

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Цівка Євгеній Сергійович

УДК 622.28.042.44

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КРІПЛЕННЯ ІЗ КОМПОЗИТНИХ
МАТЕРІАЛІВ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК ЗІ
СЛАБОМЕТАМОРФІЗОВАНИМИ ПОРОДАМИ ШАХТ ЗАХІДНОГО
ДОНБАСУ**

184 – «Гірництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Є.С. Цівка

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Ковалевська Ірина Анатоліївна

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Цівека Є.С. Обґрунтування взаємодії кріплення із композитних матеріалів підготовчих виробок зі слабометаморфізованими породами шахт Західного Донбасу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 – «Гірництво», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2024.

Дисертацію присвячено підвищенню стійкості шаруватого масиву навколо підготовчої виробки у слабометаморфізованих породах Західного Донбасу із застосуванням арочного вуглепластичного кріплення.

Стабільність функціонування вугільної шахти залежить від стійкості гірничих виробок, серед яких типові металеві арочні кріплення перебувають у неналежному стані експлуатації. Аналіз вугільної промисловості України показує, що кріплення гірничих виробок потребують комплексної модернізації шляхом застосування нових видів матеріалів, які будуть міцні, гнучкі та легкі. Враховуючи такі обставини, проблема стійкості гірничих виробок є актуальною та потребує нових інноваційних рішень.

У фундаментальних дослідженнях представників зарубіжних та вітчизняних наукових шкіл встановлено, що для ефективної роботи очисних вибоїв необхідно зменшувати металоємність кріплень, так як нові матеріали будуть простішими у монтажі та безпечнішими для них. У зв'язку з цим до основних завдань дисертаційного дослідження віднесено: розкриття механізму взаємодії арочного вуглепластичного кріплення з шаруватим масивом та встановлення закономірності розподілу інтенсивності напружень для встановлення раціональних параметрів кріплення.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів нерівномірного розподілу тиску навколо виробки дають змогу прогнозувати небезпечні зони при веденні очисних робіт. За результатами досліджень встановлено, що арочні металеві кріплення потребують вдосконалення шляхом застосування нових видів кріплень.

У роботі проведений аналіз основних видів композитних матеріалів з урахуванням їх фізико-механічних властивостей, який показав, що для конструкції кріплення при веденні очисних робіт у складних умовах видобутку кращим є вуглепластик.

За допомогою програмного продукту SolidWorks, у роботі проаналізований характер розподілу тиску навколо підготовчої виробки та сформовані результати дослідження напружено-деформованого стану шаруватого масиву у взаємодії з вуглепластичними кріпленнями різних форм перетину в умовах Західного Донбасу в слабометаморфізованих породах. Також, був проведений аналіз математичного та лабораторного дослідження для визначення зон нерівномірного напруження навколо виробки та зміцнення шаруватого масиву шляхом застосування арочного вуглепластичного кріплення.

Шляхом моделювання взаємодії шаруватого масиву та арочних вуглепластичних кріплень були обґрунтовані нові способи зниження нерівномірного тиску навколо гірничої виробки у досліджуваних умовах.

Важливою складовою достовірностей отриманих результатів є проведення лабораторних досліджень. Задача полягала у підтвердженні коректності математичного моделювання для вибору раціональних параметрів кріплення для еквівалентної моделі з пластиків.

Лабораторний метод дослідження геомеханічних процесів дав можливість повністю відобразити процес зміщень масиву та зробити виміри, які складно отримати за допомогою аналітичних методів чи спостережень в шахтних умовах. Отримана математична та фізична моделі дозволили вивчати процеси з певним ступенем спрощення.

Результати проведених досліджень показали, що вуглепластики можуть бути використані для системи кріплень, при їх використанні зміщення контуру виробки зменшилось на 20 %.

На базі проведених експериментальних досліджень з'ясовано, що деформації у шарах порід при збільшенні навантаження проявляються з плином часу. При застосуванні нового типу кріплення зменшилась концентрація напружень σ від

0,4 до 2,0 навколо виробки у порівнянні з металевим арочним кріпленням профілю СВП 27. Розбіг між математичним та лабораторним дослідженням склав 15 %.

Застосування арочного вуглепластичного кріплення при веденні очисних робіт в умовах шахт Західного Донбасу дозволяє отримати економічний ефект у 650 тисяч гривень для підготовчої виробки довжиною 600 метрів.

Ключові слова: гірнича виробка, стійкість виробок, нерівномірний розподіл тиску, підготовча виробка, вуглепластик, арочне кріплення, напружено-деформований стан.

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації
Статті в наукових фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

1. Шека, І.В & Цівка, Є.С (2021) Обґрунтування вуглепластику як інноваційного матеріалу для кріплення гірничих виробок вугільних шахт. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. – Вип. 64. – С. 112-121. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.112>

Здобувач дослідив та обґрунтував можливе використання вуглепластиків у системі кріплень, де цього потребує їх технічний стан.

2. 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 Національного гірничого університету*. –Вип. 68. – С. 30-42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.030>

Здобувач за допомогою методу математичного моделювання обґрунтував використання арочного вуглепластичного кріплення у шаруватому масиві підготовчих виробок Західного Донбасу.

3. Tsivka, Y. (2024). Determination of the type of arched carbon-fibre support for the preparatory workings for the conditions of the Dneprovskaya mine in slightly metamorphosed rocks. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (1 (77)). <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.306879>

Здобувач за допомогою експериментальних досліджень на еквівалентній моделі на пресі отримав розподіл інтенсивності напружень та обрав необхідний вид кріплення в досліджуваних умовах.

Статті в періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу, з відповідною до наукового напрямку, за яким підготовлено дисертацію здобувача

4. Bondarenko, V.I, Kovalevska, I.A, Podkopaiev, S.V, Sheka, I.V & Tsivka, Ye.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 (2022) 012026. <https://doi:10.1088/1755-1315/1049/1/012026>

Здобувач проаналізував зміни нерівномірного розподілу тиску навколо виробки та у арочному вуглепластичному кріпленні та запропонував рекомендовані параметри конструкції кріплення.

5. Kovalevska, I.A, Bondarenko, V.I, Symanovych, H. A, Sheka, I.V & Tsivka, Ye.S. (2023). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. *15th ISRM Congress*, Salzburg, Austria, October 2023. <https://onepetro.org/isrmcongress/proceedings-abstract/CONGRESS23/All-CONGRESS23/540051>

Здобувач порівняв результати лабораторного та математичного моделювання шляхом дослідження еквівалентної моделі з пластику на пресі.

Патенти:

6. Патент №148329 на корисну модель, Україна, МПК E21D 11/14. Арочне піддатливе кріплення. (2021). Бондаренко, В.І., Шека, І.В., Цівка, Є.С., Ковалевська, І.А.; заявник і власник патенту НТУ «ДП». – № u202008107; заяв. 18.12.2020; опубл. 29.07.2021; Бюл. №30.

7. Патент №148395 на корисну модель, Україна, МПК E21D 11/14. Арочне кріплення. (2021). Цівка Є.С., Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А.; Шека І.В.; заявник і власник патенту НТУ «ДП». – № u202008272; заяв. 23.12.2020; опубл. 4.08.2021; Бюл. №31.

8. Патент №151958 на корисну модель, Україна, МПК E21D 11/14. Кільцеве піддатливе кріплення. (2022). Бондаренко, В.І., Шека, І.В., Цівка, Є.С., Ковалевська, І.А., Мамайкін О.Р.; заявник і власник патенту НТУ «ДП». – № u202201449; заяв. 5.05.2022; опубл. 6.10.2022; Бюл. №40.

Матеріали наукових конференцій:

9. Бондаренко В.І., Салєєв І., Шека І.В., Цівка Є.С (2020). *Обґрунтування використання композитних матеріалів для підвищення стійкості гірничих виробок.* Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.: тези доп. (с. 25-26). Бердянськ, Україна. http://msu.org.ua/teza10_msu2020.html

10. Бондаренко В.І., Шека І.В., Цівка Є.С (2021) *Розробка інноваційного виду кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт.* Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.: тези доп. (с. 59-62). Бердянськ, Україна. http://msu.org.ua/teza24_msu2021.html

11. Ковалевська І.А., Цівка Є.С., Шека І.В. (2021) *Розробка кріплення із композитних матеріалів для зміцнення масиву гірських порід у зонах підвищеного гірського тиску.* Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.: тези доп. (с. 67-68). Бердянськ, Україна.

http://msu.org.ua/teza27_msu2021.html

12. Цівка Є.С. (2021) *Модернізація гірничої промисловості України шляхом використання вуглепластику для кріплення підземних гірничих виробок.* Міжнародна науково-практична конференція «Наукові досягнення та відкриття сучасної молоді», ДонНТУ: тези доп. (с. 214-216). Покровськ, Україна.

https://donntu.edu.ua/wpcontent/uploads/2021/06/Tezy_young_science_DonNTU.pdf

13. E. Tsivka. (2021) *Possibility of strengthening of arched fastening of mining through the use of carbon fiber.* The 16th International Forum for Students and Young Researchers «Widening our horizons (P.244-246).

<https://im.nmu.org.ua/ua/forum/forum.php>

14. Цівка Є.С. (2022) *Вирішення проблеми нерівномірного розподілу тиску навколо виробки у складних гірничо-геологічних умовах*. Науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», НТУ «Дніпровська політехніка: тези доп. (с. 86-88). <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna.php>

15. Tsivka Ye.S. (2023) *Experimental studies on the possible use of carbon fibre-reinforced plastics for support structures*. PHYSICAL AND CHEMICAL GEOTECHNOLOGIES, Dnipro University of Technology (P. 20 - 27). <https://doi.org/10.15407/pcgt.23.03>

ABSTRACT

Tsivka, Ye. S. Substantiation of the interaction of support made of composite materials of preparatory workings with weakly metamorphosed rocks of mines in the Western Donbass. – Qualifying scientific work as manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 184 – «Mining», Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2024.

The dissertation is devoted to increasing the stability of the layered massif around the preparatory workings in the weakly metamorphosed rocks of the Western Donbas using arched carbon-fibre support.

The stability of a coal mine depends on the stability of mine workings, among which typical metal arch supports are in an inadequate state of operation. An analysis of the Ukrainian coal industry shows that the roof supports require a comprehensive modernisation by using new types of materials that are strong, flexible and lightweight. Given these circumstances, the problem of mine stability is urgent and requires new innovative solutions.

In fundamental studies by representatives of foreign and domestic scientific schools, it was established that for the efficient operation of the working faces, it is necessary to reduce the metal consumption of the supports, since new materials will be easier to install and safer for them. In this regard, the main objectives of the dissertation study include: disclosure of the mechanism of interaction between the arched carbon fibre support and the layered massif and establishment of the regularity of stress intensity distribution to establish rational support parameters.

The results of theoretical and experimental studies of the processes of uneven pressure distribution around the workings make it possible to predict hazardous areas during the cleaning operations. The research has shown that arched metal supports need to be improved by using new types of supports.

The paper analyses the main types of composite materials with regard to their physical and mechanical properties, which shows that carbon fibre is the most suitable

material for the construction of a support during cleaning operations in difficult mining conditions.

Using the SolidWorks software, the paper analyses the nature of pressure distribution around the preparatory workings and presents the results of the study of the stress-strain state of a layered massif in interaction with carbon fibre supports of various cross-sectional shapes in the Western Donbas in weakly metamorphosed rocks. In addition, the mathematical and laboratory studies were analysed to determine the zones of uneven stress around the working face and to strengthen the layered massif by using arched carbon-fibre support.

By modelling the interaction of a layered massif and arched carbon fibre supports, new ways to reduce uneven pressure around the mine workings under the studied conditions were substantiated.

Laboratory tests are an important component of the reliability of the results obtained. The task was to confirm the correctness of mathematical modelling to select rational support parameters for an equivalent plastic model.

The laboratory method of studying geomechanical processes made it possible to fully reflect the process of massive displacements and make measurements that are difficult to obtain using analytical methods or observations in mine conditions. The resulting mathematical and physical models made it possible to study the processes with a certain degree of simplification.

The results of the study showed that carbon fibre-reinforced plastics can be used for the support system, and the displacement of the mine contour was reduced by 20 %.

Based on the experimental studies, it was found that deformations in the rock layers with increasing load occur over time. The use of the new type of support reduced the stress concentration from 0.4 to 2.0 around the working face compared to the metal arch support of SVP 27 profile. The discrepancy between the mathematical and laboratory studies was 15%.

The use of arched carbon-fibre support during the cleaning operations in the mines of Western Donbass allows to obtain an economic effect of of 650 thousand hryvnias for a 600-metre long preparatory face.

Keywords: mine workings, stability of workings, uneven pressure distribution, preparatory workings, carbon fiber, arch support, stress-strain state.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИДІВ СИСТЕМ КРІПЛЕНЬ ТА МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВУГЛЕВИДОБУВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	20
1.1 Сучасний стан та проблеми гірничодобувної промисловості. Досвід використання композитних матеріалів	20
1.2 Систематизація та основні властивості композитних матеріалів.....	25
1.3 Можливість використання композитних матеріалів у гірничо- добувній промисловості.....	26
1.4. Постановка мети і завдань досліджень.....	32
Висновки до розділу 1.....	34
Список літератури до розділу 1.....	35
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КРІПЛЕННЯ ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ В СЛАБОМЕТАМОРФІЗОВАНИХ ПОРОДАХ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ.....	44
2.1 Загальна характеристика математичного моделювання геомеханічних систем.....	44
2.2 Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) при вирішенні задач геомеханіки.....	46
2.3 Обґрунтування та вибір програмного комплексу на базі методу скінченних елементів.....	49
2.4 Інтенсивність напружень шаруватих порід слабометаморфізованих порід з використанням аروحного металевого кріплення профілю СВП 27 для умов шахт Західного Донбасу.....	53
Висновки за розділом 2.....	56
Список літератури до розділу 2.....	57

3 АНАЛІЗ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ ЗАЛЕЖНОСТІ ЗМІНИ ТИПУ КРІПЛЕННЯ ВІД ЗБІЛЬШЕННЯ ТИСКУ В УМОВАХ ШАХТ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ.....	63
3.1 Аналіз характеристик гірничо-геологічних умов Західного Донбасу...	63
3.2 Дослідження та аналіз НДС системи кріплення із вуглепластику в умовах шахти імені Героїв Космосу.....	68
3.3 Дослідження та аналіз НДС системи кріплення із вуглепластику в умовах шахти «Дніпровська».....	81
3.4 Дослідження та аналіз НДС системи кріплення із вуглепластику в умовах шахти «Західно-Донбаська».....	93
3.5 Вибір типів та раціональних параметрів арок вуглепластичних кріплень.....	103
Висновки за розділом 3.....	113
Список літератури до розділу 3.....	114
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЗМІНИ ДЕФОРМАЦІЇ МАСИВУ ТА КРІПЛЕННЯ У ЕКВІВАЛЕНТНІЙ МОДЕЛІ.....	118
4.1 Основні принципи фізичного моделювання. Переваги та недоліки.....	118
4.2 Методика фізичного моделювання на еквівалентних матеріалах.....	120
4.3 Основні принципи технології 3D-друку.....	123
4.4. Експериментальні дослідження шаруватого гірського масиву за допомогою еквівалентних матеріалів на пресі.....	126
4.5 Вибір робочого матеріалу та постановка задачі розрахунків.....	130
Висновки за розділом 4.....	140
Список літератури до розділу 4.....	141
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	143
ДОДАТКИ.....	145
ДОДАТОК А.....	146
ДОДАТОК Б.....	150

ДОДАТОК В.....	156
ДОДАТОК Г.....	160
ДОДАТОК Д.....	171

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема забезпечення стійкості підготовчих виробок на вугільних шахтах Західного Донбасу є однією з найактуальніших, так як від їх експлуатаційного стану залежить ефективність та безпечність проведення гірничих робіт. Видобуток вугілля ускладнюється у зв'язку зі швидким збільшенням глибини ведення гірничих робіт та погіршенням гірничо-геологічних умов.

Стійкість підготовчих виробок залежить, в основному, від способів їх проведення, охорони та розташування щодо меж очисних робіт, а також від типу, конструкції та працездатності встановлених у них кріплень. Зменшити інтенсивність нерівномірного розподілу тиску навколо підготовчої виробки за таких чинників, як застосування ресурсозберігаючих систем кріплень та повторне використання виробки, завдяки використанню вуглепластиків.

Належна стійкість виробок значно залежить від властивостей використовуваних матеріалів. Арочне вуглепластичне кріплення здатне сприймати на себе навантаження від ваги порід підробленої покрівлі та допомагає зменшити інтенсивність напружень навколо контуру виробки завдяки фізико-механічним властивостям вуглецевого волокна.

У вугільній промисловості залишається актуальною проблема низької стійкості у шаруватому масиві слабометафорфізованих порід навколо підготовчої виробки при збереженні максимальної несучої здатності на базі встановлених закономірностей регулювання деформаційно-силових параметрів її елементів.

Метою дослідження полягає у підвищенні стійкості шаруватого масиву навколо підготовчої виробки шляхом застосування арочного вуглепластичного кріплення в слабометаморфізованих породах Західного Донбасу.

Для досягнення поставленої мети сформульовано й виконано завдання:

1. Виконати комбінований аналіз ринку композитних матеріалів та обґрунтувати їх можливе використання для елементів кріпильної системи підготовчої виробки для складних гірничо-геологічних умов.

2. Провести моделювання напружено-деформованого стану просторової моделі шаруватого масиву навколо підготовчої виробки для умов шахт Західного Донбасу із застосуванням арочних вуглепластичних кріплень різних перетинів у програмному продукті SolidWorks.

3. Обґрунтувати вибір типу та раціональних параметрів арочних вуглепластичних кріплень для підготовчої виробки шаруватого масиву слабометаморфізованих порід.

4. Встановити закономірності розподілу інтенсивності напружень шаруватого масиву слабометаморфізованих порід навколо контуру підготовчої виробки.

5. Провести лабораторні дослідження зміщень шаруватого масиву при використанні арочного вуглепластичного кріплення методом еквівалентних матеріалів на пресі керуючись законами теорії подібності. На основі результатів досліджень, розробити методику розрахунку економічної ефективності використання арочного вуглепластичного кріплення для умов шахт Західного Донбасу.

Ідея роботи полягає у використанні закономірностей взаємодії арочного вуглепластичного кріплення з шаруватим масивом слабометаморфізованих порід для підвищення стійкості виробок в умовах шахт Західного Донбасу.

Об'єкт досліджень – геомеханічні процеси у системі, що містять шаруватий масив навколо підготовчої виробки та арочне вуглепластичне кріплення різного перетину.

Предметом дослідження є вплив закономірностей зміни нерівномірного розподілу гірського тиску навколо підготовчої виробки із застосуванням арочного вуглепластичного кріплення в слабометаморфізованих породах Західного Донбасу.

Методи досліджень. Поставлена мета досягнута на основі комплексного підходу, що включає: аналіз сучасного стану гірничих виробок; аналіз фізико-механічних властивостей вуглепластику; аналіз сучасних експериментальних, аналітичних та чисельних методів досліджень взаємодії кріплення гірничих виробок із шаруватим масивом; комп'ютерне моделювання взаємодії елементів

системи «шаруватий масив-кріплення» із залученням методу скінченних елементів при дослідженні напружено-деформованого стану; метод фізичного моделювання на еквівалентних матеріалах та лабораторні дослідження взаємодії еквівалентного шаруватого масиву з вуглепластичним арочним кріпленням різного перетину за теорією подібності.

Наукова новизна одержаних результатів:

Уперше:

– змодельовано взаємодію підготовчої виробки з арочними вуглепластичними кріпленнями постійного та змінного перетину у програмному продукті SolidWorks, що дозволило виявити характер деформацій навколо підготовчої виробки для слабометаморфізованих порід.

