаруватий ізотропний масив для умов ШУ «Покровське» (Рис. 1) та зроблені дослідження інтенсивності напружень  $\sigma$  для трьох варіантів кріплення.



*Рисунок 1. Модель структури вуглевмісної породної товщі пласта d<sub>4</sub> на базовій ділянці вентиляційного штреку*

Крок встановлення кріплення – 0,5 м. Усі елементи кріплення моделювалися як окремі деталі, що володіють відповідними механічними характеристиками. Для забезпечення умов суцільності розрахункової моделі та зниження випадкових збурень контактних напружень за поверхнею їх сполучення встановлюється елемент зі зниженими характеристиками міцності товщиною 50 мм, який відповідає затяжці із забутовкою, що встановлюється в закріпленому просторі. Цей елемент разом із моделлю вузла піддатливості забезпечує найбільш адекватну поведінку кріплення.

Розрахункова модель складається з 13 породних шарів (табл. 1) та складає: падіння/повстання – 55 м, по висоті – 49,3 м та протяжності виробок – 5 м, кут падіння пласта – 4 градуси. На відстані 15 метрів від лівого краю моделі та глибині 23 метри розташований дренажний вентиляційний штрек, переріз якого моделювався арочної форми під кріплення КШПУ-17,7. Для його підтримки використовувалося рамне кріплення спецпрофілю СВП-33 та кріплення із композитного матеріалу.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості порід

№	Тип породи	Потужність, м	Масова густина, кг/м <sup>3</sup>	Опір стиску, МПа	Опір розтягу, МПа	Модуль Юнга, МПа
1.	Алевроліт	1,125	2340	13,5	2,8	3000
2.	Вугільний пл.	0,15	1480	40,0	1,0	3000
3.	Алевроліт	3,425	2340	13,5	2,8	3000
4.	Пісковик	14,175	2530	25,0	3,3	15000
5.	Алевроліт	4,475	2340	13,5	2,8	3000
6.	Вугільний пл. d <sub>4</sub>	1,525	1480	40,0	1,0	3000
7.	Алевроліт	0,4	2340	13,5	2,8	3000
8.	Пісковик	15,675	2530	25,0	3,3	15000
9.	Вугільний пл.	0,25	1480	40,0	1,0	3000
10.	Алевроліт	2,7	2340	13,5	2,8	3000
11.	Пісковик	3,1	2530	25,0	3,3	15000
12.	Алевроліт	1,3	2340	13,5	2,8	3000
13.	Пісковик	1,0	2340	25,0	3,3	15000

Спецпрофіль СВП виготовляється зі сталі Ст.5 з механічними характеристиками: розрахункова межа текучості  $\sigma_T = 270$  МПа, модуль пружності  $E^p = 21 \cdot 10^4$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu^p = 0,3$ . Ці характеристики прийняті до розрахунку при моделюванні повної діаграми деформування. Відображення повної діаграми деформування дозволяє врахувати пластичні деформації у рамі такі, як і у шахтних умовах.

Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона імітатора вузла піддатливості для металевого кріплення прийнято як для сталі Ст.5 ( $E^p = 21 \cdot 10^4$ ,  $\mu^p = 0,3$ ), щоб пружні деформаційні характеристики були постійними по всьому контуру рами.

Імітатор вузла піддатливості моделюється у формі поперечного перерізу відповідного номера спецпрофілю СВП розташовувався за координатами замків рами довжиною 400 мм. Це дозволило моделювати раму суцільною по усьому контуру кріплення з двома вставками з матеріалу імітатора вузла піддатливості, що відрізняється від механічних характеристик сталі Ст.5 тільки зниженою межею текучості.

Композитне кріплення виготовлялося з вуглепластику з механічними характеристиками: розрахункова межа текучості  $\sigma_T = 270$  МПа, модуль пружності  $E^p = 12,5 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu^p = 0,3$ . Ці характеристики прийняті до розрахунку при моделюванні повної діаграми деформування. Відображення повної діаграми деформування дозволяє врахувати пластичні деформації. Такий підхід сприяє підвищенню адекватності моделювання реального об'єкта.

Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона імітатора вузла піддатливості для композитного кріплення прийнято як для парафінопатронів згідно роботи [29] ( $E^p = 12,5 \cdot 10^3$ ,  $\mu^p = 0,3$ ), аби пружні деформаційні характеристики були постійними по всьому контуру рами.

Імітатор вузла піддатливості для композитного кріплення моделюється у формі поперечного перерізу парафінопатрона. Це дозволило моделювати раму суцільною по усьому контуру кріплення з двома вставками з матеріалу імітатора вузла піддатливості, що відрізняється від механічних характеристик тільки зниженою межею текучості. Така ідеалізація забезпечила стабільність процедури розрахунку НДС за повною діаграмою деформування матеріалів її елементів.

Конструкція анкерів відображена максимально достовірно. Система анкерного кріплення складається з шести сталеполімерних анкерів та двох канатних. Анкери встановлюються в покрівлю виробки. Крок встановлення – 0,5 м, діаметр несучого елемента 22 мм. Довжина канатних анкерів 7 м, а сталеполімерних – 2,4 м. Механічні властивості анкерів мають такі значення: межа текучості  $\sigma_T^a = 220$  МПа, модуль пружності  $E^p = 21 \cdot 10^4$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu^p = 0,3$ .

По бокових площинах моделі введено умову плоскої деформації, що відповідає реальному механізму деформування масиву та широко використовується в механіці підземних споруд [38-40]. Відповідно до цієї умови в непопрушеному масиві діють горизонтальні стискаючі напруження

$$\sigma_x = \lambda \gamma H = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H, \quad (1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона розглянутого породного шару або вугільного пласта.

Крім компонент поля напружень у моделі аналізується також величина наведених напружень  $\sigma$  (або інтенсивність напружень як інтегральний параметр НДС, що використовується в розрахунках міцності). За загальноприйнятим для гірських порід законом Кулона-Мора.

$$\sigma = \sigma_1 - \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} \sigma_2, \quad (2)$$

де  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – максимальні та мінімальні головні напруження за елементарним об'ємом;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя породи.

Для об'єктивності подальшого аналізу отриманих результатів всі однотипні епюри були приведені до загального градієнта відображення та єдиних інтервалів зміни показників.

В умовах ШУ «Покровське» оптимальним є використання комбінації двох основних видів кріплення. При цьому відмінно зарекомендувала себе методика, яка дозволяє об'єднати анкерне та рамне кріплення в єдину вантажонесучу систему за допомогою канатних зв'язків. В результаті анкера, що закріплені в масиві, використовуються для підвищення ефекту опору рами від тиску порід, спираючись на властивості міцності гірського масиву. Виходить повністю замкнута структура, яка максимально ефективно підтримує контур виробки.

### **3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Для визначення раціонального перерізу композитного кріплення проведено низку досліджень. Основна мета полягала у визначенні раціонального перерізу щодо глибини проведення виробки та урахування властивостей гірських порід. У результаті проведено серію обчислювальних експериментів на базі методу скінченних елементів.

У роботі представлені епюри загального вигляду моделі лише для останнього етапу розрахунку. Це зумовлено незначними відмінностями у розподілі напружень на різних етапах розрахунку, що свідчить про правильне обґрунтування розмірів моделі.

Проведено серію розрахунків у пружно-пластичній постановці з різним перерізом композитного кріплення, починаючи від діаметру стояків та верхняку 330 мм до 390 мм (D33 – D39) за умов зміни глибини проведення виробки. Використовувалася просторова модель вуглевмісного гірського масиву при відпрацюванні 1 північної лави пласта  $d_4$  ШУ «Покровське».

На рис. 2 представлені епюри інтенсивності трьох етапів розрахунку зі збільшенням глибини проведення виробки від 1000 м до 1060 м. В результаті аналізу епюри інтенсивності напружень  $\sigma$  можна відзначити, що загальний характер розподілу напружень, порівняно з попередньою серією розрахунків, залишився тим самим.