– встановлені раціональні параметри вуглепластичного арочного кріплення різних форм перетину, що взаємодіє з шаруватим масивом, завдяки, чому вдалось знизити інтенсивність напружень з рівня $\sigma=0,4$ до рівня $\sigma=2,0$.

– встановлені закономірності деформацій контуру виробки при застосуванні кріплення із вуглепластику та його впливу на гірський масив з урахуванням структури.

– створена еквівалентна модель шаруватого масиву з вуглепластику та пластику типу PLA відповідно законам теорії подібності.

– створена методика розрахунку економічної ефективності використання арочних вуглепластичних кріплень для умов шахт Західного Донбасу.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей зміни розподілу тиску навколо підготовчої виробки з використанням вуглепластиків у системі кріплень в умовах слабометаморфізованих порід шахт Західного Донбасу.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів та висновків підтверджено попередніми дослідженнями з розбігом у 15% між результатами математичного та лабораторного експерименту щодо зміни залежності інтенсивності напружень при застосуванні арочних вуглепластичних кріплень з урахуванням теорії подібності та законів геомеханіки, що є достатнім при вирішенні завдань дисертаційної роботи. Також помічена збіжність між теоретичними

положеннями та результатами експериментів, що дало змогу отримати рекомендації для впровадження на гірничих підприємствах.

Практичне значення отриманих результатів відображені в розроблених автором патентах на корисну модель та винахід, а саме:

1. Встановлені раціональні параметри аrochenого вуглепластичного кріплення для постійного, змінного та круглого перетину для слабометаморфізованих порід шахт Західного Донбасу.

2. Визначені показники взаємодії елементів технологічної системи «вуглепластичне кріплення–гірнича виробка» зі збереженням технологічних параметрів, що підвищують продуктивність видобутку та є безпечними для шахтарів.

3. Визначені показники зміщень деформацій контуру виробки при взаємодії з кріпленням із вуглепластику за допомогою лабораторного дослідження шляхом випробовування моделі на пресі.

Впровадження результатів роботи. Запропонована «Методика моделювання параметрів взаємодії вуглепластичного кріплення та гірського масиву» використовується науковцями Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» під час проведення досліджень за тематиками: тема ГП-501 «Виявлення закономірностей фазових перетворень газогідратів і напружено-деформованого стану гірського масиву та розробка інноваційних геотехнологій» (№ д/р 0119U000249); тема ГП-504 «Наукові та практичні основи оптимізації розрахунку параметрів інноваційних технологій при видобутку корисних копалин підземним способом» (№ д/р 0120U102077); тема ГП-509 «Наукові та практичні рішення оптимізаційних завдань при впровадженні інноваційних технологій мінімізації ризиків при закритті вугільних шахт» (№ д/р 0122U001719) та тема ГП-514 «Розробка геомеханічних моделей гірського масиву та інноваційних технологій комплексного видобутку мінеральних ресурсів вугільних шахт» (№ д/р 0123U101808).

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовано мету, ідею та задачі досліджень, наукові положення, новизна, практичне значення роботи,

висновки та рекомендації щодо їх практичної реалізації, розроблена математична та експериментальна модель взаємодії технологічної системи «вуглепластичне кріплення – гірничча виробка» слабометаморфізованих порід шахт Західного Донбасу, встановлено закономірності навантаження та деформування підготовчих виробок із використанням пластику PLA та вуглецевого волокна для еквівалентної моделі. На базі аналізу експериментальних досліджень обґрунтовано раціональні параметри аروحного вуглепластичного кріплення. Автором опубліковані наукові статті та патенти, що підтверджують апробацію результатів дослідження. Текст дисертації викладено автором особисто.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 15 наукових праць: 3 статті у періодичних виданнях, включених до переліку фахових видань України, 2 статті у періодичних виданнях, що індексуються у базах даних Scopus і WoS, 7 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій, а також 3 патенти.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел 179 найменувань на 21 сторінках. Робота містить 124 сторінки основного тексту, 41 рисунок та 9 таблиць, загальний обсяг – 173 сторінки.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИДІВ СИСТЕМ КРІПЛЕНЬ ТА МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВУГЛЕВИДОБУВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1 Сучасний стан та проблеми гірничодобувної промисловості. Досвід використання композитних матеріалів

Історія видобутку вугілля в Україні триває понад століття. Це свідчить про те, що найбільш потужні родовища вугілля для великомасштабного промислового виробництва майже вичерпані. Однак сьогодні українська вугільна промисловість стикається з іншими проблемами, які призвели до загального скорочення видобутку вугілля та зростання витрат. Ці проблеми ще більше загострилися через бойові дії на Донбасі, які спричинили втрату багатьох шахт, які вже не можуть бути відновлені [1].



Рисунок 1.1 – Аналіз стратегії розвитку вугільної промисловості України до 2030 року

Вугільна промисловість [2 - 3] в Україні традиційно є однією з ключових сфер економіки, яка має значний вплив на обсяги виробництва, капіталовкладення та зайнятість. Сьогодні проблеми у цій галузі стали ще більш актуальними, зокрема,

через фінансові труднощі багатьох державних підприємств, високий рівень аварійності, низьку якість продукції з державних шахт та затримки з виплатою заробітної плати шахтарям.

Аналіз стратегії розвитку вугільної промисловості України до 2030 року [4] (зображено на рис. 1.1) показує, що виробнича потужність вугільної промисловості буде зростати завдяки удосконаленню обладнання та систем кріплення.

Гірниче кріплення [5 - 6] повинне мати високу міцність, надійність та довговічність, при цьому займаючи мінімальну площу і не перешкоджаючи виробничим процесам. Основними видами гірничого кріплення є металеве арочне, металеве кільцеве, арочне піддатливе, бетонне, залізобетонне та анкерне.

Кожен тип кріплення [7 - 8] відомий і може забезпечити підтримку гірничих робіт у складних гірничо-геологічних умовах. Проте відбувається процес модернізації вугільної промисловості, який вимагає змін для підвищення продуктивності гірничого виробництва. Одним із можливих варіантів вирішення цієї проблеми є удосконалення конструкції кріплення шляхом заміни металу на пластик.

З врахуванням зростання стійкості гірничо-геологічних умов, збільшення матеріальних та трудових витрат на кріплення виробничих виробок [9 - 10] і підвищення вимог до безпеки конструкцій підземних споруд, питання використання енергозберігаючих технологій для гірничих робіт стає все більш важливим для гірничодобувної промисловості України.

Один з найбільш перспективних шляхів удосконалення стійкості гірничих виробок [11 - 12] полягає в посиленні їх конструкції за допомогою використання композитних матеріалів.

Світовий досвід [13 - 14] підтверджує високу ефективність використання методу армування масивів анкерами і зміцнюючими сумішами, що сприяє створенню конструкцій з високою несучою здатністю. Проте останні роки свідчать про те, що світ рухається вперед, і тепер більш легкі вуглецеві волокна поступово витісняють важкі метали.

Протягом останнього десятиліття великі галузі промисловості виявляють зростаючий інтерес до використання інноваційних матеріалів для зміцнення конструкцій, зокрема, спостерігається плавний перехід від металів до пластику [15]. Практично усе, що виробляється у світі, виготовляється з цього легкого та гнучкого матеріалу. Для підвищення міцності та тривалості його використання проводять аналогію з залізобетоном, де вуглепластик та склопластик [16] стають дедалі більш популярними матеріалами у промисловому виробництві.

Композитні матеріали [17 - 19] відіграли ключову роль протягом історії людства, починаючи з житла ранніх цивілізацій і сприяючи майбутнім інноваціям. Наразі це ще дорогі матеріали для широкого використання, але з розвитком технологій і поступовим падінням цін на композитні матеріали ця ситуація може змінитися.

В останні роки спостерігається активний та систематичний розвиток нових матеріалів із покращеною пластичністю та міцністю. Велика увага приділяється вивченню та застосуванню відомих механізмів зміцнення сталі та алюмінієвих сплавів, а також їх поєднанню з процесами формування для створення комбінованих матеріалів. Це поєднання сприяє досягненню максимальної міцності при високому модулі пружності та низькій щільності. Такі матеріали майбутнього відомі як композити [20 - 21].

Композитні матеріали [22] складаються з різних шарів: наповнювача і матриці, що разом утворюють основу. Об'єднання шарів із різними властивостями у одному матеріалі дозволяє створити новий продукт із унікальними характеристиками, що відрізняються від властивостей кожного шару окремо. Використання таких матеріалів пояснюється їх здатністю покращувати характеристики основних матеріалів та їх широким застосуванням.

Композити [23 - 24] включають в себе різноманітні матеріали - метали, кераміку, скло, пластик та вуглець. Належать до них багатокomпонентні композити, які можуть бути мультиматричними, тобто мати кілька матриць у єдиному матеріалі, або представляти собою суміші з різних наповнювачів.

Ці матеріали можна класифікувати [25 - 26] за наступними ознаками:

- 1) за типом армування: волокнисті та шаруваті;
- 2) за типом наповнювачів: бавовна, крейда, тирса, вуглецеві та кевларові короткі волокна, полімери та скло;
- 3) за типом сполучної матриці: поліефірні, фенольні, формальдегідні смоли, епоксидні сполуки, силікони, алкідні смоли, меламін смола, поліамід, ацеталь, та поліпропілен.

Основними їх видам [27-30] є: склопластики, вуглепластики, боропластики та органопластики, які представлені на рисунку 1.2.

Усі новаторські матеріали [31 - 32], які застосовуються в основних галузях промисловості, характеризуються високими фізико-механічними властивостями. Дослідження показали, що для вугільної промисловості найбільш ефективним кріпильним матеріалом є вуглецеве волокно, завдяки його високій питомій міцності, термостійкості та стійкості до корозії. Цей матеріал витримує значні механічні навантаження, що особливо важливо для вугільної промисловості.

Використання композитних матеріалів має широкий спектр застосувань, починаючи від дрібних деталей побутової техніки до складних конструкцій у авіабудуванні та мостобудуванні [33 - 35].

Ці матеріали [36 - 37] є ключовими в галузях автомобільного будівництва, міського і залізничного транспорту, авіації та ракетно-космічної промисловості, суднобудування і мостобудування. Вони широко використовуються в авіаційній та ракетно-космічній техніці і відзначаються високою питомою міцністю, стійкістю до високих температур, вібрацій, а також мають низьку питому вагу [38 - 40].

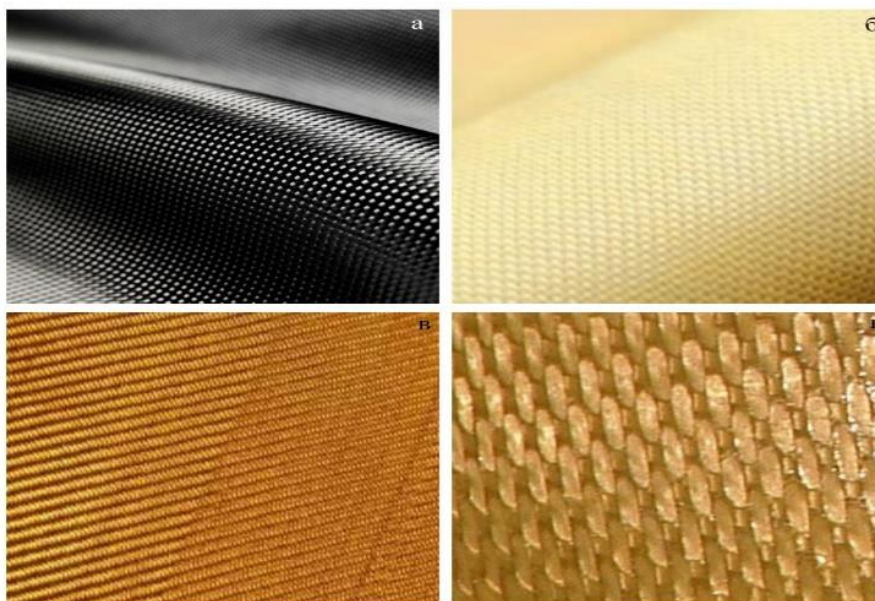


Рисунок 1.2 – Основні види композитних матеріалів: а) вуглепластики; б) склопластики; в) органіопластики; г) боропластики

На рисунку 1.3 зображено основні галузі використання композитних матеріалів, найбільше композити використовуються в автомобілебудуванні (31%), будівництві (21%) та у різних товарах широкого попиту (10%) [41 - 42].



Рисунок 1.3 – Основні галузі використання композитних матеріалів

Під час аналізу основних галузей застосування [43 - 44] цих матеріалів можна виявити такі характеристики, як висока міцність і термостійкість при відносно низькій пластичності. Встановлено, що вони здатні витримувати важкі умови, бути

стійкими до корозії, бути легкими та мати фізико-механічні властивості, що можуть конкурувати з металами, а в деяких випадках навіть перевершувати їх.

Вуглецеві волокна відіграють ключову роль у вуглепластиках. Ці матеріали допомагають зменшити швидкість поширення тріщин, які виникають у матриці, і практично повністю уникнути раптового крихкого руйнування. Вуглепластики є важливим елементом у всіх природних та техногенних спорудах, реалізуючи структурні концепції [45 - 46].

1.2 Систематизація та основні властивості композитних матеріалів

Сучасна тенденція в розвитку матеріалознавства показує, що в оптимальному вирішенні завдань проектування конструкцій важливіше обирати параметри навантаження за умов експлуатації, а не лише матеріали. Виготовлення композитних конструкцій є складним завданням, яке передбачає теоретичне моделювання складних фізико-хімічних процесів, важкі експериментальні дослідження та розробку нових технологій. Тому важливо продовжувати дослідження у цій області та поступово розширювати виробництво конструкцій, оскільки вони мають великий потенціал для успішного застосування.

Традиційно використанні металеві та неметалічні матеріали вже досягли свого максимуму у структурній міцності. У той же час зростаючі вимоги до сучасних технологій потребують розробки матеріалів, що здатні ефективно працювати в умовах складних комбінацій силових і температурних впливів, в агресивних середовищах під високими навантаженнями. Ці вимоги дуже високі і можуть бути задоволені лише за рахунок використання композитних матеріалів.

Фізико-механічні характеристики готового продукту [47-49] визначаються сукупністю властивостей використаних компонентів, а їх правильне поєднання гарантує найкращі результати. Структурні властивості високоефективних композитів залежать від безперервного, цільового та високоміцного армування волокнами.

Висока міцність при невеликій вазі та велика кількість елементів розширюють можливості їх використання в різних галузях промисловості. Ці

матеріали [50 - 51] забезпечують амортизацію вібрації, мають низькі коефіцієнти теплового впливу, і їх властивості можуть бути використані для виготовлення спеціальних виробів. Їх щільність, міцність та інші технічні параметри дозволяють використовувати їх в екстремальних умовах. Вони є стійкими і гнучкими, допомагаючи значно зменшити кількість деталей, потрібних для виробництва. Це призводить до зменшення використання сировини для кріпильних елементів та складових виробу.

Композитні матеріали [52-53] показали стійкість до різноманітних впливів, таких як перепади температур, корозія та знос, особливо в промислових установках, де ці властивості важливі для зниження витрат на життєвий цикл виробу. Тонкі волокна мають високу міцність на розрив, але більш чутливі до стискаючих та зсувних навантажень. Структурні властивості цих матеріалів залежать від армуючих волокон, які можуть бути виготовлені з безперервних скляних або графітових волокон різної форми. Існує зростаючий попит на композитні матеріали у всіх галузях промисловості через їх технічні переваги: міцність, стійкість до корозії, легкість та зручність у виготовленні складних деталей, зокрема вигину. За допомогою їх унікальних властивостей можна створювати вироби та конструкції різних форм і розмірів з особливими експлуатаційними характеристиками.

1.3 Можливість використання композитних матеріалів у гірничо-добувній промисловості

В українських надрах [54] знаходяться значні запаси корисних копалин, вартість яких, за даними Державної служби геології і надр, оцінюється від 3 до 8 трлн доларів. У країні функціонує значна кількість гірничодобувних підприємств та розвинена логістична система. Проте, незважаючи на це, Україна змушена масштабно імпортувати деякі види сировини, оскільки не може задовольнити свої потреби у ресурсах.

Особливо відчутний дефіцит енергетичних ресурсів, що становить загрозу для енергетичної безпеки країни та може привести до системної національної

кризи. Україна залежить від імпорту енергоресурсів з іноземних держав. Більшість підприємств в гірничодобувній галузі потребують комплексної модернізації та впровадження енергозберігаючих та ресурсозберігаючих технологій, проте дії у цьому напрямі часто були лише формальними заходами.

З іншого боку, вітчизняна гірничодобувна промисловість відзначається високою концентрацією та масштабами виробництва, завдяки чому можливо знизити витрати на видобуток та використовувати виробництво ефективні технології та обладнання.

У світі гірничодобувна галузь [55] є однією з провідних у глобальній економіці, за даними британської газети «Financial Times». Вона посідала 5-е місце в світі за рівнем капіталізації найбільших компаній. Інвестори розуміють потенціал цієї галузі, а компанії на спеціалізованих заходах презентують новітні обладнання, спеціальне устаткування та технології для видобутку та обробки корисних копалин. Ефективність роботи вугільних шахт визначається собівартістю вугілля, витрати на яку до 45% складають витрати на обслуговування гірничих робіт. Українські шахти зараз мають до 90% підготовчих виробок, що закріплені металевими арочними гнучкими кріпленнями, проте не менше 30% з них є пошкодженими і потребують ремонту. Однією з ключових причин неефективного використання цих конструкцій є недостатня несуча здатність кріплення, а також технічні характеристики, які не враховують гірничо-геологічні умови.

Одним зі перспективних шляхів поліпшення кріплення гірничих виробок [56] є використання новітніх інноваційних матеріалів для систем кріплення цих виробок у співпраці з природним масивом порід. Навколо підтримуваних виробок утворюється зона зруйнованих порід, де інтенсивність та характер гірського тиску змінюються. Збільшення цієї зони пов'язане із значними переміщеннями порід біля контуру виробок, які часто перевищують технічну гнучкість кріплення та підвищення щільності його установки не призвели до помітних результатів.

Існують ефективні методи забезпечення стабільності виробок, які базуються на створенні навколо них розвантаженої та посиленої вантажоносної оболонки, проте вони не отримали широкого поширення на шахтах України. Це пов'язано з

великою робочою складністю та великими витратами матеріалів, необхідних для одночасного укріплення штучно пошкоджених навколишніх порід. Тим не менш, напрямок забезпечення стабільності виробок за рахунок підвищення несучої здатності прилеглих порід є дуже перспективним і потребує подальшого розвитку [57].

Вирішення проблем безпеки гірничодобувних підприємств обов'язково пов'язане з впровадженням новітніх технологій для зменшення нерівномірності розподілу гірського тиску. Вибір відповідного типу кріплення ґрунтується на аналізі різноманітних факторів з метою забезпечення його надійності, несучої здатності, готовності до експлуатації, цілеспрямованості монтажу, трудомісткості та опору деформаціям.

Один з раціональних методів поліпшення стану виробництва та ефективного використання матеріальних ресурсів полягає у використанні комбінованих кріплень або застосуванні нових інноваційних матеріалів.

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості вуглепластику та сталі [58]

Фізико-механічні властивості	Матеріал	
	вуглепластик	сталь
Щільність, кг/м ³	1500	7500
Міцність при розтягу, МПа	1400	1400
Модуль Юнга, МПа	125000	210000
Питома міцність, $e \cdot 10^3$	83	18
Питомий модуль, $E \cdot 10^6$	14	3
Межа міцності при вигині, МПа	1190	640
Межа міцності при стисненні, МПа	990	500

Були розглянуті та проаналізовані фізико-механічні властивості інноваційних матеріалів, серед яких композитні матеріали виявилися найкращими за властивостями. Найбільш підходящим для системи кріплення гірничих виробок є вуглепластик. Цей матеріал має переваги над сталлю, тому заміна або часткове

поєднання цих матеріалів є досить перспективними у модернізації конструкцій кріплення. Фізико-механічні властивості сталі та вуглепластику представлені у таблиці 1.1.

Дивлячись на основні фізико-механічні властивості [59], можна сказати що вуглепластик не поступається, а навіть перевершує сталь, а самою головною властивістю його висока міцність при вкрай високому модулі пружності та низькій щільності і повзучості. Міцність на розтяг цього композитного матеріалу складає 1400 МПа, як і у сталі, яку використовують при кріпленні виробок.

Густина вуглепластику складає 1500 кг/м^3 , в той же час як густина металу становить 7500 кг/м^3 . З цього можна зробити висновок, що даний інноваційний матеріал буде в 5 разів легшим за сталь.

Вуглепластики користуються великим попитом у промисловому виробництві завдяки своїй винятковій термостійкості та стійкості до тривалого механічного впливу, що робить їх більш бажаними, ніж інші матеріали в різних галузях промисловості. Глобальний попит на композитні матеріали зростає, особливо в таких секторах, як транспорт, морський транспорт, вітрова енергетика, аерокосмічна промисловість і будівництво. Багато галузей промисловості прагнуть використовувати ці матеріали для зменшення ваги та підвищення продуктивності. Крім того, матеріали на основі вуглецевого волокна виявляють значно вищу міцність і стійкість порівняно з такими металами, як алюміній і сталь.

Звертаючи увагу на рис. 1.4 [60] можна сказати, що у 2025 році попит на вуглепластики для основних галузей промисловості в порівнянні з 2020 роком виросте майже в 2 рази. Вуглепластики є міцним та гнучким матеріалом, але висока їх вартість на даний момент заважає їм повністю замінити метали (наприклад, сталь).

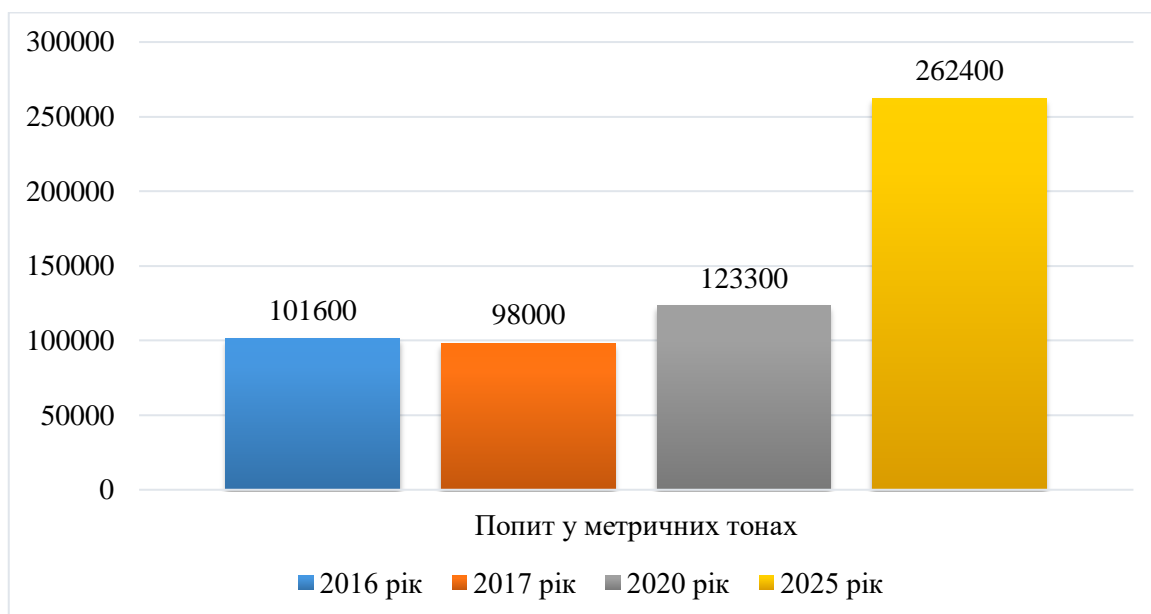


Рисунок 1.4 – Попит на вуглепластик в період з 2016 по 2025 рр.

Компоненти та конструкції з вуглецевого волокна повинні відповідати різноманітним основним вимогам, включаючи функціональність, довговічність, надійність, економічне виробництво, безпеку, енергоефективність та легкі властивості. Задоволення зростаючого попиту на вуглепластикові матеріали відіграє важливу роль у модернізації ключових галузей промисловості, які впливають на економіку, підкреслюючи потребу у вуглецевому волокні для узгодження з інженерними планами. Для виробництва матеріалів, призначених для конкретних цілей, вирішальним є комплексний аналіз взаємодії між дизайном, технологією, структурою та властивостями. Ручні етапи виробництва вуглецевого волокна сприяють його економічній неефективності, підкреслюючи необхідність повної автоматизації для зниження витрат відповідно до глобальних тенденцій до модернізації виробничих процесів.

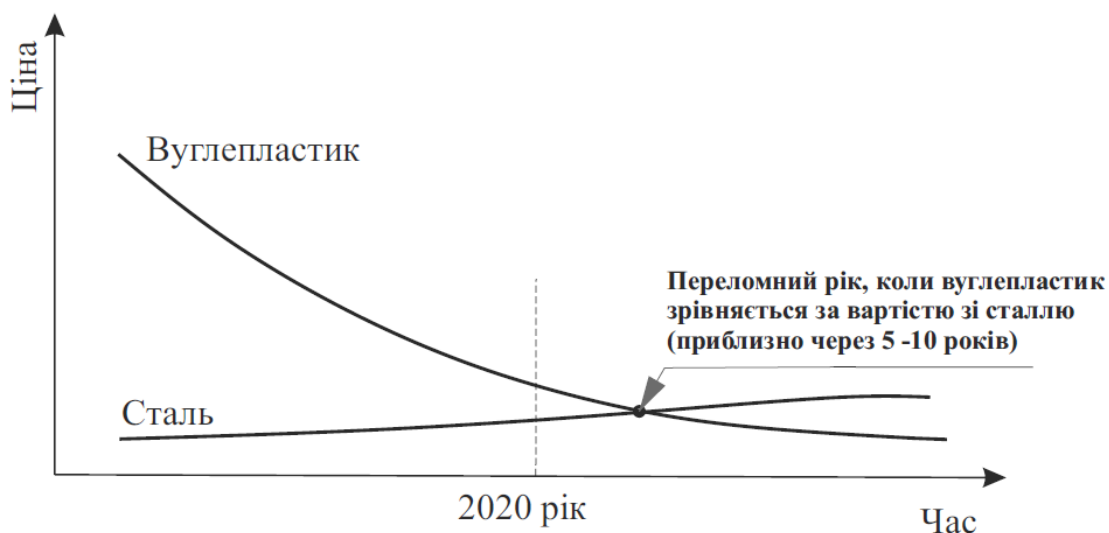


Рисунок 1.5 – Динаміка вартості сталі та вуглепластику в найближчі роки

Звичайно, в процесі виготовлення необхідно враховувати багато інших факторів, таких як удароміцність, знос або вартість проектування. В даний час собівартість виробництва цих матеріалів та виробів з них знижується в порівнянні з виробами зі сталі (рис. 1.5). На цьому графіку отримано позитивну динаміку зниження вартості вуглепластику та хиткому становищу сталі через декілька років. Враховуючи всі тенденції, вуглепластики з плином часу замінять традиційні матеріали на 70 – 80%.

Вугільні шахти в Україні [61] переходять на більш глибокі глибини, що спонукає до впровадження більш важких металевих спеціальних профілів, таких як СВП-27 та СВП-33. Однак ці матеріали сприяють великій вазі конструкції, повільній швидкості роботи та підвищеній трудомісткості в гірничих виробках. Оскільки вартість сталі продовжує зростати щорічно, існує все більше можливостей для появи вуглецевого волокна як конкурентоспроможної альтернативи.

Одним із способів пом'якшити деякі недоліки, пов'язані з композитними матеріалами, є автоматизація виробничих процесів та інтеграція сучасних технологій. Завдяки цьому вугільна промисловість може підвищити ефективність і скоротити трудомісткі завдання.

Перехід до вуглецевого волокна [62] для кріпильних виробів замість традиційного металу підтримується обмеженнями методів металевого кріплення

та збільшенням ваги при переході між профілями СВП. Для вугільної галузі вкрай важливо прийняти інноваційні рішення для кріплення, які забезпечують як міцність, так і легкість.

Усі композитні матеріали добре взаємодіють один з одним, але дослідження, засновані на фізико-механічних властивостях, показують, що краще використовувати вуглецеве волокно як кріпильний матеріал у вугільній промисловості через його високу питому міцність, високу термостійкість і тривалий термін служби. Витримує механічні навантаження, необхідні для видобутку вугілля.

Підводячи підсумок, можна зробити висновок, що у слабометаморфізованих породах шахт Західного Донбасу необхідно використовувати кріплення з підвищеною стійкістю, замість металевих профілів СВП.

1.4. Постановка мети і завдань досліджень

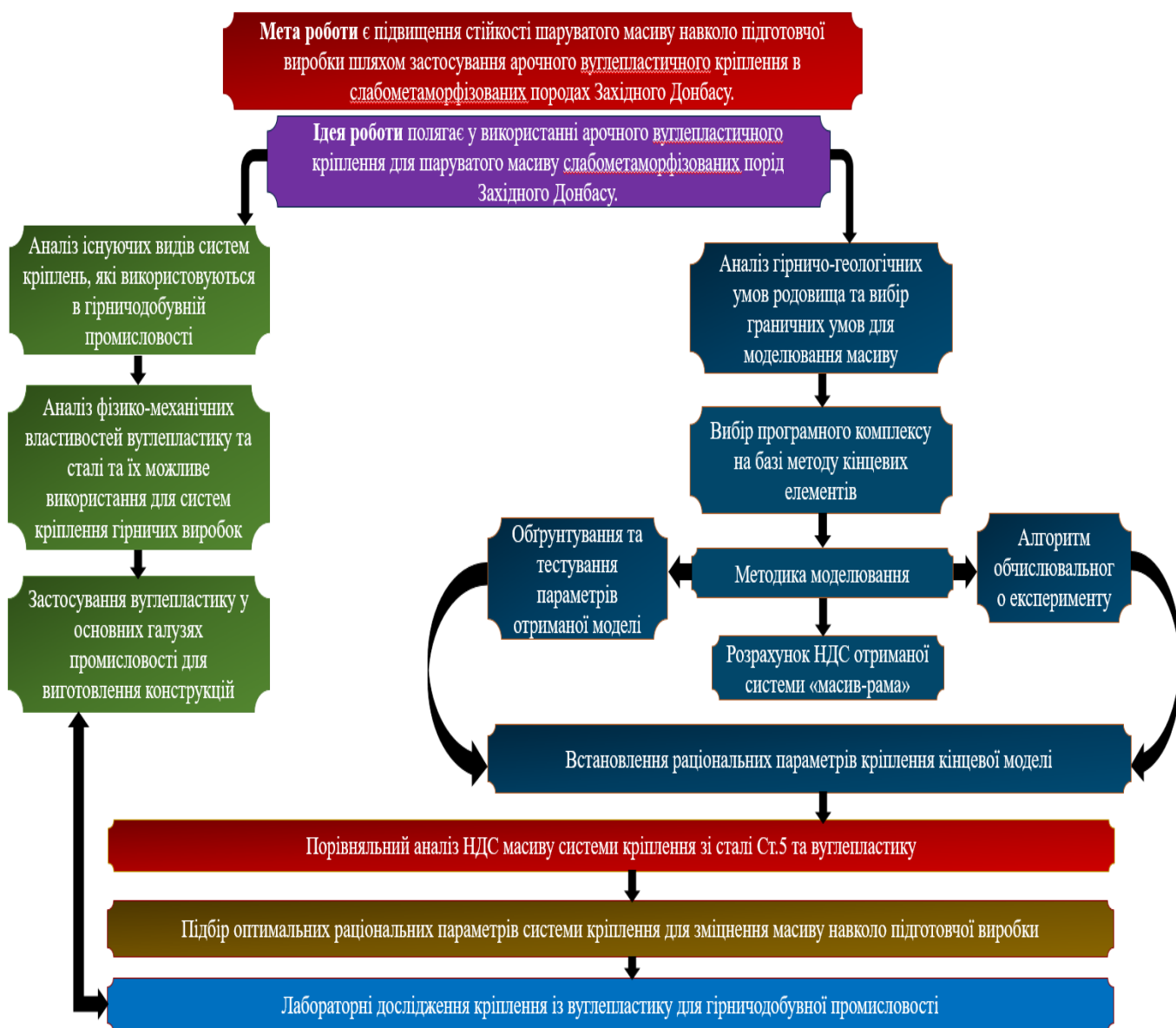
Успішна реалізація виконання завдань даної дисертаційної роботи обраного напрямку базується на обґрунтуванні стратегії виконання блоків досліджень, що представлені структурно-логічною схемою. Вона складається з окремих блоків та завдань, взаємозв'язок яких підпорядкований єдиній меті - обґрунтуванню використання арочного вуглепластичного кріплення у взаємодії з шаруватим масивом для слабометаморфізованих порід шахт Західного Донбасу.

Перша група задач, об'єднана в блок I, спрямована на дослідження існуючих видів систем кріплень, які використовуються в гірничій промисловості для аналізу можливого застосування композитних матеріалів для елементів кріплення виробки з врахуванням фізико-механічних властивостей обраного матеріалу. Кінцевим результатом досліджень цього блоку є всебічне обґрунтування використання вуглепластику для гірничодобувної промисловості.

Задачі блоку II направлені на детальне дослідження отриманої моделі напружено-деформованого стану шаруватого масиву у взаємодії з системою кріплення у програмному продукті SolidWorks для встановлення раціональних

параметрів кріплення для подальшого етапу дослідження у лабораторних умовах за допомогою пресу.

Блок III та IV спрямовані для підтвердження адекватності результатів математичного та лабораторного дослідження шляхом визначення залежностей зміщень контуру виробки для зміцнення масиву у заданих умовах.



Висновки до розділу 1

1. Комплексний аналіз досліджень шаруватого масиву зі слабометаморфізованими породами Західного Донбасу, показав, що найбільш небезпечними ділянками втрати стійкості у шаруватому масиві є зона навколо контуру підготовчої виробки.

2. На основі виконання аналізу фізико-механічних властивостей композитних матеріалів встановлено, що кріплення з вуглепластику здатне повністю замінити типові металеві арочні кріплення зі зміцненням шаруватого масиву без порушень стійкості виробки за рахунок високих показників: гнучкості (1 ГПа), міцності (900 МПа) та пружності (модуль пружності 95 ГПа/см⁻³).

3. Аналіз ринку собівартості виробництва композитних матеріалів виявив позитивну динаміку зниження вартості вуглепластику через декілька років шляхом автоматизації виготовлення та можливості заміни традиційних матеріалів на 70 – 80%.

Перелік використаних у розділі 1 джерел

1. Bobro, D. (2018). Вугільна промисловість України в умовах гібридної війни [Ukraine's coal industry in the context of hybrid war]: *Analytical note National Institute for Strategic Studies*: Website. Retrieved from <http://www.niss.gov.ua/articles/1890> in Ukrainian].
2. Кулицький, С. (2016) Вугільна промисловість України: сучасний стан і проблеми розвитку [Електронний ресурс] / *Україна: події, факти, коментарі* – № 17. – С. 37–44.
3. Міністерство енергетики України. (2020). *Звіт про стан реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» за 2019 рік*. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245472866>
4. ДТЕК Енерго. (2021). *ТЕС ДТЕК Енерго працюють вище плану Міненерго для стабілізації енергосистеми*. Режим доступу: <https://energo.dtek.com/ru/media-center/press/tes-dtek-energo-rabotayut-vyshe-plana-minenergo-dlya-stabilizatsii-energosisistemy--ildar-saleev/>
5. Hrinov, V.H., & Khorolskyi, A.O. (2020). Studies of the basics of technology for optimal design of rational use of valuable mineral deposits. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 19-24. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.19-24>
6. Shashenko, O.M., Napieiev, S.M., Shapoval, V.G., & Khalymendyk, O.V.(2019). Analysis of calculation models while solving geomechanical problems in elastic approach. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 28-36. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/21>
7. Petlovanyi, M.V., Zubko, S.A., Popovych, V.V., & Sai, K.S. (2020). Physicochemical mechanism of structure formation and strengthening in the backfill massif when filling underground cavities. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Technologii*, (6), 142-150. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-142-150>

8. Kuz'menko, A.M., & Petlevanyy, M.V. (2017). Razrushenie zakladochnogo massiva v zavisimosti ot tekhnologii ego vozvedeniya. *Zbirnyk Naukovykh Prats NHU*, (52), 159-166.

9. Drobot, Ya. V., & Ilyinsky, V. V. (2017). Innovative development of enterprises of the coal industry in the context of providing Ukraine's energy security. Retrieved from http://www.confcontact.com/2017-ekonomika-imenedzhment/2_drobot.htm [in Ukrainian].

10. Zaloznova, Yu. S. (2017). Economic and social problems of industrial development]. Kyiv. [in Ukrainian].

11. BP Statistical Review of World Energy . (2018). 69th edition. *British Petroleum. 2018*. c. 42–43.

12. Wu, J., Feng, M., Mao, X., Xu, J., Zhang, W., Ni, X., & Han, G. (2018). Particle size distribution of aggregate effects on mechanical and structural properties of cemented rockfill: Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*, (193), 295-311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.208>

13. Skipochka, S., Krukovskyi, O., Serhiienko, V., & Krasovskyi, I. (2019). Non-destructive testing of rock bolt fastening as an element of monitoring the state of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 16-23. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.016>

14. Jonsson, L., Töyrä, J., Woldemedhin, B., & Krekula, H. (2013). Rock support in the Kiirunavaara Mine. *In 7th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*. (pp. 401-409). Perth. Australia: Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1304_26_jacobsson

15. Sakhno, I., Sakhno, S., Isaienkov, O., & Kurdiunow, D. (2019). Laboratory studies of a high-strength roof bolting by means of self-extending mixtures. *Mining of Mineral Deposits*, 13(2), 17-26. <https://doi.org/10.33271/mining13.02.017>

16. *Introduction to Composite Materials* by Tri – Dung Ngo [електронний ресурс]–URL: <https://www.intechopen.com/books/composite-and-nanocomposite-materials-from-knowledge-to-industrial-applications/introduction-to-composite-materials>

17. *Історія композитних матеріалів* - [електронний ресурс]–URL: <https://naukatehnika.com/istoriya-kompozitnyx-materialov.html>

18. Johnson, T. (2018) *History of composites. The evolution of lightweight composite materials*. Available from: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>

19. Yuanjian, T., Isaac, D.H. (2007) Impact and fatigue behaviour of hemp fibre composites. *Composites Science and Technology*.; 67:3300-3307. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.03.039

20. Sanjay, M.R., Arpitha, G.R., Naik, L.L., Gopalakrishna, K., Yogesha B. (2016). Applications of natural fibers and its composites: *An overview*. *Natural Resources*.; 7:108-114. DOI: 10.4236/nr.2016.730

21. Williams, J. (2019). *The Science and Technology of Composite Materials*. *Australian Academy of Science*.; Available from: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/composite-materials>

22. *What is composite materials?* [електронний ресурс] – URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-a-composite-material>

23. Johnson, T. (2018) *History of composites. The evolution of lightweight composite materials*. Available from: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>

24. Sanjay, M.R., Arpitha, G.R., Naik, L.L., Gopalakrishna, K., Yogesha, B (2016). Applications of natural fibers and its composites: *An overview*. *Natural Resources*.;7:108-114. DOI:10.4236/nr.2016.730

25. Ngo, T.D. (2018). Natural fibres for sustainable bio-composites. In: Gunay E, editor. *Natural and Artificial Fiber Reinforced Composites as Renewable Sources*. Croatia: IntechOpen; DOI: 10.5772/intechopen.71012

27. Mazumdar, S.K. (2002) *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press
28. High-Performance Composites Sourcebook. (2009). *Gardner Publications Inc*
29. Latif, R, Wakeel, S, Khan, N.Z, Siddiquee, A.N, Verma, S.L, Khan, Z.A. (2018) Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.;0(0):1-16
30. Minsch, N., Herrmann, F.H., Gereke, T., Nocke, A., Cherif, C. (2017). Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies. *Procedia CIRP*.;66:125-130. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.284
31. *Composite Materials: Fabrication Handbook*. (2010) by Wolfgang Publications, Inc Paperback, 144 pages
32. Asadi, A., Miller, M., Moon, R.J., Kalaitzidou, K. (2016) Improving the interfacial and mechanical properties of short glass fiber/epoxy composites by coating the glass fibers with cellulose nanocrystals. *Express Polym. Lett.*, 10, 587–597
33. *Composite Materials/ Chawla, Krishan K.* (2012), XXIII, 542 p. 265 illus., 211 illus. in color.
34. *Building on advantages of composites in construction & business case*. (2010), Reinforced Plastics.
35. Karbhari, V.M., Zhao, L. (2000) Use of composites for 21st century civil infrastructure, *Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering*, 185, 2000, pp. 433-454
36. Hollaway, L.C. (2010) A review of the present and future utilization of FRP composites in infrastructure with reference to their important in-service properties, *Construction and Building Materials*, 24, pp. 2419-2445.
37. Triantafillou, Fiber-reinforced polymer composites for construction (2002)–State-of-the-art review, *Journal of Composites for Construction*, pp. 73-87
38. Ogin, S.L., Zangenberg, J. (2016). Composite materials in Modeling Damage, *Fatigue and Failure of Composite Materials*.