З епюр чітко простежуються області розвантаження у покрівлі та підшві виробки. У покрівлі ця область збільшується зі збільшенням глибини проведення виробки, а у підшві область розвантаження досягає 2 – 3 м завширшки і 5 – 7 м заввишки. Це свідчить про досить інтенсивне здимання порід підшви.

Цілком закономірно, що з кожним наступним етапом експерименту та збільшенням глибини проведення підготовчої виробки відбувається збільшення максимальних напружень.

Для детального аналізу НДС рамного та композитного кріплень використана епюра інтенсивності напружень  $\sigma$ , на яку окремо винесені тільки елементи кріплення без гірського масиву для різної глибини проведення виробки.

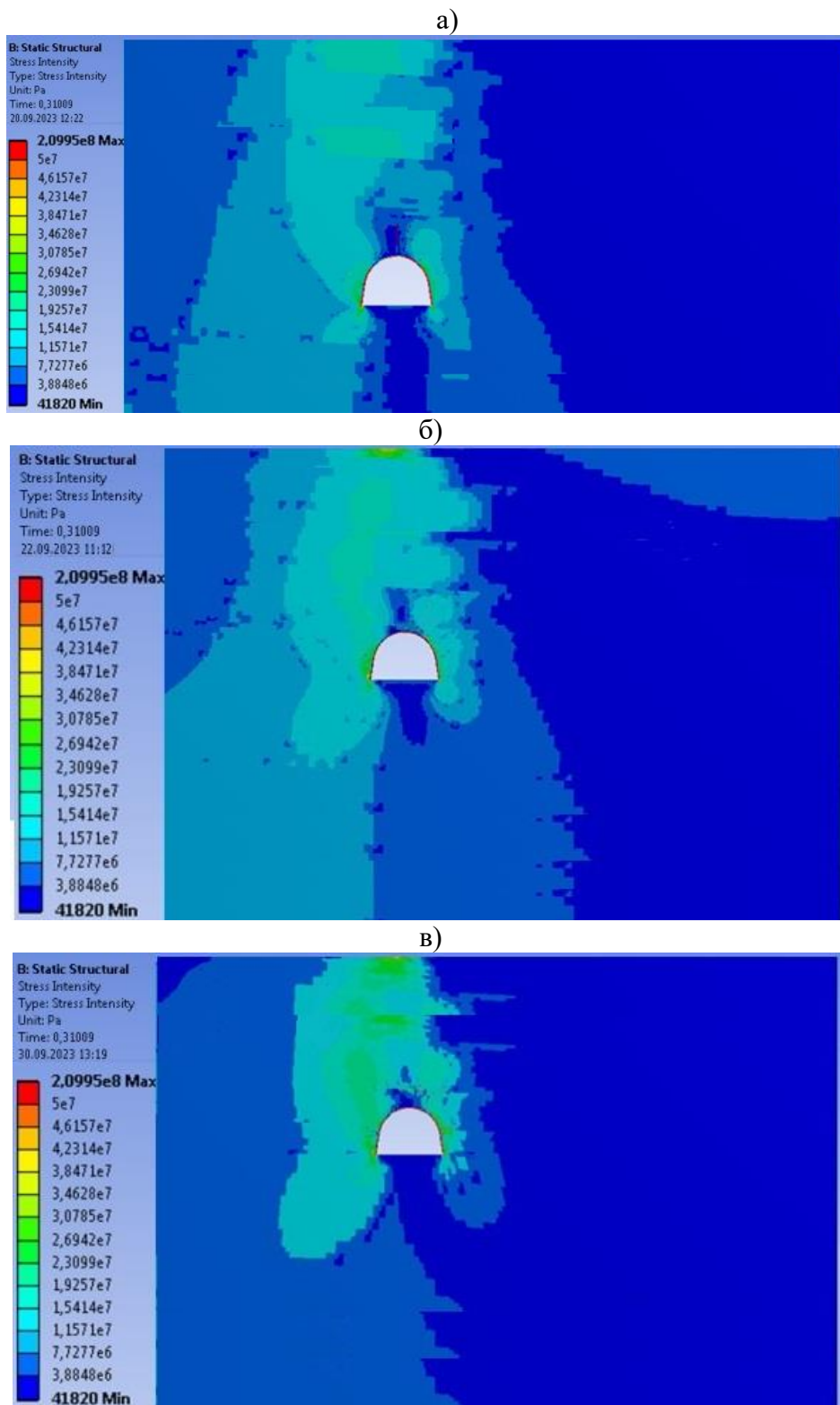
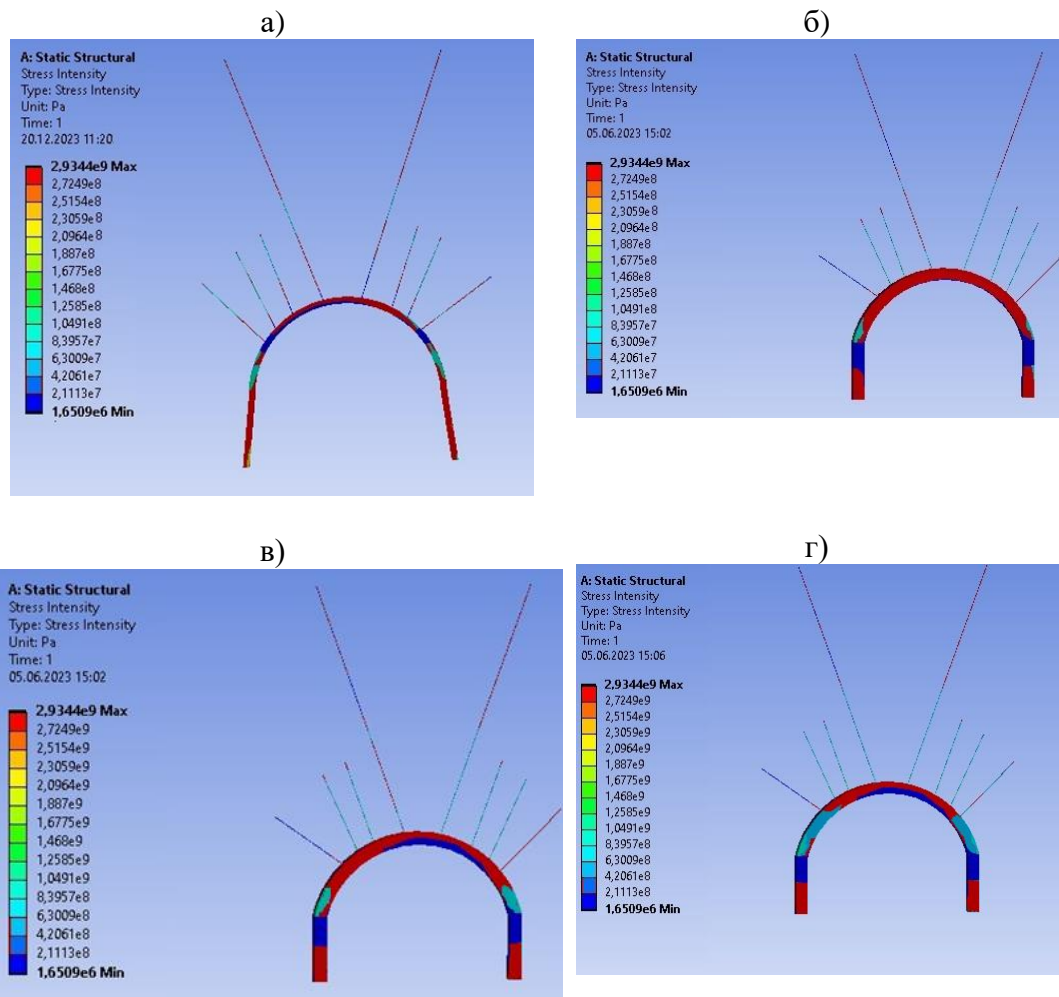