39. De Lorenzis, L., Namni, A., La Tegola, A. (2000). Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods, bibl. *International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000*, Milan, Italy.

40. Chehroudi B. (2017). *Composite Materials and Their Uses in Cars. Part I: What is a Composite Material? Advanced Technology Consultants*. Available from: <https://advtechconsultants.com>

41. *Composite Materials*. (2010). Fabrication Handbook (Publications, Inc Paperback, Wolfgang).

42. Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2004). Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites, *Construction and Building Materials*, 18, pp. 9-19

43. Dragan, Aleksendrić., Pierpaolo, Carlone. (2015). *Introduction to composite materials in Soft Computing in the Design and Manufacturing of Composite Materials*.

44. Yu, T., Teng, J.G., Wong, Y.L. (2010). Stress-strain behaviour of concrete in hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns, *Journal of Structural Engineering*, 379-389

45. ГОСТ Р 57407:2017 *Вуглецеві волокна. Загальні технічні вимоги та методи досліджень*. – Вст. 2017-09-01. - М.: Вид-во стандартів, 2019.

46. ГОСТ Р 55045:2012 *Технічна діагностика. Акустично-емісійна діагностика. Терміни, визначення та значення* – Вст. 2014-01-01 - М.: Вид-во стандартів, 2019

47. Hu, N. (2012). *Composites and Their Applications*. Croatia: IntechOpen. DOI: 10.5772/3353

48. Calvário, M., Sutherland, L.S., Guedes Soares, C. (2017) A review of the applications composite materials in wave and tidal energy devices. In: Gunay E, editor. *Natural and Artificial Fiber-Reinforced Composites as Renewable Sources. Developments in Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources: Proceedings of the 17th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2017)*, Lisbon, Portugal. CRC Press; IntechOpen, Croatia. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71012

49. Pemberton, R., Summerscales, J., Graham-Jones, J. (2018). *Marine Composites: Design and Performance*. Cambridge, UK: *Woodhead Publishing*; 2018. DOI:10.1016/C2016-0-00710-6

50. *Композиційні матеріали (КМ)* - [електроний ресурс] – URL: https://stud.com.ua/36297/tovaroznavstvo/kompozitsiyni_materiali

51. Neşer, G. (2017). Polymer based composites in marine use: *History and future trends*. *Procedia Engineering*. 194:19-24

52. Гончаренко В.В, Коваленко І.В. *Технологія композиційних матеріалів* - [електроний ресурс] – URL:https://cpsm.kpi.ua/nauka/knigi/Gon_Kov_TehnKompMater-2007.

53. Brostow, W., Lobland, H.E., (2016). Survey of relations of chemical constituents in polymer-based materials with brittleness and its associated properties. *Chem. Technol.* 2016, 10, 595.

54. Кулицький, С. (2016). Вугільна промисловість України: сучасний стан і проблеми розвитку. *Україна : події, факти, коментарі*. №18.С.47-54.

55. *Гірнича промисловість – ключ до розвитку України* - [електроний ресурс] – URL: <https://blog.liga.net/user/akazmirishin/article/30618>

56. 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>

57. Petlovanyi, M.V., & Ruskykh, V.V. (2019). Peculiarities of the underground mining of high-grade iron ores in anomalous geological conditions. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(4), 706-716. <https://doi.org/10.15421/111966>

58. *Програма робіт зі зниження металоємності кріплення та ремонту гірничих виробок на виконання наказу Держвуглепрому України №19/Д від 12.04.01 р.* - К. - Харків, 2001.

59. Бондаренко, В.І., Салєєв, І.А., Шека, І.В., Цівка, Є.С. (2020). Обґрунтування використання композитних матеріалів для підвищення стійкості гірничих виробок // *Українська школа гірничої інженерії*: міжнар. наук.-практ. конф., 7-11 вересня 2020 р.: тези доп. – Бердянськ, 2020. – С. 25-26

60. *Carbon composite demand* - [електронний ресурс] – URL: https://www.statista.com/topics/4756/composite-materials/industry/#dossierSummary_chapter2
61. Друцко, В.П., Алферов, Б.В., Шаповал, Ю.С., Гнездилов, В.Г. (1994). Досвід кріплень виробок у складних гірничо-геологічних умовах. //Вугілля України.-1994,-№7. - С.45-47
62. *Steel Statistics / World Steel Association* [Електронний ресурс]. URL: https://www.worldsteel.org/steel-bytopic/statistics/steel-statistical_yearbook/World-Steel-in-Figures.html (дата звернення: 19.09.2019)
63. Nurpeissova, M., Bekbassarov, S., Bek, A., Kyrgyzbaeva, G., Turisbekov, S., & Ormanbekova, A. (2020). The geodetic monitoring of the engineering structures stability conditions. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(11), 9151-9163. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2017.9151.9163>
64. Kieush, L., Boyko, M., Koveria, A., Yaholnyk, M., & Poliakova, N. (2020). Manganese Sinter Production with Wood Biomass Application. *Key Engineering Materials*, 844, 124-134. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.844.124>
65. Lozynskyi, V., Medianyky, V., Saik, P., Rysbekov, K., & Demydov, M. (2020). Multivariate solutions for designing new levels of coal mines. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 35(2), 23-32. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.2.3>
66. Sobolev, V., Bilan, N., Dychkovskyi, R., Cabana, E.C., & Smolinski, A. (2020). Reasons for breaking of chemical bonds of gas molecules during movement of explosion products in cracks formed in rock mass. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(2), 265-269. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.01.002>
67. Barton, N. (2020). Unconventional exploration of failure modes in rock and rock masses. Trondheim, Norway: Eurock2020, 14 p
68. Pysmennyi, S., Fedko, M., Chukharev, S., Rysbekov, K., Kyelgyenbai, K., & Anastasov, D. (2022). Technology for mining of complex-structured bodies of stable and unstable ores. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012040>
69. Pysmennyi, S., Shvager, N., Shepel, O., Kovbyk, K., & Dolgikh, O. (2020).

Development of resource-saving technology when mining ore bodies by blocks under rock pressure. *E3S Web of Conferences*, (166), 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016602006>

70. Matayev, A.K., Musin, A., Abdrashev, R.M., Kuantay, A.S., & Kuandykova, A.N. (2021). Substantiating the optimal type of mine working fastening based on mathematical modeling of the stress condition of underground structures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 57-63. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/057>

71. Mustapaevich, D.K., & Mnajatdin, M.D. (2021). Properties of coal, processes in coal mining companies, methods of coal mining in the World. *Journal NX*, 7(10), 231-236.

72. Xiong, Y., Kong, D., Wen, Z., Wu, G., & Liu, Q. (2022). Analysis of coal face stability of lower coal seam under repeated mining in close coal seams group. *Scientific Reports*, 12(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04410-5>

73. Bazaluk, O., Rysbekov, K., Nurpeisova, M., Lozynskiy, V., Kyrgyzbayeva, G., & Turumbetov, T. (2022). Integrated monitoring for the rock mass state during large-scale subsoil development. *Frontiers in Environmental Science*, (10), 852591. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.852591>

74. Hu, Q., Cui, X., Liu, W., Feng, R., Ma, T., & Li, C. (2022). Quantitative and dynamic predictive model for mining-induced movement and deformation of overlying strata. *Engineering Geology*, (311), 106876. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106876>

75. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Barabash, M., & Salieiev, I. (2021). Principles for certain geomechanics problems solution during overworking of mine workings. *E3S Web of Conferences*, (280), 01007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128001007>

76. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Poimanov, S., & Pochepov, V. (2020). Method for optimizing the protecting pillars parameters in underground coal mining. *E3S Web of Conferences*, (166), 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016602009>

77. Bondarenko, V., Salieiev, I., Kovalevska, I., Chervatiuk, V., Malashkevych, D., Shyshov, M., & Chernyak, V. (2023). A new concept for complex mining of mineral raw material resources from DTEK coal mines based on sustainable development and ESG strategy. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1), 1-16. <https://doi.org/10.33271/mining17.01.001>
78. Kovalevska, I., Samusia, V., Kolosov, D., & 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>
79. Małkowski, P., Niedbalski, Z., & Balarabe, T. (2021). A statistical analysis of geomechanical data and its effect on rock mass numerical modeling: A case study. *International Journal of Coal Science & Technology*, (8), 312-323. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00369-2>
80. Salieiev, I.A., Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., & Kovalevska, I.A. (2021). Development of a methodology for assessing the expediency of mine workings decommissioning based on the geomechanical factor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КРІПЛЕННЯ ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ В СЛАБОМЕТАМОРФІЗОВАНИХ ПОРОДАХ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

2.1 Загальна характеристика математичного моделювання геомеханічних систем

Розуміння розподілу гірського тиску в гірничих масивах має критичне значення в сучасній гірничодобувній промисловості. Від стабільності кріпильних систем, що протидіють цьому тиску, залежить безпека та ефективність всього шахтного виробництва.

З метою розгляду сучасних підходів до покращення підземних кріпильних систем, у цій дисертації аналізується використання вуглепластику. Застосовуючи математичну модель, дослідження визначає оптимальні конструкції, надійно протистоятимуть тиску гірського масиву, враховуючи фізичні властивості як самого масиву, так і нових матеріалів.

У сучасну епоху зростання обчислювальної потужності призвело до широкого застосування математичних методів у різних областях. Математизація включає розробку математичних моделей і методів їх дослідження.

У деяких галузях досліджень точність чисельного моделювання стала настільки високою, що при виявленні значних розбіжностей між результатами моделювання та експериментів, першочерговим завданням стає перевірка коректності експериментальних даних [2].

Метод вивчення об'єктів або фізичних процесів [3] за допомогою математичного моделювання, що відомий як обчислювальний експеримент, полягає у побудові математичної моделі та чисельному дослідженні її поведінки в різних умовах або модифікаціях. Цей підхід дозволяє визначати різноманітні характеристики процесів, оптимізувати конструкції та режими функціонування розроблених пристроїв [4].

Процеси в системі можуть різнитися [5] залежно від умов, у яких вони відбуваються, і відслідковувати поведінку реальної системи при різних умовах іноді складно або навіть неможливо. Імітаційне моделювання - це метод, що

дозволяє побудувати модель, до якої можна легко повернутися до початкового стану та вивчати її поведінку.

З розвитком обчислювальної техніки зростає можливість використання обчислювального експерименту в різних областях. Завдяки цьому збільшується складність і різноманітність задач, які можна вирішити: великий обсяг отриманої інформації потребує адекватних методів її аналізу. Замість масивів числових даних та простих графіків все частіше використовуються наочні візуальні образи, що сприяють кращому розумінню результатів. Обчислювальний експеримент став одним з ключових методів для вирішення фізичних та інженерно-технічних проблем [6-7].

Розробка програмних комплексів для обчислювального експерименту вимагає значних зусиль і великої кількості програмістів через їх об'ємність та складність. Складні математичні моделі та необхідність збереження численних варіантних модулів призводять до значних розмірів програмного забезпечення для обчислювального експерименту [8].

Обчислювальний експеримент має широкий застосування, оскільки може легко адаптуватися для дослідження різних об'єктів. Це пояснюється тим, що багато явищ та процесів можуть бути описані однаковими математичними моделями. Універсальність обчислювального експерименту дозволяє ефективно вирішувати нові задачі, використовуючи накопичений досвід у математичному моделюванні та програмному забезпеченні [9].

Головною особливістю обчислювального експерименту як технології наукових досліджень є його міждисциплінарний характер. Обчислювальний експеримент можна розглядати як спосіб співпраці розумової праці, що підвищує продуктивність досліджень. Важливо розглядати обчислювальний експеримент як нову технологію організації наукових досліджень, яка поєднує теоретичні та експериментальні аспекти. Математичне моделювання та обчислювальний експеримент є основними складовими цієї методології [10].

2.2 Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) при вирішенні задач геомеханіки

Обчислювальні експерименти на основі методу скінченних елементів (МСЕ) [11] використовуються для моделювання геомеханічних процесів у вуглевмісному масиві навколо виїмкових виробок. Методологія моделювання передбачає створення загальної геомеханічної системи з двох частин: моделі шаруватого масиву та системи кріплення. Система кріплення може бути базовою, яка вже існує у технічній документації, або вдосконаленою, яка потребує додаткових досліджень для оцінки її застосування.

З точки зору методології, дослідження складається з наступних компонентів: пояснення механізму зміщення вугільного пласту; аналіз нестатичних деформацій породного масиву біля виробки; оцінка нестатичних деформацій навантажених елементів базової кріпильної системи; розробка та обґрунтування покращеної схеми кріплення; розрахунок геомеханічної системи «масив – кріплення»; розробка методики розрахунку параметрів нової системи кріплення для виїмкової виробки.

Під час вирішення завдань геомеханіки виникає проблема розрахунку систем з складною геометричною формою та нерегулярною фізичною структурою. Гірський масив має багато характеристик своєї структури і властивостей, які можуть бути враховані лише за допомогою чисельних методів, таких як метод скінченних елементів (МСЕ), метод кінцевих різниць (МКР) та метод граничних елементів (МГЕ). Ці методи все більше використовуються в інженерній та науковій галузях завдяки поширенню потужних обчислювальних технологій. Ефективне використання цих методів для розв'язання важливих завдань геомеханіки безпосередньо залежить від розробки універсальних обчислювальних задач та їх реалізації на комп'ютерах [12].

Метод кінцевих різниць [13-15] полягає в тому, що початкова математична задача фізики замінюється дискретним аналогом, і потім застосовуються спеціальні алгоритми для розв'язання цієї дискретної задачі. Його перевагами є висока універсальність, що перевершує аналітичні методи, і відносна простота

побудови вирішального алгоритму та його програмної реалізації. Часто можливе розпаралелювання вирішального алгоритму при застосуванні цього методу [16].

Недоліками методу кінцевих різниць [17] є його обмежене використання на нерегулярних сітках, швидке збільшення обчислювальної складності при збільшенні розмірності задачі і складність аналітичних досліджень властивостей різницевої схеми. Останнім часом метод граничних елементів став популярним, але його використання для розрахунків з неоднорідного матеріалу та при пружно-пластичному деформуванні може бути неефективним. Цей метод апроксимує функції, які задовольняють систему диференціальних рівнянь, але не граничні умови [18-19].

Перевагами цього методу [20] є обмежене залучення до дискретизації лише граничних поверхонь задачі, легкість дискретизації криволінійних границь з різномасштабними складовими частинами, відсутність необхідності у просторовій інтерполяції та чисельному диференціюванні потенціалу для визначення магнітної індукції та адекватність моделювання відкритих систем. Головним недоліком є низька швидкодія, що обмежує застосування цього методу переважно для розрахунків систем з простою геометрією.

Щодо методу скінченних елементів (МСЕ), він є ефективним засобом дослідження НДС стану конструкцій різних форм і має невеликий недолік. Перевірка отриманих результатів на надійність наразі проводиться лише у порівнянні з точними або відомими рішеннями. Цей метод представляє спробу подолати складності, пов'язані з проблемою суцільності середовища, шляхом його розбиття на окремі елементи, які взаємодіють між собою лише в обраних точках [21 - 23].

В останній час, завдяки своїй універсальності та високій точності, інтенсивний розвиток застосування в практиці розрахунків напружено-деформованого стану масиву гірських порід є даний метод.

Методологія застосування цього методу—для різноманітних задач детально описана у роботі [24]. Для фізичних нелінійних задач запропоновано три способи покращення методу: змінна жорсткість, початкові напруження та початкові

деформації. Використання цього методу для конкретних завдань обумовлено особливостями схеми навантаження, матеріальною поведінкою та комбінацією граничних умов.

У роботі великий акцент зроблено на врахуванні неоднорідностей фізико-механічних властивостей породних шарів у гірському масиві. Проведена класифікація математичних моделей порід за їх міцнісними характеристиками на слабкі, середньої міцності та міцні групи, а також показана методика інтегрування цих моделей у розрахункову схему методу скінченних елементів.

Особлива увага приділена вирішенню задач визначення НДС гірського масиву з урахуванням повної діаграми «навантаження-деформація». Запропонована автором методика пошуку рішення за допомогою методу фіктивних зусиль взаємодіє з енергетичними концепціями рівноваги суцільного середовища у позамежному стані. Цей підхід допомагає зменшити вплив факторів, що визначають початкову модель, на точність розв'язку, і вважається найбільш підходящим для задач, які враховують поведінку матеріалу за межами меж міцності [25].

У дослідженні [26] розглянуті аспекти використання МСЕ для аналізу геомеханічних явищ з низьким внутрішнім тертям, зокрема розглянуте вирішення проблеми деформації обвалених порід. Розрахункова модель задачі в даній роботі є пружно-пластична, оскільки необхідно враховувати специфіку поведінки руйнівного матеріалу та розміри фрагментів, які впливають на кут внутрішнього тертя порід.

Загальний огляд наявних досліджень переконливо підтверджує, що застосування методу скінченних елементів у геомеханіці поширюється на все більший спектр завдань. Методика проведення розрахунків удосконалюється та ускладнюється, об'ємні задачі геомеханіки в пружно-пластичній постановці стають стандартом. Дослідники все частіше враховують багато факторів і їх комбінації, які характеризують локальні збурення системи. Загалом, розвиток математичних моделей спрямований на досягнення доступної точності розрахунків, які базуються на класичних методиках, але враховують максимально можливу кількість факторів.