Рисунок 2. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma$  в гірському масиві при глибині проведення виробки: а – 1000 м; б – 1030 м; в – 1060 м





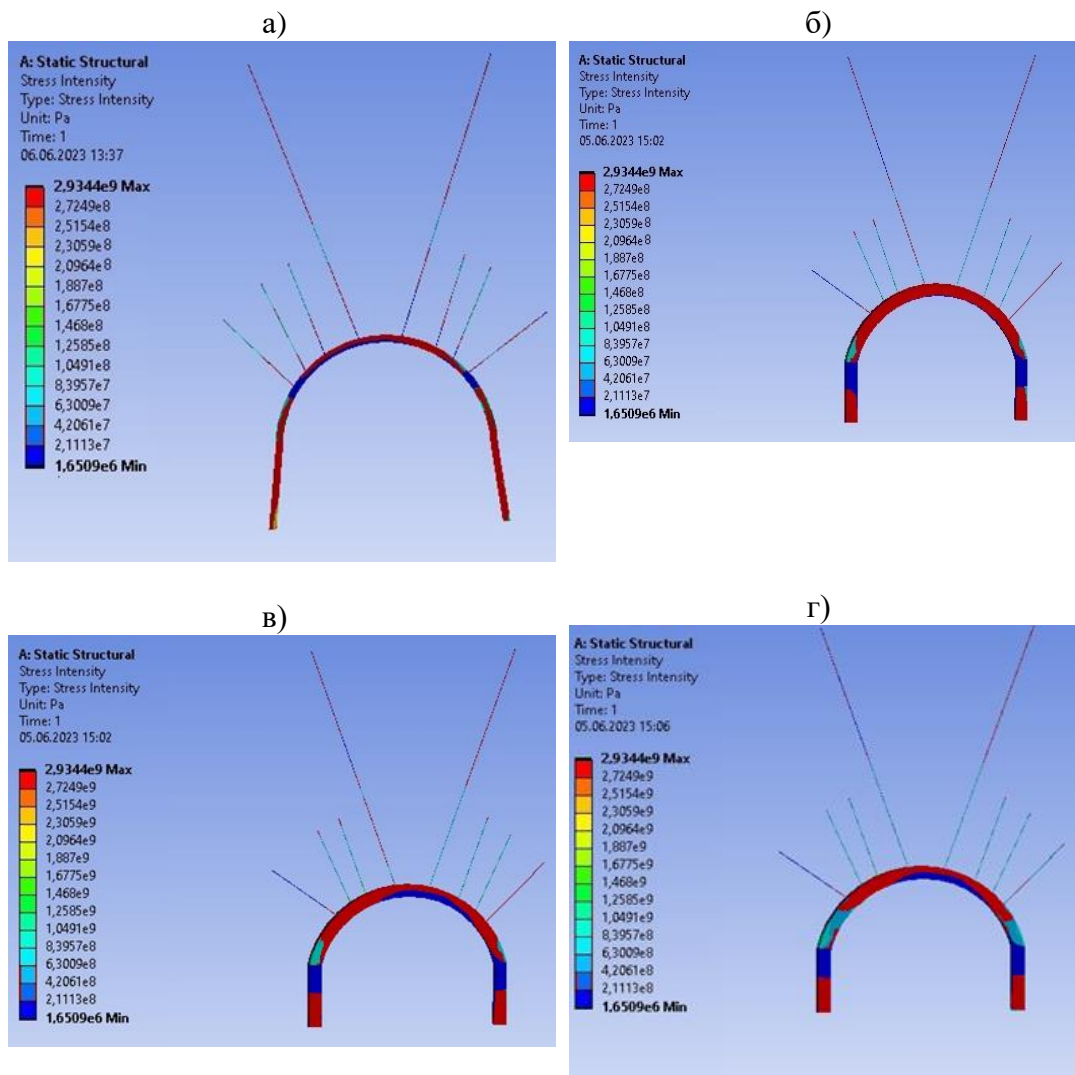
**Рисунок 3.** Епюра інтенсивності напружень  $\sigma$  для різного виду кріплення при глибині  $H=1000$  м: а – базового металевого; б – композитного кріплення D33; в – композитного кріплення D36; г – композитного кріплення D39

З одержаних епюр видно, що базовий варіант металевого кріплення та композитного кріплення з перерізом D33 (рис. 3а – 3б) на глибині 1000 м піддається високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють та перевищують 270 МПа, що є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує межу міцності.

Композитне кріплення з перерізом D36 та D39 (рис. 3в – 3г), на глибині 1000 м піддається вже менш високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які коливаються у межах 240 – 260 МПа.

Анкерне кріплення спрацьовує на повну можливість, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до защемлення та можливого зрізу анкерів. У цій ситуації анкер не може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може послабити кріпильний ефект.

Наступним етапом розрахунку є глибина проведення виробки 1030 м, епюри інтенсивності напружень  $\sigma$  наведено на рис. 4.



**Рисунок 4.** Епюра інтенсивності напружень  $\sigma$  для різного виду кріплення при глибині  $H=1030$  м: а – базового металевого; б – композитного кріплення D33; в – композитного кріплення D36; г – композитного кріплення D39

З одержаних епюр видно, що базовий варіант металевого кріплення та композитного кріплення з перерізом D33 (рис. 4а – 4б) на глибині 1030 м піддається високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють та перевищують 270 МПа, що є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує границю міцності.

Анкери спрацьовують, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до защемлення та можливого зрізу анкерів. У цій ситуації анкер не

може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може по-слабити кріпильний ефект.

Композитне кріплення з перерізом D36 та D39 (рис. 4в – 4г), на глибині 1030 м піддається вже менш високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють прибли-зно 250-260 МПа.

Анкерне кріплення спрацьовує майже на повну можливість, в арматурі двох канатних анкерів, що розташовані в центральній частині концентрація напружень поступово збільшується, досягаючи свого максимуму в центра-льній частині їх довжини, а на самому контурі знову знижуються до 80 – 140 МПа.

Наступним етапом розрахунку є глибина проведення виробки 1060 м, епюри інтенсивності напружень  $\sigma$  представлені на рис. 5.