Аналізуючи дослідження, присвячені скінченно-різницевому моделюванню геомеханічних процесів біля підземних виробок, можна виокремити наступні тенденції: найбільш поширений метод скінченних елементів, який є універсальним; проте, при вирішенні складних геомеханічних завдань, які враховують багатофакторність механічних властивостей порід, неоднорідність структури навколишнього масиву та геометричних параметрів об'єкту; більшість задач потребує тривимірної постановки для точного відображення геомеханічних процесів, що спостерігаються у гірських масивах на сучасному етапі досліджень; зростає кількість досліджень, які враховують неоднорідність механічних характеристик масиву та його структури, що значно впливає на результати розрахунків геомеханічної системи; також зростає кількість робіт, які враховують не лише пластичні та реологічні властивості гірських порід, але й повну діаграму їх деформації, що наближає геомеханічну модель до реального об'єкту.

У останні роки спостерігається зростання популярності методу скінченних елементів у дослідженнях, оскільки він ефективно вирішує складні завдання геомеханіки, є достатньо універсальним для моделювання геомеханічних процесів і має перспективи для подальшого розвитку.

2.3 Обґрунтування та вибір програмного комплексу на базі методу скінченних елементів

На сьогоднішній день існує велика кількість програм для комп'ютерного моделювання, які застосовуються у різних галузях промисловості. Багато з цих програм базуються на методі скінчених елементів [27-28], чисельному методі для розв'язання диференціальних рівнянь з похідними та інтегральних рівнянь, що допомагають вирішувати задачі прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення завдань механіки деформованого твердого тіла, теплообміну, гідродинаміки та електродинаміки, що дозволяє вирішувати широкий спектр завдань геомеханіки.

Усі програми скінчених елементів можна умовно розділити на групи. Перша група включає найскладніші, дорогі та потужні програмні комплекси, такі як

ANSYS, SolidWorks, COMSOL. Вони призначені для моделювання процесів у різних галузях, користуються популярністю серед провідних виробників машин і володіють високою точністю досліджень. Програми другої групи розроблені як приватні рішення для спеціалізованих задач у галузях досліджень з метою створення простого та компактного робочого інструменту, що покращує їх можливості. Крім того, існує багато програм для розрахунків методом скінчених елементів, деякі з яких входять до складу інших програмних продуктів.

ANSYS - це одна з найбільш потужних систем скінчених елементів у світі. Особливістю цієї програми є можливість використання файлів у всіх версіях продукту на будь-яких підтримуваних платформах. Універсальність програми дозволяє використовувати одну модель для розв'язання різних задач і переглядати результати на різних рівнях структури. Однією з ключових особливостей є наявність унікальних алгоритмів моделювання, які дозволяють покращити точність обчислень навіть у разі складної геометрії виробів. Однак основними недоліками є висока вартість та складність розробки [29].

Ще однією програмою для вирішення завдань геомеханіки є COMSOL, яка є універсальною платформою для комп'ютерного моделювання різних фізичних задач на основі сучасних чисельних методів. Ця програма має широкі можливості для дослідження матеріалів у стані напружень та деформації. Додаткові інтерфейси можуть використовувати моделювання для технічних розрахунків, САПР та автоматизації проектування пристроїв. Цей пакет має практично таку ж функціональність, як ANSYS, з тим що COMSOL фактично є інструментом пакету MATLAB та працює під його керуванням [30].

Основними вимогами до програмного комплексу є:

Програмний продукт має задовольняти :
<i>моделювання шаруватого масиву гірських порід</i>
<i>моделювання різних фізико-механічних властивостей гірських порід та матеріалів при врахуванні анізотропії гірського масиву</i>
<i>вирішення задач в просторовій постановці</i>
<i>враховувати кріплення гірських виробок</i>
<i>враховувати характер взаємодії шарів порід на контакті розділу</i>
<i>моделювати основні системи тріщин</i>

Програмний продукт, який відповідає основним вимогам та може вирішувати складні геомеханічні задачі є SolidWorks. Це потужний інструмент для 3D-моделювання та автоматизованого проектування складних виробів різного призначення. Це добре налаштований пакет для проектування продукту в цифровій формі з багатьма додатковими інструментами для створення віртуальних технічних тестів на моделях [31].

Він має такі переваги [32]: можливість створювати 3D-моделі та надавати різну технічну інформацію; наявність каталогу стандартних компонентів, що допомагає зекономити час на створення моделей; можливість генерувати напівавтоматичне створення на основі 3D-моделі; можливість деталізації до максимуму; можливість виявлення помилок на ранніх етапах моделювання для економії часу на проектування; можливість створювати як 2D, так і 3D-моделі, зміни в одному автоматично впливають на інший вид, що запобігає помилкам.

Щодо комплексу Simulation, це скінчено-елементний комплекс, розроблений компанією Dassault Systemes спеціально для використання разом із системою твердотільного параметричного моделювання SolidWorks. Цей комплекс складається з відкритої системи модулів, які призначені для вирішення завдань міцності, стійкості, динаміки конструкцій, а також оптимізації, гідродинаміки і електромагнітного випромінювання [33].

У програмі Simulation [34] використовуються AccuStress – сучасна технологія побудови скінченно-елементних сіток з урахуванням особливостей геометрії виробу. Спеціальні алгоритми виявляють області з значними змінами геометричних параметрів виробу та створюють сітку скінченних елементів найменших розмірів для відповідних «критичних» областей.

Графічні можливості для візуалізації результатів розрахунків майже достатньо для підготовки звітів. Сучасна технологія Open GL підтримує всі графічні відображення результатів, такі як розрізи, ізоповерхні, точки та векторні зображення. Переміщуючи курсор миші на будь-яку область конструкції, користувач може отримати дані про напружено-деформований стан у цій точці. Можна вивести сили реакції без виходу з режиму візуалізації. Є можливість анімації результатів для динамічного перегляду. Програма генерує звіти у текстовому та HTML-форматах, використовуючи моделі VRML та файли AVI. Моделі скінченних елементів можуть бути експортовані у форматах PATRAN та IDEAS. Навантаження можуть бути пов'язані з вершинами моделей, гранями та поверхнями. Геометричні об'єкти можна жорстко фіксувати, та задавати для них запропоновані рухи. Вони задаються не тільки у вигляді фіксованої координатної величини, але у змінній формі величини, наприклад поліноміальних функцій від певних ділянок поверхні виробу [35].

Перевірка точності та достовірності отриманих результатів показала, що максимальна похибка обсягу склала 7,6%, а середнє відхилення від аналітичного рішення перевищувало 2%. Хоча програмний комплекс SolidWorks, пов'язаний із програмним моделюванням, є потужним і має багато незаперечних переваг, важливо пам'ятати, що він лише інструмент для вирішення завдань. Якість

результатів залежить від адекватності математичної моделі та відповідності вихідних параметрів реальності.

Порівняльний аналіз основних програмних комплексів для комп'ютерного моделювання показав, що SolidWorks є найбільш багатofункціональним серед них. Цей програмний продукт дозволяє вирішувати складні геомеханічні задачі та працювати з властивостями матеріалів.

2.4 Інтенсивність напружень шаруватих порід слабометаморфізованих порід з використанням арочного металевого кріплення профілю СВП 27 для умов шахт Західного Донбасу

Модель шаруватого масиву побудована на основі даних геологічних досліджень шахт Західного Донбасу представлених у таблиці 2.1. У дослідженні обрано вугільний пласт на глибині видобутку 480 метрів.

Прикладене навантаження 12 МПа, розраховане за формулою:

$$\sigma = \gamma \cdot H, \text{ МПа}$$

де γ – щільність породи (в середньому 2500 кг/м³), H – глибина видобутку (480 метрів).

Геологічна потужність лави 1 метр. Основна покрівля пласта складається із піщаника (55%), аргіліту (25%) та алевроліту (20%). Безпосередня покрівля представлена шаруватим піщаником та горизонтально шаруватими глинистими породами із залишками обвуглених детритів ($f=0,7-1,8$). Безпосередня підшва представлена нестійким аргілітом.

Таблиця 2.1 – Усереднені фізико-механічні властивості гірських порід Західного Донбасу

Властивість	Найменування порід			
	Алевроліт	Аргіліт	Піщаник	Вугілля
Модуль пружності, МН/ м ²	1900	1950	2500	3600
Коефіцієнт Пуасона	0,25	0,21	0,26	0,25
Модуль зсуву, МН/ м ²	5800	5800	9500	1500
Масова щільність, кг/ м ³	2410	2410	2500	1240
Межа міцності на розтяг, МН/ м ²	3	2,8	5,6	5
Межа міцності на стиск, МН/ м ²	25	18,5	28	30

Для розуміння розподілу інтенсивності напружень навколо контуру виробки моделюємо шаруватий масив слабометаморфізованих порід з використанням арочного металевого кріплення зі сталі Ст.5 (СВП 27) показано на рисунку 2.1 [36 - 38].

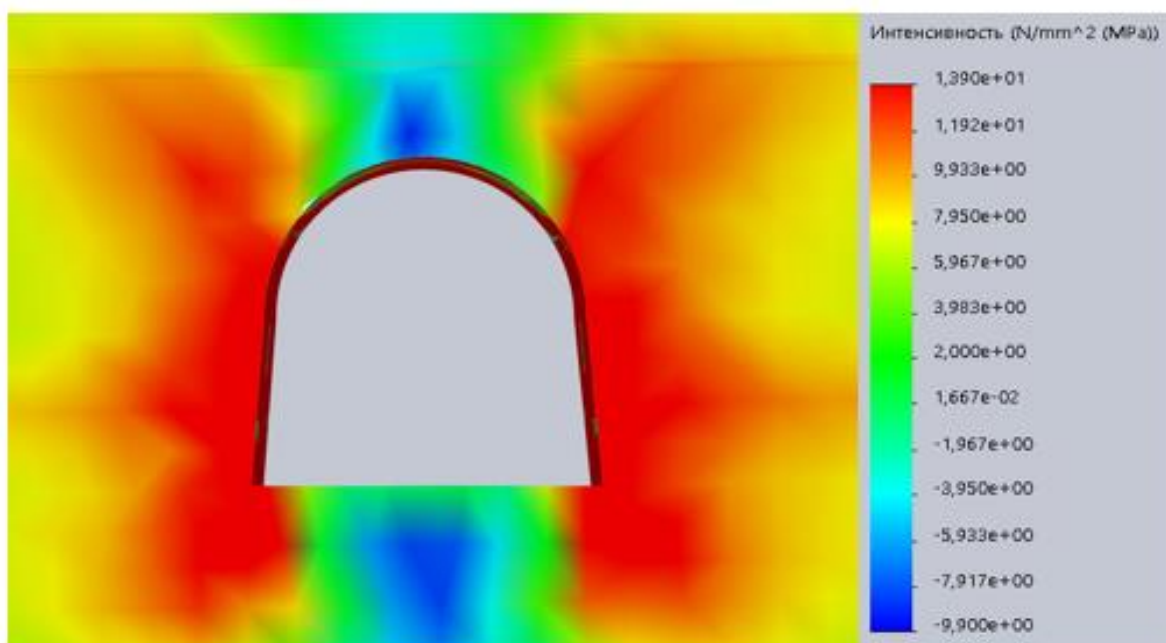


Рисунок 2.1 – Аналіз НДС кріплення СВП 27 за інтенсивністю

Руйнування покрівлі виникає внаслідок перерозподілу інтенсивності напружень на арочне металеве кріплення профілю СВП 27. Цей процес

пояснюється підвищеною деформаційністю м'яких порід над виробкою, що призводить до надмірного навантаження основної покрівлі. Тому важливо обмежувати розробку покрівлі над виробкою та переносити навантаження у глибину.

Аналогічний процес спостерігається у породах підшви, де концентрація тиску ще обмежена, але в зоні кріплення рами починають утворюватися осередки підвищених бокових навантажень. Верхняк та стояки рами максимально навантаженні та працюють на межі спрацювання ($\sigma \geq 260$ МПа), що показує не дієздатний стан даної системи кріплення у досліджуваних гірничо-геологічних умовах.

Аналіз епюри інтенсивності напружень показує, що кріплення зі сталі Ст.5 не ефективно розподіляє тиск по контуру виробки через велику інтенсивність напружень, отже, спостерігається зона нерівномірного розподілу гірського тиску, як у порода покрівлі, так і підшві призводить до нерівномірного розподілу гірського тиску при використанні металевих кріплення.

Таким чином, встановлена тенденція, що вказує на високу інтенсивність напружень навколо підготовчої виробки з металевим кріплення профілю СВІ 27.

Тому, наступним етапом цього дослідження буде детальний аналіз напружено-деформованого стану шаруватого масиву слабометаморфізованих порід для групи шахт Західного Донбасу з використанням різних видів арочних вуглепластичних кріплень для встановлення необхідних раціональних параметрів елементів кріплення.

Висновки до розділу 2

1. Для вирішення завдань дослідження обране комп'ютерне моделювання просторової системи «масив-кріплення» з врахуванням структури та фізико-механічних властивостей шаруватого масиву та елементів кріплення із вуглепластику та сталі для аналізу напружено-деформованого стану, що детально описує процеси навколо підготовчої виробки.

2. Аналіз моделювання геомеханічних процесів навколо очисних та підготовчих виробок, показав, що програмний продукт SolidWorks здатний з високою точністю, швидкістю та достовірністю вирішувати складні задачі геомеханіки за допомогою методу скінченних елементів.

3. Результати моделювання напружено-деформованого стану арочного металевого кріплення у шаруватому масиві слабометаморфізованих порід показали високу інтенсивність напружень навколо контуру виробки при спрацюванні елементів кріплення.

Перелік використаних у розділі 2 джерел

1. Qingsheng, Bai., Shihao, Tu., Fangtian, Wang., Cun, Zhang. (2017). Field and numerical investigations of gateroad system failure induced by hard roofs in a longwall top coal caving face. *International Journal of Coal Geology*. Volume 173, 15 March. 176-199. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.02.015> .
2. Fuzhou, Qi., Zhanguo, Ma., (2019). Investigation of the Roof Presplitting and Rock Mass Filling Approach on Controlling Large Deformations and Coal Bumps in Deep High-Stress Roadways. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(4), e190. 1-24. <http://doi.org/10.1590/1679-78255586> .
3. Wang, J., Cui, S., Cao, J. (2020). Interference analysis of equipment installation in 8.8 m super high mining workings. *Coal Eng.* 52, 33–37
4. Defu, Zhu., Yuhua, Wu., Zhenghe, Liu., Xiaoqiang, Dong., Jin, Yu. (2020). Failure mechanism and safety control strategy for laminated roof of wide-span roadway. *Engineering Failure Analysis* Volume 111, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104489>
5. Shvabiuk, V. (2016). *Resistance of materials* [Opir materialiv]. Kyiv: «Znannia». (in Ukrainian).
6. Hua, H., Liu, Z., Si, J. (2019). Research on comprehensive fire prevention and fire suppression technology for coal pillarless mining workings in Qidong coal mine of Wanbei Coal Power. *J. North China Inst. Sci. Technol*, 16, 7–11.
7. Zhou, X., Jiang, Y., Bai, G., Li, D., Hao, H. (2022). Experimental study on the parameters of spontaneous combustion characteristics of sulfur-containing anthracite coal affected by oxygen concentration. *Coal Sci. Technol*, 1–12. [CrossRef].
8. Zhou, X.; Niu, Y.; Bai, G. (2020). Experimental study on the effect of air supply on the parameters of lignite spontaneous combustion characteristics. *Min. Saf. Environ. Prot.*, 47, 31–35.
9. Kremenchutskiy, N.F., Mukha, O.A, Stolbchenko, Ye.V. (2011). Calculation of deadend mine working ventilation with usage of differential equations. *Naukovii visnyk natsionalnogo girnychogo universytetu*, 2, 136-139.

10. Pan, Y.; Zhou, P.; Yan, Y.; Agrawal, A.; Wang, Y. (2021). New insights into the methods for predicting ground surface roughness in the age of digitalization. *Precis. Eng.*, 67, 393–418. [CrossRef].
11. Biliaieva, V.V., Kirichenko, P.S., Gunko, E.Yu., Bondarenko, I.O., Mashykhina, P.B., Yakubovska, Z.M. (2019). Computer simulation of dead-end mine working ventilation. *Science and Transport Progress*, 5 (83), 16-25
12. Kurnia, J.C., Sasmito, A.P., Mujumdar, A.S. (2014). CFD Simulation of Methane Dispersion and Innovative Methane Management in Underground Mining Faces. *Applied Mathematical Modelling*
13. Abdiev, A.R. (2022). Evaluation of the stressed-strained state of rock massif for brown coal deposit in Kara-Keche. *Gornyi Zhurnal*, (10), 70-72.
14. 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>
15. Sultanov, M.G., Mataev, A.K., Kaumetova, D.S., Abdrashev, R.M., & Kuantay, A.S. (2020). Development of the choice of types of support parameters and technologies for their construction at the “Voskhod” field. *Vugillia*’, (10), 17-21. <https://doi.org/10.18796/00415790-2020-10-17-21>
16. Dychkovskiy, R., Shavarskiy, Ia., Saik, P., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., & Cabana, E. (2020). Research into stress-strain state of the rock mass condition in the process of the operation of double-unit longwalls. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 85-94. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.085>
17. Małkowski, P., Niedbalski, Z., Majcherczyk, T., & Bednarek, Ł. (2020). Underground monitoring as the best way of roadways support design validation in a long time period. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), 1-14. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.001>
18. Kuanyshbekovna, M.M., Krupnik, L., Koptileuovich, Y.K., Mukhtar, E., & Roza, A. (2016). The system is “roof bolting-mountain”. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(21), 10454-10457.

19. Sun, S., Li, S., Li, L., Shi, S., Wang, J., Hu, J., & Hu, C. (2018). Slope stability analysis and protection measures in bridge and tunnel engineering: a practical case study from Southwestern China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3305-3321. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1362-y>

20. Dinh, V.D., Do, N.A., Bruland, A., & Dias, D. (2020). Estimating the Radial Displacement on the Tunnel Boundary within Efficient Working Area of Rock Tunneling Quality Index (Q-System). *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*, 81-90. https://doi.org/10.1007/978-3-03060839-2_5

21. Kumar, S., & Pandey, H.K. (2021). Slope Stability Analysis Based on Rock Mass Rating, Geological Strength Index and Kinematic Analysis in Vindhyan Rock Formation. *Journal of the Geological Society of India*, 97(2), 145-150. <https://doi.org/10.1007/s12594-0211645-y>

22. Omarova, G., Baibatsha, A., & Abdykirova, G.Z. (2019). Flotation enrichment of enrichment factory tailings for use as technogenic ore. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 19(1), 195-202. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.1/s01.024>

23. *The Inf-Sup Condition and its Evaluation for Mixed Finite Element Methods*. (2001). *Computers & Structures*, Vol. 79, pp. 243-252.

24. Zhang, S.; Qin, Y.; Liu, W.; Gao, P. (2019). Model analysis and numerical simulation study of flow field and oxygen concentration field in mining area. *Coal Eng.*, 51, 104–108.

25. Shen, Y.; Zhang, J.; Wu, J.; Feng, P.; Shen, Y. (2021). Numerical simulation of fire source temperature distribution law in mining area under different wind speeds. *J. North China Univ. Technol. Nat. Sci. Ed.*, 43, 134–140

26. Yang, Z. (2017). Research on Multifield Coupled Three-Dimensional Dynamic Numerical Solution Model of Mining Area Based on Flow Pipe. *Ph.D. Thesis*, China University of Mining and Technology, Beijing, China.

27. Півняк, Г.Г., Шашенко, О.М., Сдвижкова, О.О., Бусигін, Б.С. (2009). Моделювання геотехнічних систем [Текст] /. – Д.: НГУ. – 247 с.

28. Si, J.; Cheng, G.; Zhu, J.; Chu, T. (2019). Three-dimensional modeling and application of permeability characteristics of non-homogeneous porous media in mining areas. *Coal Sci. Technol.*, 47, 220–224.