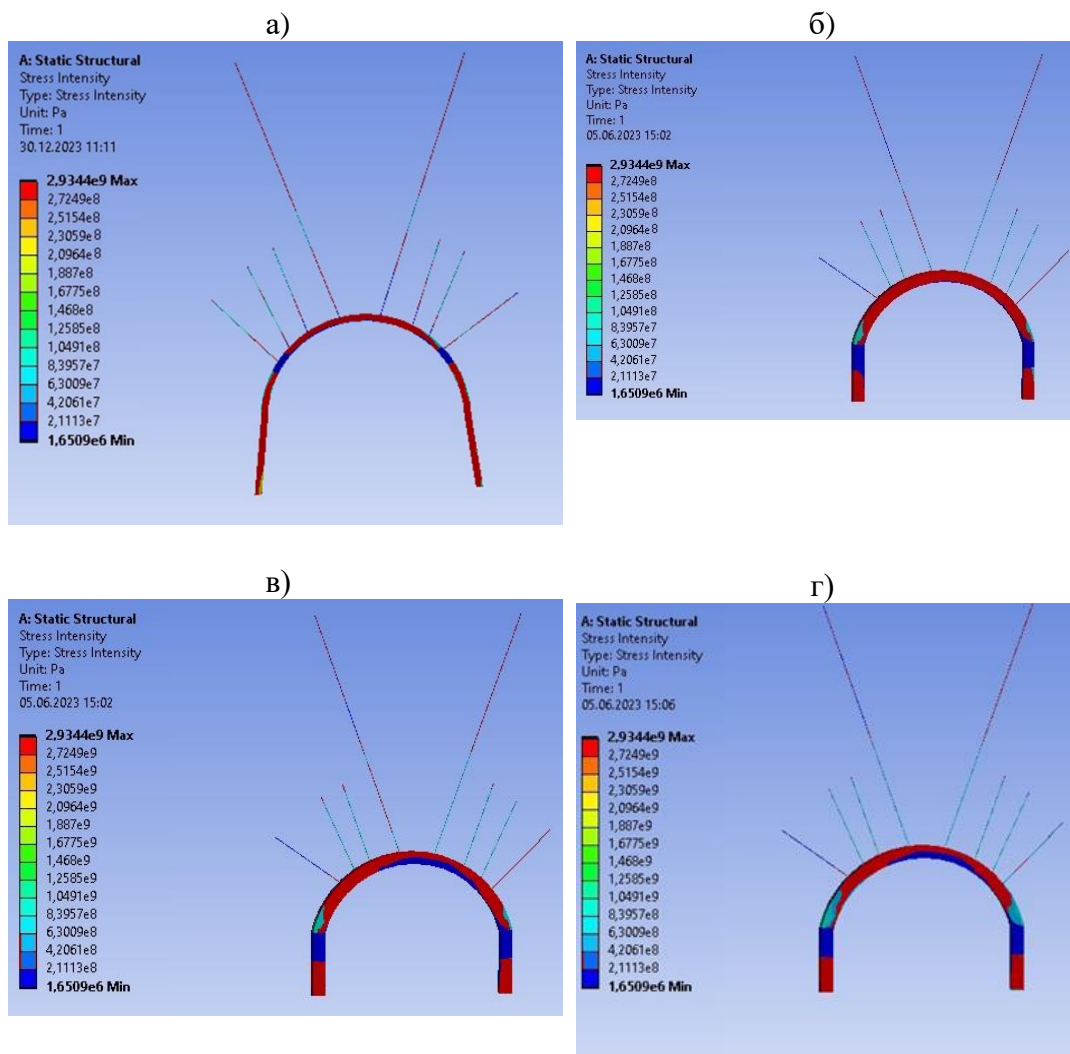


Рисунок 5. Епюра інтенсивності напружень  $\sigma$  для різного виду кріплення при глибині  $H=1060$  м: а – базового металевого; б – композитного кріплення D33; в – композитного кріплення D36; г – композитного кріплення D39

Металева та композитна кріплення з перерізом D33 (рис. 5а – 5б) на глибині 1060 м зазнає значних навантажень на обидва стояки, що викликано рядом факторів, включаючи тиск бічних порід, а також прийняттям частини навантаження на верхняк через піддатливі елементи. В цілому, по всій довжині стояків відбувається розподіл напружень, що перевищують модуль пружності, що провокує перехід матеріалу в нелінійний стан. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють та перевищують 270 МПа, що є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує границю міцності.

Анкери в цілому спрацьовують, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до заземлення та можливого зрізу анкерів. У цій ситуації анкер не може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може послабити кріпильний ефект.

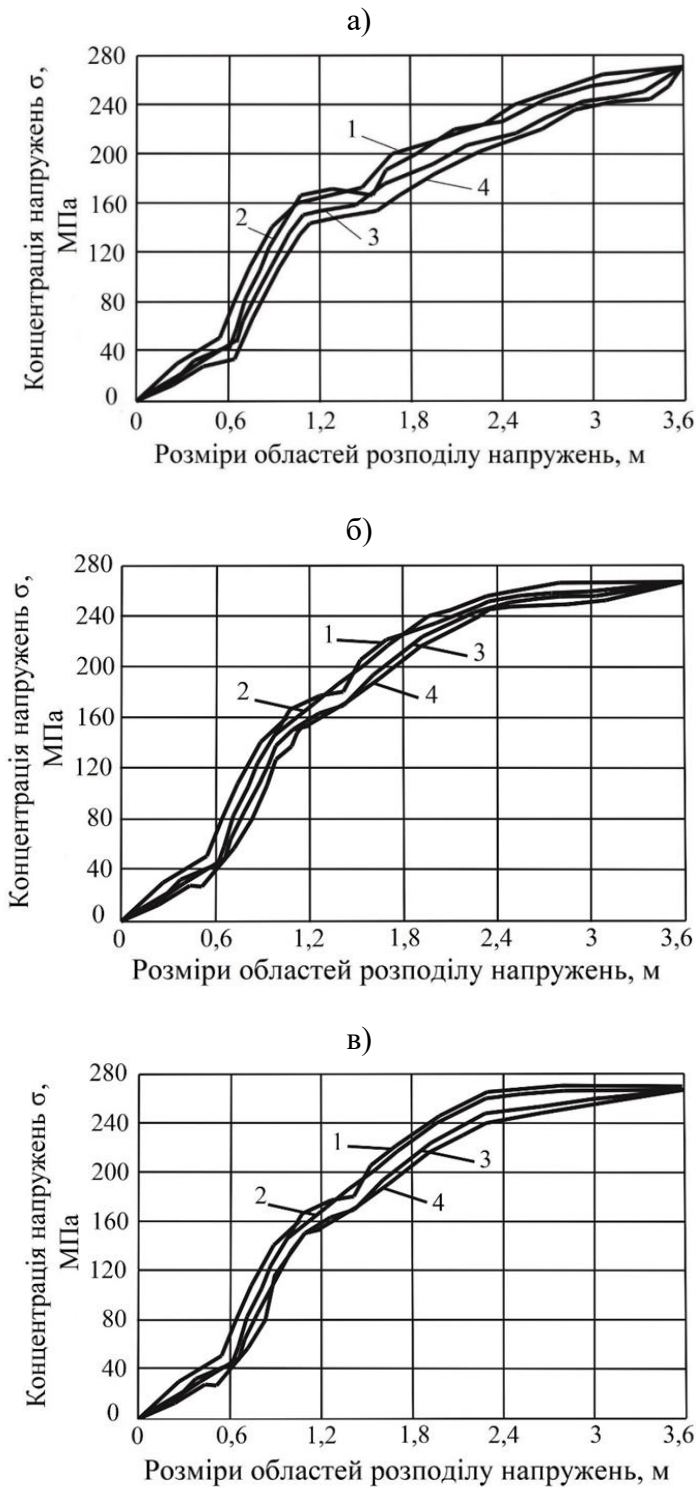
Композитне кріплення з перерізом D36 та D39 (рис. 5в – 5г), поза на глибині 1060 м піддається вже менш високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють приблизно 240 – 260 МПа.

З даних, що представлені на епюрах рис. 3 – 5, було побудовано графіки (рис. 6), де для кожного етапу розрахунку показано розміри областей розподілу напружень у різних видах кріплення.

При аналізі отриманих графіків найбільш висока концентрація напружень спостерігається при використанні базового металевих кріплення. Область  $\sigma_{\max}$  поширюється на 3,6 м і 3 м відповідно, після чого починається рівномірне зниження напружень. Область з максимальними напруженнями утворюється в центральній частині верхняка з невеликим ухилом у ліву сторону. При цьому при збільшенні перерізу композитного кріплення до D39 спостерігається поступове зменшення областей  $\sigma_{\max}$ .

Зі зміною перерізу композитного кріплення області  $\sigma_{\max}$  зменшуються аж до зниження напружень нижче цього рівня. При цьому зниження відбувається майже симетрично. Це пов'язано з перерозподілом НДС у боках виробок та зміною впливу тиску очисного вибою, що за різної величини перерізу композитного кріплення дає різну картину напружень.

Для НДС анкерного кріплення враховувалися розміри області максимально допустимих напружень, що досягають межі текучості сталі  $\sigma_{\max} = 270$  МПа по кожному анкеру для всіх етапів дослідження. Для цього побудовано гістограму (рис. 7), яка відображає розміри даних областей.