29. *Ansys Theoretical Manual*. [http:// www.cadfe.com](http://www.cadfe.com)

30. Сайт компанії розробника пакету *COMSOL Multiphysics*. <http://www.comsol.com>

31. Galiyev, D.A., Uteshov, E.T., & Tekenova, A.T. (2020). Digitalization of technological and organizational processes of mining operations due to the implementation of the installation system and accounting the key indicators. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 5(443), 47-53.

32. SOLIDWORKS. (2017). *SOLIDWORKS Flow Simulation*. [online]. Available at: <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.html>

33. Abdylдаev, E.K. (2011). The finite element method for solving applied problems, Almaty: *Polygraphy-service*: 111.

34. Abdylдаev, E.K. (2018) Models for estimating the stress state of the massif near the workings during combined mining weeds abstracts of the International scientific - practical conference "Actual problems of computer science, mechanics and robotics. *Digital technologies in mechanical engineering* Almaty: 21-22 [25].

35. Власов, С.Ф., Сидельников, А.А. (2012). *Просторове моделювання геомеханічних процесів при підземній розробці родовищ*. Монографія Дніпро, НГУ.

36. Wan, L.; Sun, M.; Zhao, J.; Cai, D.; Ma, S. (2022). Research on wind leakage pattern and prevention and control technology in complex mining area of close coal seam. *China Min. Ind.*, 31, 114–120.

37. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., Фомичов, В.В. (2006). *Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану дрібно-шарового породного масиву навколо пластової виробки*. Книга 1. Дограничне деформування системи «порода-кріплення» [Текст]: монографія - Дніпро: Системні технології - 172 с.

38. Симанович, Г.А. (1993). *Управління режимами взаємодії породного масиву із кріпленням гірничих виробок на основі регулювання її деформаційно-силових характеристик* [Текст]: дис. д-ра техн. наук - Дніпро: ІГТМ НАН України, 408 с.

39. 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>

40. Lozynskyi, V., Medianyky, V., Saik, P., Rysbekov, K., & Demydov, M. (2020). Multivariate solutions for designing new levels of coal mines. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 35(2), 23-32. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.2.3>

41. Kolumbetova, K.K. (2021). Relationship between rock deformation and the geophysical and fluid processes of the Earth's crust. *Vestnik KazNRTU*, 143(4), 31-40. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i4.05>

42. Kryshtanovych, M., Akimova, L., Akimov, O., Kubiniy, N., & Marhitich, V. (2021). Modeling the Process of Forming the Safety Potential of Engineering Enterprises. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 11(3), 223-230. <https://doi.org/10.18280/ijssse.110302>

43. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Poimanov, S., & Pochepov, V. (2020). Method for optimizing the protecting pillars parameters in underground coal mining. *E3S Web of Conferences*, (166), 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016602009>

44. Zhabko, A.V. (2020). The criterion of block media strength and geomechanical back-calculation. News of the Higher Institutions. *Mining Journal*, (6), 37-47. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-37-47>

45. Zubkov, A.V., & Sentiabov, S.V. (2020). New approaches to the assessment of stability of rock rock arrays. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 3(1), 68-77. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-68-77>

46. Arystan, I.D., Baizbaev, M.B., Mataev, A.K., Abdieva, L.M., & Bogzhanova, Z.K. (2020). Selection and justification of technology for fixing preparatory workings in

unstable massifs on the example of the mine “10 years of independence of Kazakhstan”. *Ugol'*, (06), 10-14. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-10-14>

47. Budi, G., Rao, K.N., & Mohanty, P. (2023). Field and numerical modelling on the stability of underground strata in longwall workings. *Energy Geoscience*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.07.003>

48. Xiong, Y., Kong, D., Wen, Z., Wu, G., & Liu, Q. (2022). Analysis of coal face stability of lower coal seam under repeated mining in close coal seams group. *Scientific Reports*, 12(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04410-5>

49. Wang, G., Ren, H., Zhao, G., Zhang, D., Wen, Z., Meng, L., & Gong, S. (2022). Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1), 24. <https://doi.org/10.1155/2022/6418082>

50. Huang, W., Liu, S., Gao, M., Hou, T., Wang, X., Zhao, T., & Xie, Z. (2022). Improvement of reinforcement performance and engineering application of small coal pillars arranged in double roadways. *Sustainability*, 15(1), 292. <https://doi.org/10.3390/su15010292>

51. Wu, Q., Liu, H., Dai, B., Cheng, L., Li, D., & Qin, P. (2023). Influence of base-angle bolt support parameters and different sections on overall stability of a roadway under a deeply buried high stress environment based on numerical simulation. *Sustainability*, 15(3), 2496. <https://doi.org/10.3390/su15032496>

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ ЗАЛЕЖНОСТІ ЗМІНИ ТИПУ КРІПЛЕННЯ ВІД ЗБІЛЬШЕННЯ ТИСКУ В УМОВАХ ШАХТ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

3.1 Аналіз характеристик гірничо-геологічних умов Західного Донбасу

Аналіз даних геологічних служб шахт Західного Донбасу показав, що вугільний басейн є підземною синклінальною структурою з складчастими ділянками, що складаються з докембрійських вулканічних та метаморфічних порід різних типів. Вугільні шари утворюють до 330 шарів і пластів, товщина яких коливається від 0,3 до 0,45 метра. Гірські породи складаються з аргілітів, алевролітів, піщаників, вапняків та вугілля, які накопичувалися в різних середовищах, таких як морські, континентальні та перехідні.

Запаси вугілля в басейні розташовані переважно в четвертинній формації, яку перекривають породи різних епох. Найбільш метаморфізоване вугілля виявлено у західній та північній частині поля. Основна покривальна порода складається з глин, мулу та піску з невеликими шарами вугілля. Шари порід мають слабкі зв'язки між собою. Збільшення глибини призводить до зниження механічної міцності порід через ущільнення. Дослідження також показали необхідність удосконалення системи кріплень для забезпечення безпеки та збереження виробок у складних умовах.

Поки що підтверджено, що гірничо-геологічні умови на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» практично однакові. Сформована гіпотеза вказує, що в складних гірничо-геологічних умовах ведення очисних та підготовчих робіт не скрізь однакові. Для кожної шахти є різні показники: глибина відпрацювання пластів, тектонічна порушеність шахтних полів, послідовність відпрацювання пластів, кількість води, що надходить у шахту, лави та інше.

Детальним дослідженням та аналізом гірничо-геологічних умов Західного Донбасу займалися такі установи: ІГТМ НАН України, Національний гірничий університет, Донецький науково-дослідний вугільний інститут, інститут «Дніпрогіпрошахт». Значний внесок у дослідження та написання геологічних звітів

шахтного об'єднання «Павлоградвугілля» внесено ВО «Укрвуглегеологія» на базі Дмитрієвської геологорозвідувальної експедиції, Павлоградської геологорозвідувальної експедиції, а також ДРГЕ «Донецька геологія».

Повне уявлення про стан порід отримано завдяки дослідженням підготовки шахтного поля Західного Донбасу [1], яким займались: О.А.Гайдай, В.В.Руських, Н.П.Уланова, Р.О.Дичковський та інші. Дослідниками вирішено складне технологічне рішення, яке дозволило видобувати вугілля більш повно на кінцевих частинах лави з отриманням додаткового економічного ефекту.

Значний внесок у дослідженні тонких вугільних пластів Донбасу із застосуванням селективної технології зроблений в роботі [2] Д.С. Малашкевича, Н.І.Деревягіної, В.О.Соцкова та О.О.Подвигіної. Тектонічна порушеність Донецького басейну, у тому числі й Західного Донбасу, а саме: закономірності утворення та розповсюдження малоамплітудних тектонічних порушень, методи їх прогнозу наведені й узагальнені в роботі В.Ф. Приходченко.

Є також широке дослідження присвячене визначенню фізико-механічних властивостей порід й вугілля. Значний внесок був зроблений Б.М. Усаченком та С.І. Скіпочкою. В.Т. Глушком та Г.Т. Кирничанським.

Вагомим внеском у дослідження гірничо-геологічного стану кожного шару в є аналіз [3], завдяки якому було вивчено велику різноманітність документації, а також геологічних звітів шахти «Павлоградвугілля» щодо первинної розвідки та переоцінки ресурсів кам'яного вугілля на їх родовищах. Було досліджено та проаналізовано близько 25 ідентичних показників для кожного пласта та шахти. Параметри були поділені на гірничо-геологічні та гірничо-технічні. До них входили показники припливу води в шахті ($m^3/год$), глибина залягання, вид порід перекриття, підшви за стійкістю та обрушенням, коефіцієнт міцності за Протод'яконовим (f), висота здимання підшви, наявність тектонічних пошкоджень у кожному шахтному полі, потужність піщанику в основній покрівлі, гіпсометрія, залягання, тріщинуватість порід, ступінь обвалення основної покрівлі,

відмінність літології порід та їх відсотковий вміст у покрівлі та підшві, а також категорія шахт по газу.

Для кожного шару проводилися дослідження показників, які потім об'єднувалися та узагальнювалися для всіх шарів у кожній шахті. Цей підхід дозволив отримати загальне уявлення про гірничо-геологічні умови на шахтах. Розв'язання цього завдання дало змогу вперше систематизувати геологічні умови на шахтах Західного Донбасу. Шахти були об'єднані в групи на основі подібності гірничо-геологічних умов та складності гірничих робіт. Ті шахти, де більшість з 15 показників були подібними або узгоджувалися, були об'єднані в групи. Після аналізу було виділено 2 групи шахт: 1-а група - шахта «Дніпровська», та 2-а група - шахти «Західно-Донбаська» та Імені Героїв Космосу.



Рисунок 3.1 – Групи шахт Західного Донбасу

Під час дослідження було виявлено, що прогини та гіпсометрія пластів шахт групи № 1 чітко виражені, що призводить до зміни підшви порід, тоді як у шахтах групи № 2 переважно слабогіпсометричні шари порід.

Таблиця 3.1 – Ступінь складності груп шахт Західного Донбасу за характерними геологічними та гірничотехнічними умовами [4]

Групи шахт Західного Донбасу	
Група №1	Група №2
(шахта «Дніпровська»)	(шахти: «Західно-Донбаська» та імені Героїв Космосу)
Складна	Вельми складна
1. Незначна глибина відпрацювання пластів (до 340 м).	1. Підвищена глибина відпрацювання пластів (до 580 м).
2. Майже немає здибання підшви у виїмкових штреках. При відходу лави від монтажної камери на 1000-1200 м здибання складає 0,3-0,7 м.	2. Сильне та інтенсивне здибання підшви у виїмкових штреках. При відходу лави від монтажної камери на 1000-1200 м здибання не менш 0,6-1,3 м.
3. Сильна тектонічна порушеність. Дрібно-амплітудні скиди перетнули до 65 % усіх стовпів.	3. Значна тектонічна порушеність шахтних полів. По шахтах дрібноамплітудні скиди перетнули 20-35 % усіх виїмкових стовпів.
4. Дуже потужний піщаник в основній покрівлі пластів (від 1,0 до 20,0-25,0 м).	4. Потужність піщанику в основній покрівлі пластів в основному 0,3-4,0 м, інколи до 13 м. Пісковик мало характерний в основній покрівлі (від 0 до 30 %, а частіше – 10 %).
5. Усі пласти хвилястої гіпсометрії залягання та з мульдами. Породи підшви у лавах схильні до розкисання.	5. Пласти в основному пологої гіпсометрії залягання та без мульд. Породи підшви у лавах не розкисають.
6. Притік води в середньому по шахтах 400 м ³ /год.	6. Притік води в середньому по шахтах 55 м ³ /год

Щодо метану, шахти групи № 2 є кращими, ніж шахти групи № 1, які відносяться до категорії III.

У групі № 2 спостерігаються зони підвищеного тиску гірських порід, що виникають через подрібнення порід у інші пласти, тоді як у шахтах групи № 1 таких зон майже немає.. Для кожної групи шахт було визначено ступінь складності гірничо-геологічних умов з точки зору їх впливу на характер видобутку. Тому були виділені групи, що характеризуються такими гірничо-геологічними умовами, а саме: 1) важкі та 2) дуже важкі умови в таблиці 3.1.

При аналізі ступеню складності гірничо-геологічних умов, були отримані деякі фактори, наприклад, тонкі пласти приурочені до вугільних пластів і прошарків вапняків та самородні корисні копалини у вугленосних товщах становлять 90 – 95 % від загальної кількості, а в деяких випадках переважають аргіліти та алевроліти, що досягають до 80 %. Вугілля та вуглисто-глинисті породи зазвичай становлять 0,5 – 2 % від загального обсягу свити.

Вугленосні відкладення Західного Донбасу узгоджуються із загальними закономірностями, але при розгляді будови вугленосного масиву в моделі першим питанням є розмір стратиграфічної колонки.

Перед процесом моделювання необхідно звернути увагу на покрівлю та склад порід поблизу і в межах розроблюваних вугільних родовищ обраних шахт. Ймовірність наявності одної або декількох літологічних різниць в основній покрівлі вугільного пласта непостійна і залежить від літотипу порід, що буде враховано при моделюванні структури.

Попередні дослідження напружено-деформованого стану свідчать про доцільність проведення розрахунків у двох варіантах будови вугільних пластів:

- простий шар, що має потужність 0,7, 1,0 і 1,2 метра;
- складна будова, що має постійну загальну потужність 1,0 м.

Документально підтверджено, що зв'язок між літологічними різницями у вугленосних товщах вважається слабким, особливо в Західному Донбасі. Гірничі роботи викликають порушення вихідного НДС масиву. Породини деформуються та переміщуються в вироблений простір в зоні гірничих робіт [5 - 11].

В результаті є висока ймовірність втрати зв'язку між літологічними різницями поблизу ділянок робіт та розвиток деформацій в шарах гірських порід.

Для досягнення цілей дослідження необхідно провести розрахунок математичної моделі для групи шахт: імені Героїв Космосу, «Дніпровська» та «Західно-Донбаська», де будуть встановлені раціональні параметри елементів кріплення та визначенні зони нерівномірного розподілу гірського тиску навколо виробки у трьох варіантах: без кріплення, з кріпленням профілю СВІ та з вуглепластичними кріпленнями різних профілей для порівняльного аналізу напружено-деформованого стану: шаруватого масиву, абочного вуглепластичного кріплення змінного та постійного перетину, в залежності від умов.

3.2 Дослідження та аналіз НДС системи кріплення із вуглепластику в умовах шахти імені Героїв Космосу

Модель шаруватого масиву побудована на основі даних геологічних досліджень шахти імені Героїв Космосу. У дослідженні обрано вугільний пласт С⁵ 501-ї лави. Геологічна потужність лави коливається від 0,6 до 1,62 метри. Основна покрівля пласта складається із піщаника (55%), аргіліту (25%) та алевроліту (20%). Безпосередня покрівля представлена шаруватим піщаником та горизонтально шаруватими глинистими породами із залишками обвуглених детритів ($f=0,7-1,8$). Безпосередня підшва представлена нестійким аргілітом.

Модель структури досліджуваного породного масиву навколо пласта С⁵ наведена на рисунку 3.2 та включає 10 породних шарів та вугільних пластів: 1 – алевроліт потужністю 3,92 м; 2 – вугільний прошарок потужністю 0,78 м; 3 – аргіліт потужністю 0,7 м; 4 – піщаник потужністю 18,4 м; 5 – алевроліт потужністю 4 м; 6 – вугільний пласт С⁵ потужністю 1,05 м; 7 – аргіліт потужністю 2,2 м; 8 – алевроліт потужністю 1,8 м; 9 – аргіліт потужністю 0,8 м; 10 – алевроліт потужністю 1,37 м.

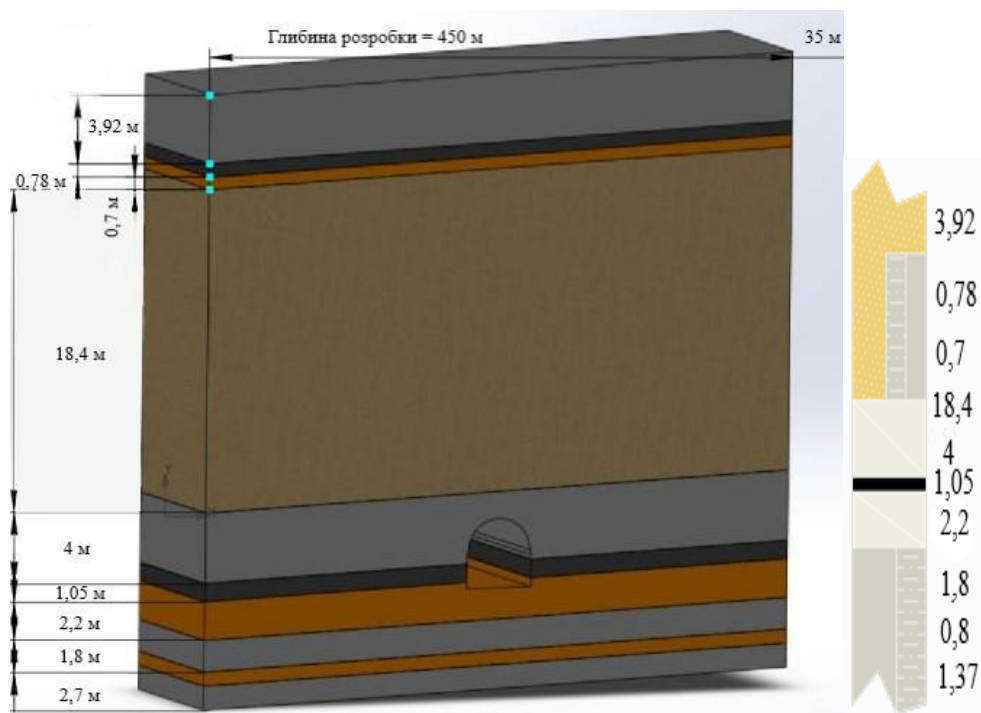


Рисунок 3.2 – Шаруватий гірський масив побудований за стратиграфічною колонкою для пласта С⁵ умовах шахти імені Героїв Космосу

Для отримання результатів аналізу напружено-деформованого стану та точного розрахунку моделі є прийнята висота та ширина породного масиву 35 метрів (по координаті X та Y, відповідно). Згідно з планом гірничих робіт глибина розташування 501-ої лави становить $H = 450$ м (по вугільному пласту С⁵). Граничним умовам для даної моделі та для наступних є прикладений тиск на верхній шар масиву, а на нижній геометричне фіксування моделі для точного відображення зон інтенсивності.

Прийнята висота та ширина моделі дозволили провести достовірний розрахунок напружено-деформованого стану шаруватого масиву у складних гірничо-геологічних умовах за допомогою програмного продукту SolidWorks. За даними з таблиці 3.2 був побудований досліджуваний шаруватий гірський масив та кріплення з вуглепластику у пружно-пластичній постановці задачі, яка найбільш точно та достовірно показала результат, який притаманний для умов шахт Західного Донбасу.

Таблиця 3.2 – Фізико-механічні властивості гірських порід

Властивість	Найменування порід			
	Алевроліт	Аргіліт	Піщаник	Вугілля
Модуль пружності, МН/ м ²	1970	2000	2500	3600
Коефіцієнт Пуасона	0,25	0,21	0,26	0,25
Модуль зсуву, МН/ м ²	6000	6000	9500	1500
Масова щільність, кг/ м ³	2510	2370	2600	1240
Межа міцності на розтяг, МН/ м ²	3	2,8	5,6	5
Межа міцності на стиск, МН/ м ²	25	18,5	28	30

Вимога досягнення максимальної адекватності моделювання геомеханічних процесів навколо виробки означає не лише створення реалістичної структури вуглевмісної товщі, але й точне відтворення системи кріплення для достовірного опису механічних властивостей кожного елемента. Особливу складність у моделюванні представляє відтворення реальної поведінки гірських порід на різних стадіях деформації, особливо важливо це для м'яких порід вугільних пластів Західного Донбасу.