**Рисунок 6.** Концентрація напружень  $\sigma_{max}$  при різному виді кріплення відповідно до глибини проведення виробки: а) 1000 м; б) 1030 м; в) 1060 м, де 1 – базове металеве кріплення; 2 – композитне кріплення D33; 3 – композитне кріплення D36; 4 – композитне кріплення D39

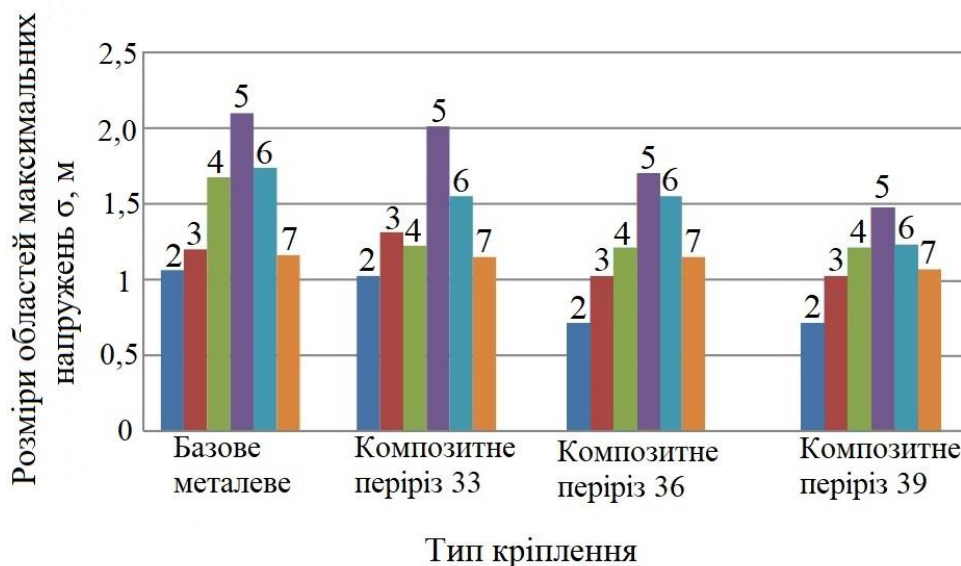
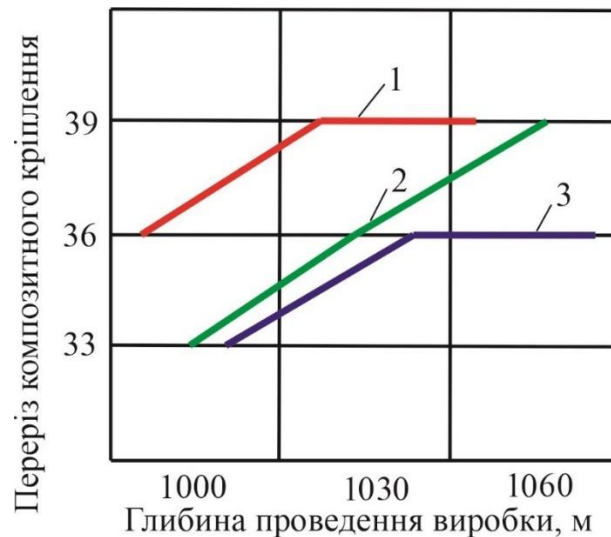


Рисунок 7. Вплив зміни перерізу кріплення на розміри області  $\sigma_{max}$  в анкерах

На графіку наведено анкери 2 – 7 що встановлюються для чотирьох видів кріплень. Це пов'язано з тим, що в анкерах 1 та 8 відсутні області з напруженнями, що досягають значення  $\sigma_{max}$ . Слід зазначити, що часто області  $\sigma_{max}$  утворюються в місцях контактів літологічних різниць, що свідчить про опір анкерів зсуву породних шарів відносно один одного. В результаті аналізу епюр анкерного кріплення встановлено, що найбільше поширення областей  $\sigma_{max}$  відзначено при використанні базового металевого кріплення та композитного з перерізом 33, при цьому максимальна довжина розподілу припадає на два центральні анкери, досягаючи 1,5 м.

Результати досліджень дозволяють отримати максимально повну картину НДС композитного кріплення виробки. На підставі проведених експериментів можна з високим ступенем об'єктивності визначити недоліки системи композитного кріплення, що буде покладено в основу для розробки раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів на великих глибинах.

Окрім аналізу різних глибин проведення виробки було проведено додаткові дослідження для різних властивостей гірських порід на прикладі ШУ «Покровське». За сукупністю результатів проведеного аналізу стану гірського масиву на великих глибинах розробки та композитного кріплення побудовано сім'ю графіків (рис. 8), що відображають закономірності впливу геомеханічних факторів на переріз композитного кріплення. Чітко простежується нелінійний прямо пропорційний зв'язок перерізу композитного кріплення з глибиною  $H$  проведення виробки та нелінійний обернено пропорційний зв'язок з її середнім розрахунковим опором на стискання  $R$  гірського масиву.



**Рисунок 8. Залежність раціонального перерізу композитного кріплення від глибини проведення виробки  $H$  при середньому розрахунковому опорі гірського масиву на стискання: 1 –  $R = 13,5$  МПа; 2 –  $R = 18,0$  МПа; 3 –  $R = 25,0$  МПа**

Переріз композитного кріплення змінюється за степеневу залежністю від співвідношення глибини проведення виробки  $H$  та середнього розрахункового опору на стискання  $R$  гірських порід. Це дозволяє прогнозувати стійкий стан виробки протягом усього терміну її експлуатації.

Найбільш тісна кореляція має місце між параметром перерізу композитного кріплення і відношенням  $H/R$ , що дозволило сформулювати один із основних наукових висновків дисертації таким чином: навантаження на композитне кріплення підготовчої виробки, знаходиться в прямо пропорційній степеневій залежності від параметра  $H/R$  і обернено пропорційно перерізу композитного кріплення. Це забезпечує вибір параметрів системи композитного кріплення зі зниженою матеріаломісткістю без погіршення стійкості виробки.

В результаті можна відзначити, що найбільш підходящим перерізом кріплення буде композитне з перерізом 390 мм, бо при використанні цього кріплення області  $\sigma_{\max}$  мають найменші значення.

Результати досліджень дозволяють отримати максимально повну картину НДС композитного кріплення виробки. На підставі проведених експериментів можна з високим ступенем об'єктивності визначити недоліки системи композитного кріплення, що буде покладено в основу для розробки раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів на великих глибинах.

Отримані результати не суперечать численним геомеханічним дослідженням у цій області [41-45]. Це підтверджує відповідність моделей реальним умовам проведення гірничих виробок у вугільних шахтах.

#### 4. ВИСНОВКИ

У роботі розроблена максимально деталізована геометрія моделі гірського масиву та композитного кріплення. Розроблено повноцінну просторову модель досліджуваної ділянки з урахуванням шарнірно-блокового зсуву порід.

Встановлено, що напруження в базовому варіанті металевого кріплення досягають максимальних величин (понад 270 МПа) у стояках від підшви на висоту 0,8 – 1,1 м, симетрично з обох сторін; на верхняк також впливають максимальні напруження від центру виробки в обидва боки на 1,4 – 1,5 м, що знаходиться на межі деформації і руйнування кріплення. А кріплення із композитного матеріалу D39 в тих же умовах не досягає максимальних напружень за винятком невеликої зони розміром 0,2 – 0,3 м у стояках та 0,3 – 0,4 м у верхняку, що не призводить до руйнування кріплення та зміни поперечного перерізу виробки.

За сукупністю результатів проведеного аналізу стану гірського масиву на великих глибинах розробки та композитного кріплення побудовано сім'ю графіків, що відображають закономірності впливу геомеханічних факторів на переріз композитного кріплення. Переріз композитного кріплення змінюється за степеневою залежністю від співвідношення глибини проведення виробки  $H$  та середнього розрахункового опору на стискання  $R$  гірських порід. Це дозволяє прогнозувати стійкий стан виробки протягом усього терміну її експлуатації.

Встановлена кореляція має місце між параметром перерізу композитного кріплення і відношенням  $H/R$ , що дозволило сформулювати один із основних наукових висновків наступним чином: навантаження на композитне кріплення підготовчої виробки, знаходиться в прямо пропорційній степеневій залежності від параметра  $H/R$  і обернено пропорційно перерізу композитного кріплення. Це забезпечує вибір параметрів системи композитного кріплення зі зниженою в 5 разів матеріаломісткістю без погіршення стійкості виробки.

В результаті можна відзначити, що найбільш підходящим перерізом кріплення буде композитне з перерізом 390 мм, бо при використанні цього кріплення області  $\sigma_{\max}$  мають найменші значення.

#### ВДЯЧНІСТЬ

Дослідження виконані в рамках науково-дослідної роботи ГП-514 «Розробка геомеханічних моделей гірського масиву та інноваційних технологій комплексного видобутку мінеральних ресурсів вугільних шахт» (№ держреєстрації: 0123U101808).

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sokołowski, J., Frankowski, J., Mazurkiewicz, J., & Lewandowski, P. (2022). Hard coal phase-out and the labour market transition pathways: The case of Poland.



*Environmental Innovation and Societal Transitions*, 43, 80-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.03.003>

2. Kalantari, H., Sasmito, A.P., & Ghoreishi-Madiseh, S.A. (2021). An overview of directions for decarbonization of energy systems in cold climate remote mines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111711. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111711>

3. Zhao, L., Wang, K., Yi, H., Cheng, Y., Zhen, J., & Hu, H. (2024). Carbon emission drivers of China's power sector and its transformation for global decarbonization contribution. *Applied Energy*, 376, 124258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124258>

4. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Zubko, S., Sai, K., & Saik, P. (2021). Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*, 13(2), 834. <https://doi.org/10.3390/su13020834>

5. Kovalevska, I., Symanovych, H., Jarosz, J., Barabash, M., & Husiev, O. (2020). Geomechanics of overworked mine working support resistance in the laminal massif of soft rocks. In *E3S Web of Conferences (Vol. 201, p. 01003)*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101003>

6. Iordanov, I., Buleha, I., Bachurina, Y., Boichenko, H., Kayun, O., Kohtieva, O., Dovgal, V. (2021). Experimental research on the haulage drifts stability in steeply dipping seams. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 56-67. <https://doi.org/10.33271/MINING15.04.056>

7. Fomychov, V., Mamaikin, O., Demchenko, Y., Prykhorchuk, O., & Jarosz, J. (2018). Analysis of the efficiency of geomechanical model of mine working based on computational and field studies. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 46-55. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.046>

8. Bondarenko V, Kovalevska I, Husiev O, Snihur V and Salieiev I 2019 Concept of workings reuse with application of resource-saving bolting systems. *E3S Web of Conferences vol 133*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf%20/201913302001>

9. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, G., Sotskov, V., & Barabash, M. (2018). Geomechanics of interference between the operation modes of mine working support elements at their loading. *Mining Science*, (25), 219-235. <https://doi.org/10.5277/msc182515>

10. Kovalevska, I., Barabash, M., & Snihur, V. (2018). Development of a research methodology and analysis of the stress state of a parting under the joint and downward mining of coal seams. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 76-84. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.076>

11. Krukovskiy, O., Bulich, Y., Kurnosov, S., Yanzhula, O., & Demin, V. (2022). Substantiating the parameters for selecting a pillar width to protect permanent mine workings at great depths. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1) <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012049>

12. Krykovskiy, O., Krykovska, V., & Skipochka, S. (2021). Interaction of rock-bolt supports while weak rock reinforcing by means of injection rock bolts. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 8-14. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.008>

13. Kyrychenko, V., & Vivcharenko, O. (2014). Creation conception of high-resource interlocks of frame supports of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 8(1), 79-89. <https://doi.org/10.15407/mining08.01.079>

14. Tereshchuk, R.M., Khoziaikina, N.V., & Babets, D.V. (2018). Substantiation of rational roof-bolting parameters. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (1), 19-26. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/18>

15. Khalymendyk, Y., & Baryshnikov, A. (2016). Substantiation of cable bolts parameters for supporting mine workings in conditions of laminated rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 9-15. <https://doi.org/10.15407/mining10.01.009>
16. Хорольський, А. О., Гріньов, В. Г., & Мамайкін, О. Р. (2019). Інноваційні перспективи підземної експлуатації вугільних родовищ. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, (1 (83)), 289-298. [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-289-298](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-289-298)
17. Шека, І.В., Салєєв, І.А., Шишов, М.В., Малова, О.К., Почепов, В.М., & Мамайкін, О.Р. (2023). Аналіз використання композитних матеріалів для подальшого застосування у кріпленнях гірничих виробок. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 72, 30-42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.062>
18. Шека, І.В., & Цівка, Є.С. (2021). Обґрунтування вуглепластику як інноваційного матеріалу для кріплення гірничих виробок вугільних шахт. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 64, 112-121. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.112>
19. Бондаренко, В., Салєєв, І., Шека, І., & Цівка, Є. (2020). Обґрунтування використання композитних матеріалів для підвищення стійкості гірничих виробок. *Ukrainian School of Mining Engineering 2020*, 25-26. <https://doi.org/10.33271/usme14.025>
20. Баришніков А.С. (2016). *Закономірності деформування системи «кріплення – масив» у слабких породах у зоні впливу очисних робіт*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.01 «Маркшейдерія» / – Дніпропетровськ, – 20 с.
21. Snihur, V., Bondarenko, V., Kovalevska, I., Husiev, O., & Shaikhislamova, I. (2022). Optimization solution substantiation for resource-saving maintenance of workings. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 9-18. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.009>
22. Tereschuk, R., Grigoriev, O., Tokar, L., & Tikhonenko, V. (2014). Control of stability of mine workings equipped with roof bolting. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 411-415.
23. Khorolskyi, A., Mamaikin, O., Medianyuk, V., Lapko, V., & Sushko, V. (2021). Development and implementation of technical and economic model of the potential of operation schedules of coal mines. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(18), 1890-1899
24. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Demchenko, Yu. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 53-62. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
25. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463-471.
26. Matayev, A., Abdiev, A., Kydrashov, A., Musin, A., Khvatina, N., & Kaumetova, D. (2021). Research into technology of fastening the mine workings in the conditions of unstable masses. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 78-86. <https://doi.org/10.33271/mining15.03.078>
27. Abdiev, A., Mambetova, R., Abdiev, A., & Abdiev, S. (2020). Development of methods for assessing the mine workings stability. *E3S Web of Conference*, (201), 01040. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101040>
28. Felonenko, S., Symanovych, G., & Gubkina, V. (2015). Application of temporary stall timbering works roadway in the process of roadway development while using continuous mining method. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 81-83.