Моделювання систем кріплення з вуглепластику ускладнюється необхідністю точного відтворення структурних характеристик елементів міцності, які мають набагато менші лінійні розміри, ніж середні розміри елементів вуглецевого волокна. Це потребує використання більш дрібної скінчено-елементної сітки і значно збільшує тривалість розрахунків, навіть при наявності потужної комп'ютерної техніки. У проведених дослідженнях досягнуто повного відтворення міцності системи кріплення в умовах, що визначені гірничо-геологічними параметрами.

Таким чином, визначивши фізико-механічні параметри елементів кріплення та обравши основні параметри для достовірного моделювання наступним кроком був розрахунок напружено-деформованого стану у декількох постановках задачі.

За допомогою комп'ютерного моделювання у програмному продукті SolidWorks нам вдалося досягти поставлених цілей дослідження завдяки

детальному моделюванню: шаруватого масиву, арочного кріплення зі сталі Ст.5 профілю СВП 27 та кріплень із вуглепластику круглого перерізу зі змінним та постійним перетином у відповідних гірничо-геологічних умовах. Для отримання коректного розподілу гірського тиску в умовах шахт Західного Донбасу (у нашому випадку, шахта імені Героїв Космосу) використовували пружну постановку задачі та враховували фізично-механічні властивості матеріалів та порід, умови видобутку, такі як робоча глибина, формування кута, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву, масова щільність, міцність на стиск і розтяг. Крім того, через складність розрахунків програми використовувалися спрощені розміри, а товщина моделі становила 10 метрів (10 000 мм). Кут падіння дорівнює 1° .

Головним етапом дисертаційного дослідження був аналіз напружено-деформованого стану масиву по вертикальним та горизонтальним напруженням, а також його інтенсивності.

Як і раніше, проблема визначення поведінки гірського тиску не втратила своєї актуальності, що підтверджується багатьма сучасними дослідженнями геомеханічних процесів навколо виробки.

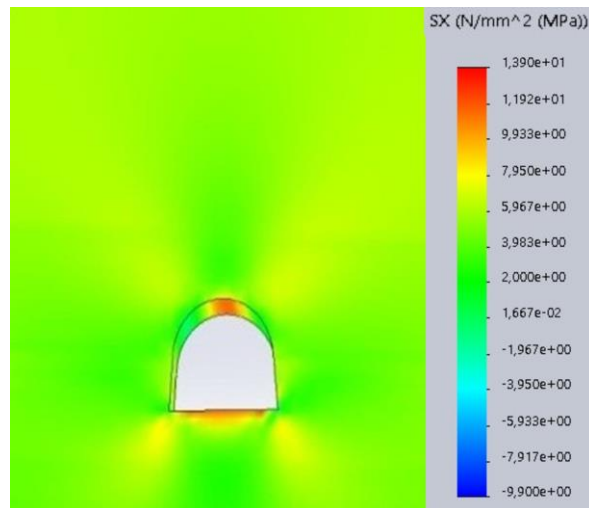
Прикладене навантаження 11,75 МПа, розраховане за формулою:

$$\sigma_y = \gamma \cdot H, \text{ МПа} \quad (3.1)$$

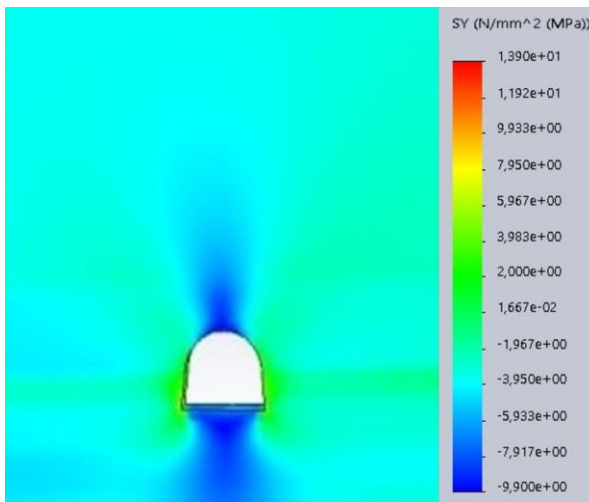
де γ – щільність породи (в середньому 2500 кг/м^3), H – глибина видобутку (450 метрів).

Аналіз напружено-деформованого стану гірського масиву порід навколо підготовчої виробки (рис. 3.3) на глибині 450 метрів показує, що діапазон горизонтальних та вертикальних напружень варіюється від 2,8 до 13,9 МПа.

а)



б)



в)

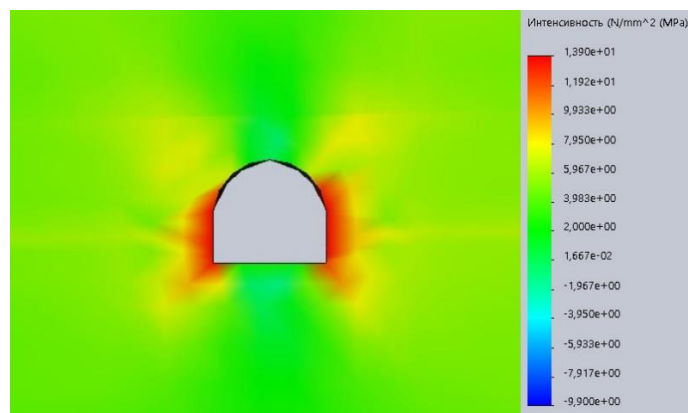


Рисунок 3.3 – Аналіз НДС за горизонтальними (а), вертикальними (б) та за інтенсивністю напружень (в)

З точки зору горизонтального напруження загальний стан масиву відзначається напруженнями на розтяг $+1,15$ МПа та стиск $-2,9$ МПа. Також спостерігається зона стиску, яка має висоту близько 8 метрів і ширину 20 метрів, що є характерною для цих умов

У середній частині покрівлі спостерігається область шириною близько 2,7 метра і висотою 0,9 метра під впливом вертикальних напружень на розтяг. На кожен метр припадає навантаження приблизно 36 кН, що не призводить до втрати стійкості верхньої частини опори рами.

Під час аналізу покрівлі виявлені напруження на розтяг від $+1,15$ до $-9,5$ МПа, що створює ослаблену зону, яка містить руйнівні породи, такі як піщаник, аргіліт та алевроліт. Розподіл вертикальних напружень масиву є рівномірним (від $+3,5$ до $+4,5$ МПа), а напруження на стиск лише у вугільному пласті та вугільному пропластку становить близько $-9,9$ МПа.

Аналіз інтенсивності напружень показує, що отримані значення напружень відповідають геостатичним умовам у масиві. В умовах шахт Західного Донбасу спостерігається здимання підосви в нижній частині робочої зони. Напруження на розтяг створює зону слабкості знизу через меншу стійкість гірської породи до розтягу. Бокове навантаження для вугільного шару дорівнює $-1,65$ МПа.

Результати моделювання показують нерівномірний розподіл гірського тиску навколо виробки в заданих умовах.

Наступним кроком моделювання є використання вуглепластичного арочного кріплення постійного перерізу круглого перетину. За основу, при дослідженні була використана модель арочного кріплення, розроблена Бондаренко В.І, Ковалевська І.А, Цівка Є.С та Шека І.В (патент на корисну модель № 148395, зображений на рисунку 3.4).

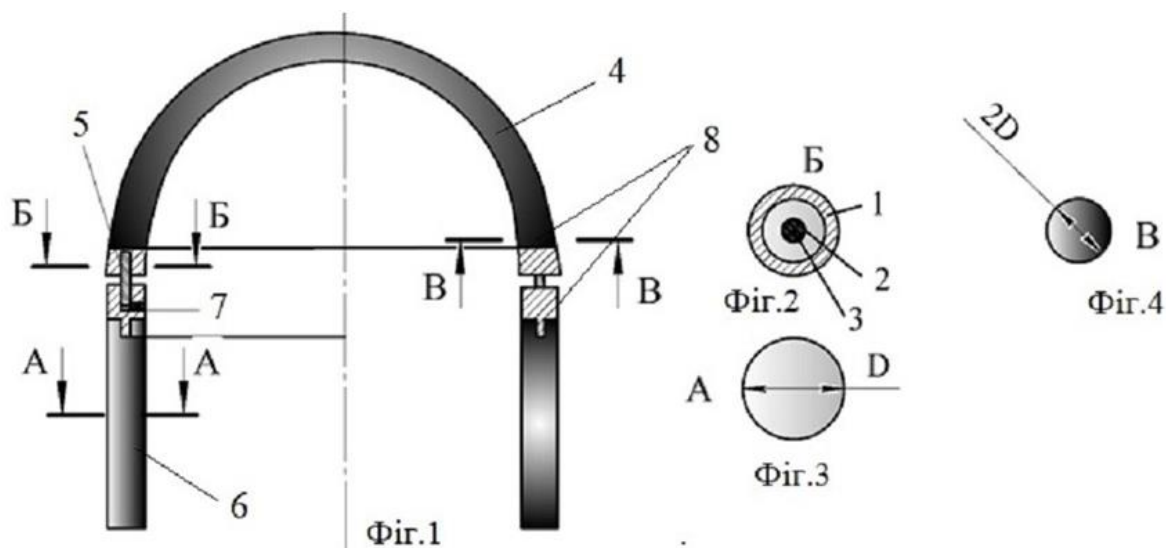


Рисунок 3.4 – Вуглепластичне арочне кріплення постійного перерізу: 1 – Сталь Ст.5, 2 – вуглепластик, 3 – пластиковий матеріал, 4 – арка постійного перерізу, 5 – металевий стрижневий поршень, 6 – стояк постійного перерізу, 7 – отвір для парафіну, 8 – податливий вузол

Конструкція кріплення з вуглепластику складається з верхняка, який з'єднаний зі стояком такого ж профілю за допомогою піддатливих вузлів у вигляді стрижнів та циліндра, заповненого пластичним матеріалом. Цей циліндр може переміщати верхняк рами по вертикалі та демпфувати.

Структурна гнучкість стає помітною в складних гірничо-геологічних умовах. Верхняк рами, де встановлені металеві стрижні, починає прогинатися, після чого кріплення починає працювати, і парафін починає витікати через отвір. Кріплення переходить у податливий режим при значних навантаженнях.

При аналізі взаємодії шаруватого масиву та вуглепластичного кріплення виявлено діапазон напружень від $-9,9$ МПа при стиску до $+13,9$ МПа при розтягу.

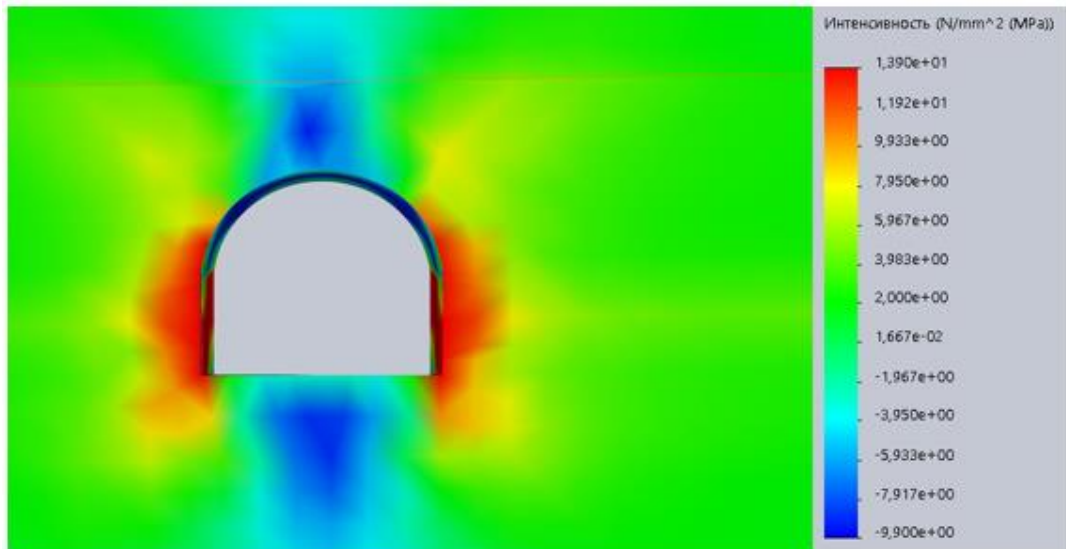


Рисунок 3.5 – Епюра інтенсивності напружень σ у шаруватому породному масиві навколо виробки із використанням вуглепластичного арочного кріплення постійного перерізу

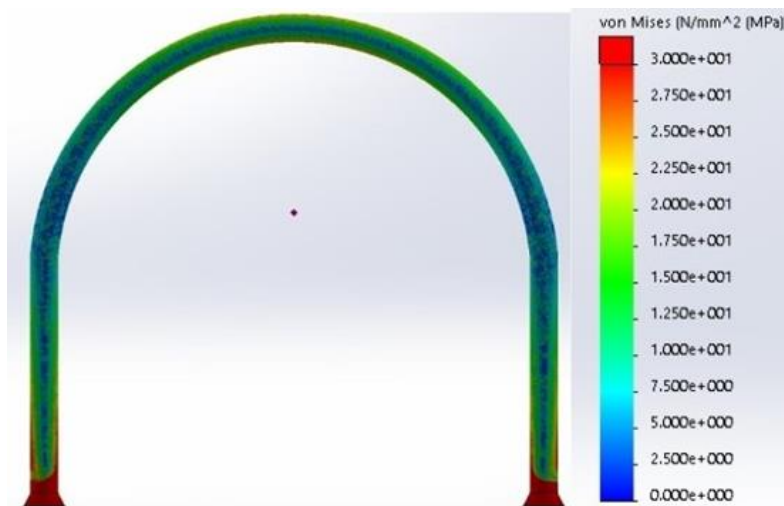
Аналіз діаграми інтенсивності напружень (рис. 3.5) показав ряд змін у стані навколишніх порід. У покрівлі спостерігається зона розвантаження, яка має схожу форму та розміри з базовою схемою кріплення. Цей факт виявлено через те, що зазвичай у безпосередній покрівлі над виробкою утворюється зона розвантаження, де знижене напруження виникає через прогин породного шару у виробку з горизонтальними зрушеннями.

У бокових породах з спостерігалася ще одна особливість - зниження напружень у порівнянні з базовим варіантом кріплення. Концентрація σ становила 0,8 - 0,9 на ширину до 2,1 метри. У слабких породах безпосередньої покрівлі така концентрація може спричинити розпушення та інтенсифікацію процесу здимання.

У слабких породах підосви спостерігається зона розвантаження, яка може поширитися до глибини 4 метрів. У кутових частинах виробки діють руйнівні напруження у великих зонах порід підосви, що сприяє переміщенню порід у зону розвантаження та виробку. Прогнозується інтенсивне здимання порід підосви через низьку міцність порід покрівлі. Розміри зон розпушення у підосві помітно менше, ніж при базовому варіанті кріплення, через низький опорний тиск у боках виїмкової виробки.

При аналізі напружень по Мізесу (рис. 3.6) для вуглепластичних кріплень встановлено їх діапазон від 0 до +300 МПа. У верхняку спостерігалися напруження від 20 до 50 МПа, з найбільшими значеннями у п'ятах стояків, що є нормальним для цього типу кріплення. Діапазон напружень гнучких з'єднань становив від 5 до 15 МПа, що пов'язано з новою технологією гнучкого кріплення.

а)



б)

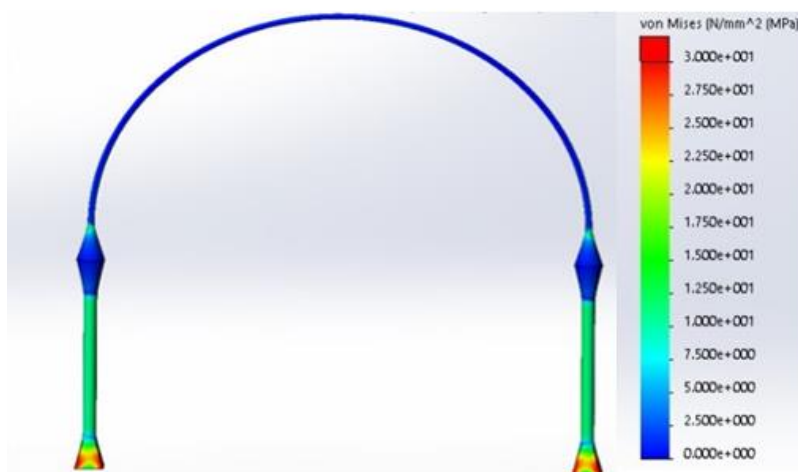


Рисунок 3.6 – Епюра інтенсивності напружень σ для вуглепластичного арочного кріплення постійного (а) та змінного (б) перерізу

При аналізі стану арочних металевих кріплень у реальних умовах спостерігається розвантажений стан у верхняку, при дії високих навантажень на

стояки в умовах шахт Західного Донбасу. Проте ступінь розвантаження верхньої частини при використанні комбінованої анкерної системи суттєво відрізняється від базового варіанту кріплення. Периферійна ділянка верхньої частини в районі замків податливості характеризувалася найменшою напруженістю (20-25 МПа), що є нормальним для їх роботи. У базовому варіанті кріплення на кінцевій ділянці верхньої частини з боку виробленого простору інтенсивність напружень зростала до 47-93 МПа, що багаторазово перевищувало опорний тиск.

Стосовно стояків з боку виробленого простору, інтенсивність напружень наближалася до розрахункової межі плинності сталі СВП, але не перевищувала її. Розподіл інтенсивності напружень по поперечному перерізу був нерівномірним, свідчить про момент вигину. У замках на недоторканому боці масиву інтенсивність напружень перевищувала розрахункову межу плинності сталі СВП, але діяла лише на опорну зону на певній висоті від підшви. У базовому варіанті кріплення такий момент вигину був по всій довжині рами. Таким чином, навантаження на систему кріплення було підвищеним у базовому варіанті, але знизилось при використанні вуглепластичного кріплення.

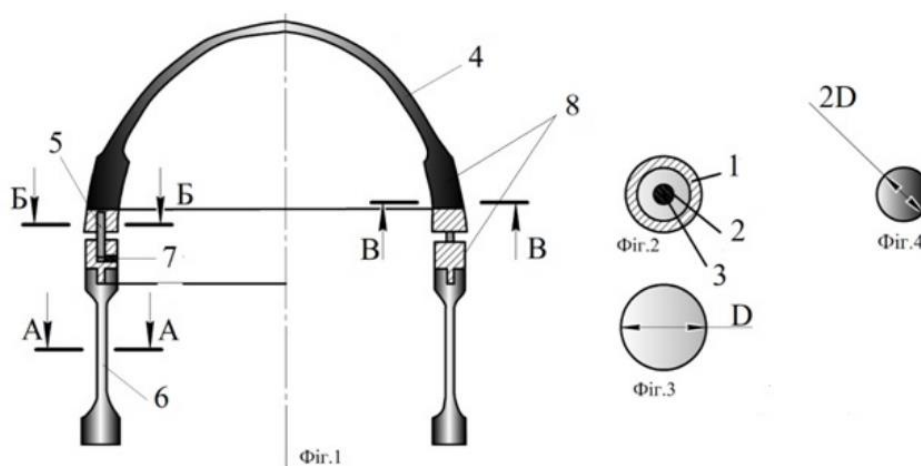


Рисунок 3.7 – Вуглепластичне арочне кріплення змінного перерізу: 1 – Сталь Ст.5, 2 – вуглепластик, 3 – пластиковий матеріал, 4 – верхняк змінного перерізу, 5 – металевий стрижневий поршень, 6 – стояк змінного перерізу, 7 – отвір для парафіну, 8 – податливий вузол

Таким чином, слід зазначити підвищене навантаження стояків та замків кріплення рами в базовому варіанті та недостатній розподіл тиску в арочному вуглепластичному кріпленні постійного перерізу.