29. Shahsenko, O. M., Khoziaikina, N. V., & Tereshchuk, R. M. (2017). Distribution of displacements around a single mine working driven in stratified rock mass. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 40-46.
30. Symanovych, G., Astafiev, D., Vivcharenko, O., & Snigur, V. (2015). Increasing of yielding of frame-anchor support steadiness. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 45-48. <https://doi.org/10.1201/b19901-9>
31. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Sheka, I., & Sachko, R. (2023). Results of research on the stability of mine workings, fixed by arched supports made of composite materials, in the conditions of the Pokrovske mine administration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1) <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012011>
32. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Podkopaiev, S.V., Sheka, I.V., & Tsivka, Y.S. (2022). Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (1049), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>
33. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., Цівка, Є.С., & Шека, І.В. (2022). Обґрунтування ефективності використання кріплення з вуглепластику для гірничих виробок на шахтах Західного Донбасу. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 68, 30–42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.030>
34. Kovalevska, I.A., Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., Sheka, I.V., & Tsivka, Ye.S. (2022). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. *15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1538-1543
35. Бондаренко, В., & Шека, І. (2023). Дослідження впливу різних гірничо-геологічних умов на дренажний штрек, що закріплений композитним кріпленням. *Ukrainian School of Mining Engineering 2023*, 59-60. <https://doi.org/10.33271/usme16.059>
36. Шека, І. В. (2023). Результати дослідження впливу надпрацювання на гірничі виробки, що закріплені композитним кріпленням. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 2023, (25), 67-79. <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.006>
37. Шека, І., Рухлова, Н., & Пойманов, С. (2024). Визначення раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів в умовах ШУ «Покровське». *Ukrainian School of Mining Engineering 2024*, 71-72. <https://doi.org/10.33271/usme17.071>
38. Фомичов, В.В. (2012). Передумови побудови розрахункових моделей рамно-анкерного кріплення з урахуванням нелінійних характеристик поведінки фізичних середовищ. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (4), 54-59.
39. Загорюлько, А.В. *Програмний комплекс ANSYS в інженерних задачах: Навчальний посібник*. Суми: Видавництво СумДУ, 2008. 201 с.
40. Крючков, А.І., & Бахтин, А.І. (2018). Закономірність зміни модулю зсуву в залежності від температури та пористості гірських порід. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, (1), 18-28.
41. Long, T., Hou, E., Xie, X., Fan, Z., & Tan, E. (2022). Study on the damage characteristics of overburden of mining roof in deeply buried coal seam. *Scientific Reports*, 12(1), 11141. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15220-8>
42. Fomychov, V., Fomychova, L., Khorolskyi, A., Mamaikin, O., & Pochepov, V. (2020). Determining optimal border parameters to design a reused mine working. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(24), 3039-3049.

43. Nurpeissova, M., Rysbekov, K., Kenesbayeva, A., Bekbassarov, Z., & Levin, E. (2021). Simulation of geodynamic processes. *Engineering Journal of Satbayev University*, 143(4), 16-24. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i4.03>
44. Kovalevska, I., Samusia, V., Kolosov, D., Snihur, V., & Pysmenkova, T. (2020). Stability of the overworked slightly metamorphosed massif around mine working. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 43-52. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.043>
45. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Biletskyi, V.S., & Desna, N.A. (2022). Optimization principles implementation in the innovative technologies for re-used extraction workings maintenance. *Petroleum and Coal*, 64(2), 424-435. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104182>

## REFERENCES

1. Sokołowski, J., Frankowski, J., Mazurkiewicz, J., & Lewandowski, P. (2022). Hard coal phase-out and the labour market transition pathways: The case of Poland. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 43, 80-98. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.03.003>
2. Kalantari, H., Sasmitho, A. P., & Ghoreishi-Madiseh, S. A. (2021). An overview of directions for decarbonization of energy systems in cold climate remote mines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111711. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111711>
3. Zhao, L., Wang, K., Yi, H., Cheng, Y., Zhen, J., & Hu, H. (2024). Carbon emission drivers of China's power sector and its transformation for global decarbonization contribution. *Applied Energy*, 376, 124258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124258>
4. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Lozynskiy, V., Zubko, S., Sai, K., & Saik, P. (2021). Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*, 13(2), 834. <https://doi.org/10.3390/su13020834>
5. Kovalevska, I., Symanovych, H., Jarosz, J., Barabash, M., & Husiev, O. (2020). Geomechanics of overworked mine working support resistance in the laminal massif of soft rocks. In *E3S Web of Conferences (Vol. 201, p. 01003)*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101003>
6. Iordanov, I., Buleha, I., Bachurina, Y., Boichenko, H., Kayun, O., Kohtieva, O., Dovgal, V. (2021). Experimental research on the haulage drifts stability in steeply dipping seams. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 56-67. <https://doi.org/10.33271/MINING15.04.056>
7. Fomychov, V., Mamaikin, O., Demchenko, Y., Prykhorchuk, O., & Jarosz, J. (2018). Analysis of the efficiency of geomechanical model of mine working based on computational and field studies. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 46-55. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.046>
8. Bondarenko V, Kovalevska I, Husiev O, Snihur V and Salieiev I 2019 Concept of workings reuse with application of resource-saving bolting systems. *E3S Web of Conferences vol 133*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf%20/201913302001>
9. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, G., Sotskov, V., & Barabash, M. (2018). Geomechanics of interference between the operation modes of mine working support elements at their loading. *Mining Science*, (25), 219-235. <https://doi.org/10.5277/msc182515>
10. Kovalevska, I., Barabash, M., & Snihur, V. (2018). Development of a research methodology and analysis of the stress state of a parting under the joint and downward mining of coal seams. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 76-84. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.076>

11. Krukovskiy, O., Bulich, Y., Kurnosov, S., Yanzhula, O., & Demin, V. (2022). Substantiating the parameters for selecting a pillar width to protect permanent mine workings at great depths. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1) <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012049>
12. Krykovskiy, O., Krykovska, V., & Skipochka, S. (2021). Interaction of rock-bolt supports while weak rock reinforcing by means of injection rock bolts. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 8-14. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.008>
13. Kyrychenko, V., & Vivcharenko, O. (2014). Creation conception of high-resource interlocks of frame supports of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 8(1), 79-89. <https://doi.org/10.15407/mining08.01.079>
14. Tereshchuk, R.M., Khoziaikina, N.V., & Babets, D.V. (2018). Substantiation of rational roof-bolting parameters. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (1), 19-26. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/18>
15. Khalymendyk, Y., & Baryshnikov, A. (2016). Substantiation of cable bolts parameters for supporting mine workings in conditions of laminated rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 9-15. <https://doi.org/10.15407/mining10.01.009>
16. Khorolskiy, A.O., Hrinov, V.H., & Mamaikin, O.R. (2019). Innovative solutions of the underground exploitation of coal deposits. *The Journal of Zhytomyr State Technological University. Series: Engineering*, 1(83), 289-298. [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-289-298](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-289-298)
17. Sheka, I., Salieiev, I., Shyshov, M., Malova, O., Pochevov, V., & Mamaikin, O. (2023). Analysis of the use of composite materials for further application in the support of mine workings. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 72, 62-76. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.062>
18. Sheka, I., & Tsivka, Ye. (2021). Substantiation of carbon fiber as an innovative materials for fastening of mining workings of coal mines. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 64, 112–121. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.112>
19. Bondarenko, V., Salieiev, I., Sheka, I., & Tsivka, Ye. (2020). Obgruntuvannia vykorystannia kompozytnykh materialiv dlia pidvyshchennia stiikosti hirnychykh vyrobok. *Ukrainian School of Mining Engineering 2020*, 25-26. <https://doi.org/10.33271/usme14.025>
20. Baryshnikov A.S. (2016). *Objective laws of a system «support - rock mass» deformation in soft rocks in area of longwall influence»* – Manuscript.: specialty 05.15.01 «Surveying» / – Dnipropetrovsk, – 20 s.
21. Snihur, V., Bondarenko, V., Kovalevska, I., Husiev, O., & Shaikhlislamova, I. (2022). Optimization solution substantiation for resource-saving maintenance of workings. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 9-18. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.009>
22. Tereschuk, R., Grigoriev, O., Tokar, L., & Tikhonenko, V. (2014). Control of stability of mine workings equipped with roof bolting. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 411-415.
23. Khorolskiy, A., Mamaikin, O., Medianyuk, V., Lapko, V., & Sushko, V. (2021). Development and implementation of technical and economic model of the potential of operation schedules of coal mines. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(18), 1890-1899
24. Khorolskiy, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Demchenko, Yu. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 53-62. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>

25. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463-471.
26. Matayev, A., Abdiev, A., Kydrashov, A., Musin, A., Khvatina, N., & Kaumetova, D. (2021). Research into technology of fastening the mine workings in the conditions of unstable masses. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 78-86. <https://doi.org/10.33271/mining15.03.078>
27. Abdiev, A., Mambetova, R., Abdiev, A., & Abdiev, S. (2020). Development of methods for assessing the mine workings stability. *E3S Web of Conference*, (201), 01040. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101040>
28. Felonenko, S., Symanovych, G., & Gubkina, V. (2015). Application of temporary stall timbering works roadway in the process of roadway development while using continuous mining method. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 81-83.
29. Shahsenko, O. M., Khoziaikina, N. V., & Tereshchuk, R. M. (2017). Distribution of displacements around a single mine working driven in stratified rock mass. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 40-46.
30. Symanovych, G., Astafiev, D., Vivcharenko, O., & Snigur, V. (2015). Increasing of yielding of frame-anchor support steadiness. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 45-48. <https://doi.org/10.1201/b19901-9>
31. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Sheka, I., & Sachko, R. (2023). Results of research on the stability of mine workings, fixed by arched supports made of composite materials, in the conditions of the Pokrovske mine administration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1) <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012011>
32. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Podkopaiev, S.V., Sheka, I.V., & Tsivka, Y.S. (2022). Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (1049), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>
33. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Tsivka, Ye., & Sheka, I. (2022). Substantiation of efficiency of use of carbon-fiber reinforced plastic fasteners for mining products in Western Donbass mines. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 68, 30-42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.030>
34. Kovalevska, I.A., Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., Sheka, I.V., & Tsivka, Ye.S. (2022). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. *15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1538-1543
35. Bondarenko, V., & Sheka, I. (2023). Doslidzhennia vplyvu riznykh hirnychoheolohichnykh umov na drenazhnyi shtrek, shcho zakriplenyi kompozytnym kriplenniam. *Ukrainian School of Mining Engineering 2023*, 59-60. <https://doi.org/10.33271/usme16.059>
36. Sheka, I. (2023). Results of the research of the influence of overworking on mining workings fixed by arched supports made of composite materials. *Physical and technical problems of mining production*, 2023, (25), 67-79. <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.006>
37. Sheka, I., Rukhlova, N., & Poimanov, S. (2024). Vyznachennia ratsionalnykh parametriv kriplennia iz kompozytnykh materialiv v umovakh ShU «Pokrovske».

38. Fomychov, V. (2012). Peredumovy pobudovy rozrakhunkovykh modelei ramno-ankernoho kriplennia z urakhuvanniam nelineinykh kharakterystyk povedinky fizychnykh seredovysch. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, (4), 54-59.

39. Zahorulko, A. *Prohramnyi kompleks ANSYS v inzhenernykh zadachakh: Navchalnyi posibnyk*. Sumy: Vydavnytstvo SumDU, 2008. 201 s.

40. Kriuchkov, A. I., & Bakhtyn, A. I. (2018). Zakonomirnist zminy moduliu zsuvu v zalezhnos-ti vid temperatury ta pustotnosti hirskykh porid. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, (1), 18-28.

41. Long, T., Hou, E., Xie, X., Fan, Z., & Tan, E. (2022). Study on the damage characteristics of overburden of mining roof in deeply buried coal seam. *Scientific Reports*, 12(1), 11141. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15220-8>

42. Fomychov, V., Fomychova, L., Khorolskyi, A., Mamaikin, O., & Pochevov, V. (2020). Determining optimal border parameters to design a reused mine working. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(24), 3039-3049.

43. Nurpeissova, M., Rysbekov, K., Kenesbayeva, A., Bekbassarov, Z., & Levin, E. (2021). Simulation of geodynamic processes. *Engineering Journal of Satbayev University*, 143(4), 16-24. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i4.03>

44. Kovalevska, I., Samusia, V., Kolosov, D., Snihur, V., & Pysmenkova, T. (2020). Stability of the overworked slightly metamorphosed massif around mine working. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 43-52. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.043>

45. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Biletskyi, V.S., & Desna, N.A. (2022). Optimization principles implementation in the innovative technologies for re-used extraction workings maintenance. *Petroleum and Coal*, 64(2), 424-435. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104182>

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Визначення раціонального перерізу композитного кріплення в умовах ШУ «Покровське».

**Методика.** Задля досягнення поставленої мети роботи проведено обчислювальний експеримент на основі тривимірного моделювання геомеханічної системи підготовчої виробки із шаруватим ізотропним гірським масивом за різної глибини проведення виробки, методом скінченних елементів з використанням нелінійних закономірностей зміни напружено-деформованого стану досліджуваного об'єкта у програмному продукті Ansys Mechanical.

**Результати.** Встановлено, що напруження в базовому варіанті металевого кріплення досягають максимальних величин (понад 270 МПа) у стояках від підосви на висоту 0,8 – 1,1 м, симетрично з обох сторін; на верхняк також впливають максимальні напруження від центру виробки в обидва боки на 1,4 – 1,5 м, що знаходиться на межі деформації і руйнування кріплення. А кріплення із композитного матеріалу D39 в тих же умовах не досягає максимальних напружень за винятком невеликої зони розміром 0,2 – 0,3 м у стояках та 0,3 – 0,4 м у верхняку, що не призводить до руйнування кріплення та зміни поперечного перерізу виробки. За сукупністю результатів проведеного аналізу стану гірського масиву на великих глибинах розробки та композитного кріплення побудовано сім'ю графіків, що відображають закономірності впливу геомеханічних факторів на переріз композитного кріплення. Переріз

композитного кріплення змінюється за степеневою залежністю від співвідношення глибини проведення виробки  $H$  та середнього розрахункового опору на стискання  $R$  гірських порід. Це дозволяє прогнозувати стійкий стан виробки протягом усього терміну її експлуатації. Встановлена кореляція має місце між параметром перерізу композитного кріплення і відношенням  $H/R$ , що дозволило сформулювати один із основних наукових висновків наступним чином: навантаження на композитне кріплення підготовчої виробки, знаходиться в прямо пропорційній степеневій залежності від параметра  $H/R$  і обернено пропорційно перерізу композитного кріплення. Це забезпечує вибір параметрів системи композитного кріплення зі зниженою в 5 разів матеріаломісткістю без погіршення стійкості виробки. Найбільш підходящим перерізом кріплення буде композитне з перерізом 390 мм, бо при використанні цього кріплення області  $\sigma_{\max}$  мають найменші значення.

**Наукова новизна.** Вперше розроблена максимально деталізована геометрія моделі гірського масиву та композитного кріплення за різної глибини проведення виробки в умовах ШУ «Покровське». Встановлено, що при використанні композитного кріплення з перерізом 390 мм області  $\sigma_{\max}$  мають найменші значення.

**Практична значимість.** Отримані результати доводять, що в умовах ШУ «Покровське» за різної глибини проведення виробки раціональніше використовувати композитне кріплення перерізом 390 мм, що разом з полегшенням конструкції та пришвидшенням роботи зміни буде сприяти розвитку підземного вуглевидобутку.

**Ключові слова:** гірничі виробки, композитне кріплення, максимальні напруження, моделювання, напружено-деформований стан, раціональний переріз.

### ABOUT AUTHOR

Sheka Ivan, Doctor of Philosophy, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: vsheka1996@gmail.com

Poimanov Serhii, Dnipro University of Technology, Assistant Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: poimanov.s.m@nmu.one

Demchenko Yurii, Candidate of Technical Science, Associated Professor, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: demchenko.yu.i@nmu.one

Rukhlova Nataliia, Candidate of Technical Science, Associated Professor, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Electrical Power Engineering Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: rukhlova.n.yu@nmu.one

Malova Olha, Dnipro University of Technology, Researcher of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: olga.malova.umd@gmail.com