Для дослідження була взята модель, розроблена Бондаренко В.І, Ковалевська І.А, Цівка Є.С та Шека І.В (патент на корисну модель № 148329, зображений на рисунку 3.7).

Розроблена модель арочного вуглепластичного кріплення круглого перерізу змінного перетину (рис. 3.7), призначена для реалізації зниження інтенсивності нерівномірного розподілу гірського тиску навколо виробки. Це досягається тим, що в розробленій конструкції верхняк та стояки з гнучкими вузлами виготовлені з круглого поперечного перерізу змінного поперечного перерізу та замки податливості аналогічні у розробці № 148395.

Представлена на рисунку модель забезпечує стійкість гірничих виробок за рахунок зменшення інтенсивності напружень по контуру кріплення та підвищує несучу здатність конструкції за рахунок значно змінного перетину. Спеціальні профілі зменшуються в 5-6 разів, що призводить до зниження трудомісткості робіт та підвищення безпеки праці шахтарів.

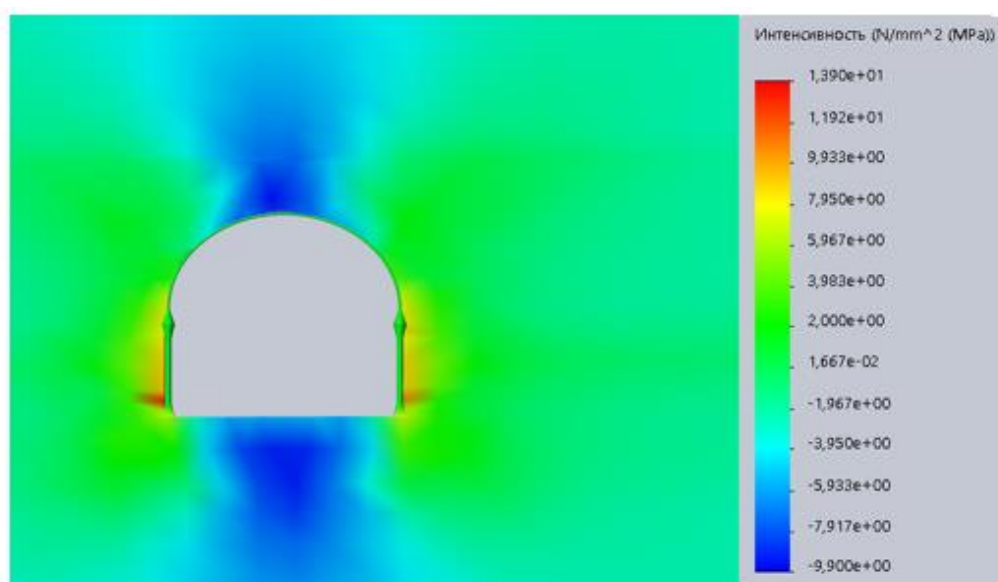


Рисунок 3.8 – Епюра інтенсивності напружень σ у шаруватому породному масиві навколо виробки із використанням вуглепластичного арочного кріплення змінного перерізу

При аналізі епюри інтенсивності напружень навколо виробки з використанням вуглепластичного арочного кріплення змінного перетину (рис. 3.8) були виявлені зміни у стані прилеглих порід у порівнянні з попередніми дослідженнями, а саме у покрівлі спостерігалась зона розвантаження, схожа на базову схему кріплення змінного перетину як за формою, так і розмірами. Локальна зона з величиною напруження була помітна з боку виробленого простору, відповідно недоторканому масиву. У центральній частині зводу у породах виникла зона з концентрацією напружень, меншою, ніж при кріпленні постійного перетину. В прилеглих бокових породах концентрація напружень була нижче опору стиску породи безпосередньої покрівлі та вугільного пласта.

У слабких породах підшви спостерігалась зона розвантаження, що поширилась на значну глибину. Інтенсивність напружень для цього типу кріплення коливалася в широкому діапазоні, але критичні значення не досягались.

У прилеглих бічних породах концентрація σ становила 0,4 - 0,7 на ширину в масив до 1,2 метри, яка багаторазово менше опору стиску, як порід безпосередньої покрівлі, так і вугільного пласта.

У слабких породах підшви утворилась зона розвантаження, що поширилась на глибину до 2,7 метри. В кутах виробки діяли руйнівні напруження. Спостерігалось менш інтенсивне здимання порід підшви підготовчої виробки, ніж у кріплення з постійним перерізом.

Для стояків змінного перерізу максимальна концентрація напружень припадає на п'яту з тиском від 58 до 97 МПа, що відповідає попереднім дослідженням цього типу кріплення. Звертаючи увагу, на замки податливості (від 16 до 25 МПа), незважаючи на діючі на них найвищих напруження, вони не порушились та повноцінно виконували свою роботу. Тобто, незважаючи на те, що поперечний переріз кріплення був змінений з постійного на змінний, це свідчить про те, що навіть при таких структурних відмінностях кріплення все ще функціонує.

Узагальнюючи характеристики розподілу інтенсивності напружень у масиві гірських порід, сформовано нову закономірність (рис. 3.9) для нового арочного вуглепластичного кріплення для системи підтримки виробки.

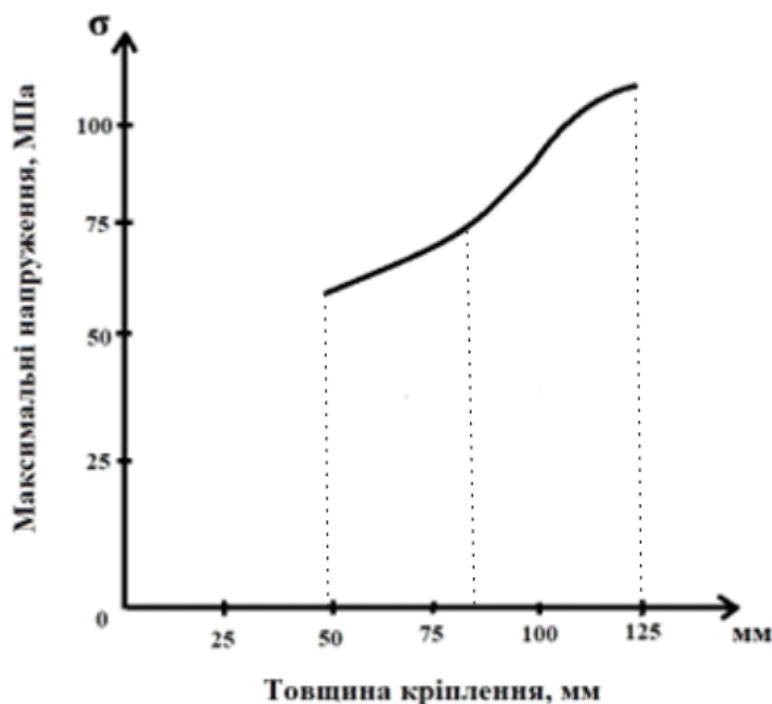


Рисунок 3.9 – Закономірність розподілу інтенсивності напружень для умов шахти імені Героїв Космосу

Отже, отримані результати моделювання НДС шаруватого масиву та різних видів кріплень можуть бути застосовані для обґрунтування технологічних заходів щодо моніторингу та виявлення зон нерівномірного розподілу тиску поблизу підготовчої виробки для підбору правильного виду кріплення від якого залежатиме стійкість виробки та безперервність процесу видобутку вугілля в Західному Донбасі. Також, у подальшому це дозволить розробити способи попередження та ліквідації аварійного стану механізованого кріплення в лавах за умов високого гірського тиску.

3.3 Дослідження та аналіз НДС системи кріплення із вуглепластику в умовах шахти «Дніпровська»

Шахта «Дніпровська» розташована у південно-західній частині Дніпровсько-Донецької западини в Східно-Павлоградському вугільному районі Західного Донбасу. Геологія в межах шахтного поля складна і включає декілька різних шарів осадових порід. Особливу увагу привертають смужчасті залозисті утворення, які чергуються з шарами мінералів, багатих залізом і кремнеземом, і надають важливу інформацію про геологічну історію цього родовища. Наявність таких утворень свідчить про колишнє покриття цієї території мілководним морем, де протягом мільйонів років накопичувалися багаті залізом мінерали. Крім смужчастих залізних утворень, геологія шахти включає розломи, тріщини та магматичні інтрузії, які можуть вплинути на стабільність шахти. Для аналізу геології шахти «Дніпровська» можна використовувати різні методи, такі як геологічне картування для створення докладних карт гірських порід та геофізичні дослідження для визначення розташування корисних копалин і інших геологічних особливостей. Загалом, геологія цієї шахти складна і включає безліч різних порід і особливостей, які важливо враховувати для забезпечення безпечної та ефективної роботи шахти. Довжина шахтного поля становить 10,4 км, а ширина – 3 км. Технічними межами шахти є: на заході спільна межа з шахтою «Західно-Донбаська», шлях по свердловинах № 3269, 3273 та додаткове падіння пластів по свердловинах № 12585 і 12596. Основними компонентами тектоніки, що вносять вклад у структуру шахтного поля, є великі поздовжні та Богданівські скиди, а також їх апофізи – скиди «В» і «Б». Поздовжні відвали функціонують як природна перешкода на південь від шахтного поля. Вона простежується на значній площі і в південно-західній частині поля примикає до великого Богданівського скиду. Довжина скиду південно - східна, зниження довжини південно - західне під кутом 60-70°. Максимальні та мінімальні вертикальні зрушення амплітуди порід становлять 50 - 170 метрів [12].

Основні показники (табл. 3.3) дали можливість звернути увагу на ту ділянку розробки корисних копалин, де відбувається високий темп вуглевидобутку та лава обладнана високотехнологічним обладнанням.

Таблиця 3.3 – Техніко-економічні показники роботи шахти «Дніпровська»

Показник	Од.виміру	Значення
Потужність шахти	тис.т / рік	1200
Кількість очисних вибоїв	лава	4
Навантаження на очисний вибій	т/доб.	760
Собівартість вугілля	грн/т	614,18

Пласти, розташовані на меншій глибині, мають меншу потужність (0,72 - 0,76 м) і знаходяться в зоні тектонічного порушення шириною від 0,2 до 5,6 м. Ця зона ускладнює видобуток вугілля. Умови для гірничо-геологічних досліджень цієї шахти та гірничих робіт вимагають особливого підходу і обсягу ремонтних робіт, що впливає на виробництво. У зв'язку з цим виникає необхідність збільшення кількості очисних лав на пластах c_e^8 і c_n^8 , лава, призначена для видобутку, повинна мати високопродуктивні очисні вибої, що забезпечують максимально можливе навантаження на очисну виробку.

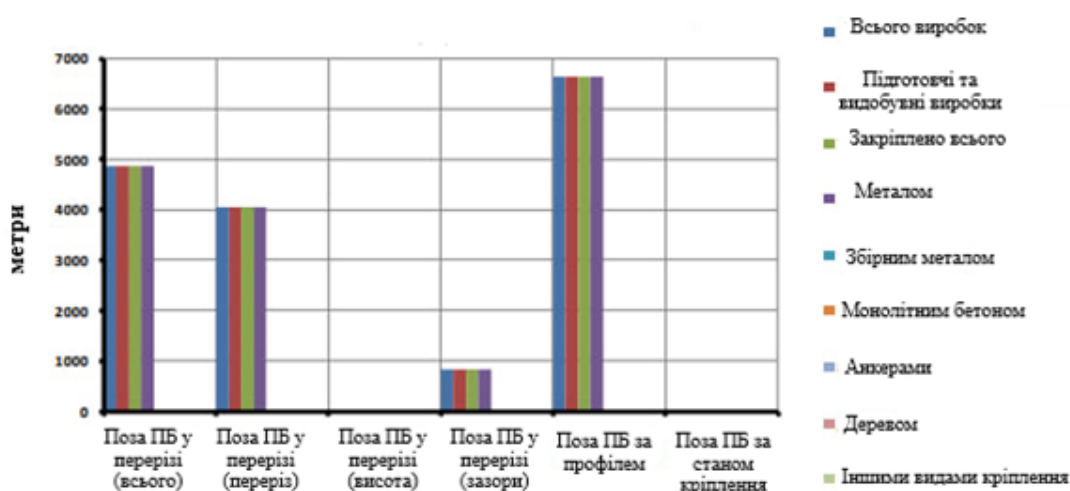


Рисунок 3.10 – Протяжність виробок, які не відповідають правилам безпеки (за типом кріплення) [11]

Основні проблеми з дотриманням правил безпеки спостерігаються у виробках, які закріплені металом.

У середньому у 12,6% всіх підготовчих виробок, які експлуатуються на шахті закріплені металом, виявляються відхилення за профілем, у 5,8% - за перерізом (включаючи 3,5% - від зменшення перерізу; 0,38% - від втрати висоти виробки; 1,9% - від невиконаних зазорів), що повністю узгоджується з даними, які були проаналізовані раніше.

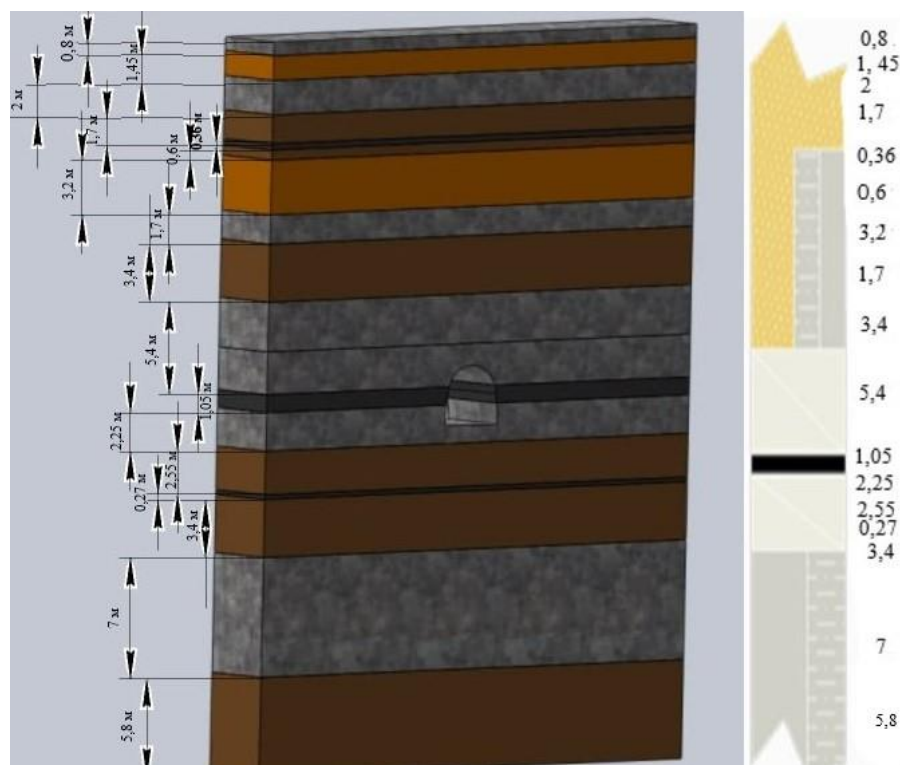


Рисунок 3.11 – Шаруватий гірський масив побудований за стратиграфічною колонкою для пласта c^5 умовах шахти «Дніпровська»

Для дослідження був обраний пласт c^5 на глибині 400 метрів побудований згідно стратиграфічної колонки та представлений на рисунку 3.11. Вона включає 18 породних шарів: 1 – аргіліт потужністю 0,8 м; 2 – піщаник потужністю 1,45 м; 3 – аргіліт потужністю 2 м; 4 – алевроліт потужністю 1,7 м; 5 – вугільний прошарок потужністю 0,36 м; 6 – алевроліт потужністю 0,6 м; 7 – піщаник потужністю 3,2 м; 8 – аргіліт потужністю 1,7 м; 9 – алевроліт потужністю 3,4 м; 10 – аргіліт

потужністю 2,9 м, 11 – аргіліт потужністю 2,5 м, 12 – вугільний пласт потужністю 1,05 м, 13 – аргіліт потужністю 2,25 м, 14 – алевроліт потужністю 2,55 м, 15 – вугільний прошарок потужністю 0,27 м, 16 – алевроліт потужністю 3,4 м, 17 – аргіліт потужністю 7 м, 18 – алевроліт потужністю 5,8 м.

Прийнята висота та ширина моделі 20 метрів, а товщина моделі 5 метрів. Кут падіння - 1°. Глибина, на якій проводиться моделювання – 400 метрів.

Таблиця 3.4 – Фізико-механічні властивості гірських порід в умовах шахти «Дніпровська»

Властивість	Найменування порід			
	Алевроліт	Аргіліт	Піщаник	Вугілля
Модуль пружності, МН / м ²	2060	2170	2400	3600
Коефіцієнт Пуассона	0,25	0,21	0,26	0,25
Модуль зсуву, МН / м ²	6030	6120	9600	1480
Масова щільність, кг/ м ³	2400	2240	2730	1340
Межа міцності на розтяг, МН / м ²	3	2,8	5,6	5
Межа міцності на стиск, МН/ м ²	24	17,5	28	30

При цьому виді дослідження були використані наступні механічні властивості: модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву, масова щільність, межа міцності при розтягу та стиску.

Діапазон коливань вертикальних та горизонтальних напружень (рис.3.12) у гірському масиві становить 0 до +20,00 МПа. Цей розподіл є характерним для умов шахт Західного Донбасу. Зона впливу цих напружень значно перевищує площу моделі.

Для вертикальних напружень значення коливаються від -9 МПа на стиск до +2 МПа на розтяг. У кожному випадку моделювання обирається оптимальний діапазон значень для найефективнішого відображення напруженого стану.

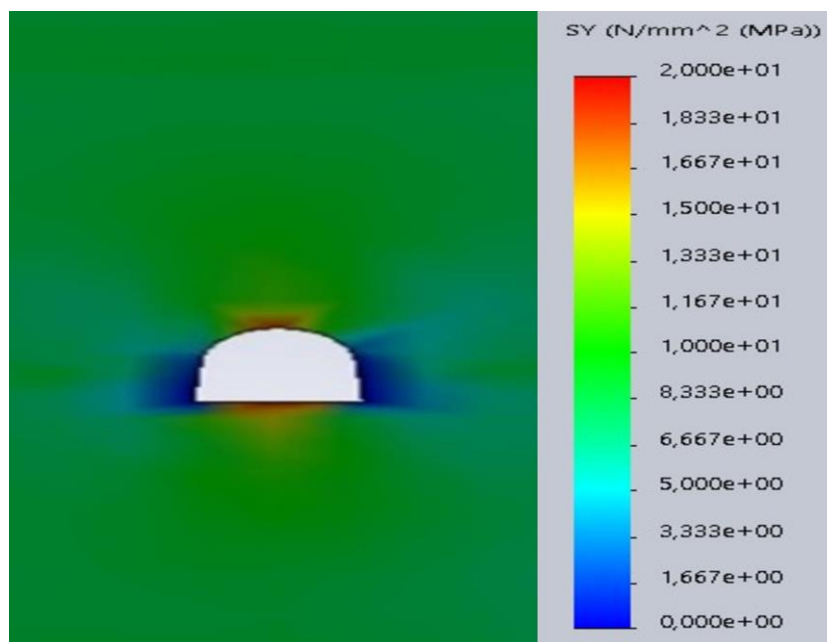
У нижній частині моделі, ширина зони вертикальних напружень становить приблизно 2,7 метра, а глибина - 1,5 метра. Напруження на розтяг спостерігаються

у верхній частині виробки, тоді як напруження на стиск - у середині пласта. Розміри цих напружень приблизно 1,5 метра у ширину і 1,5 метра у висоту.

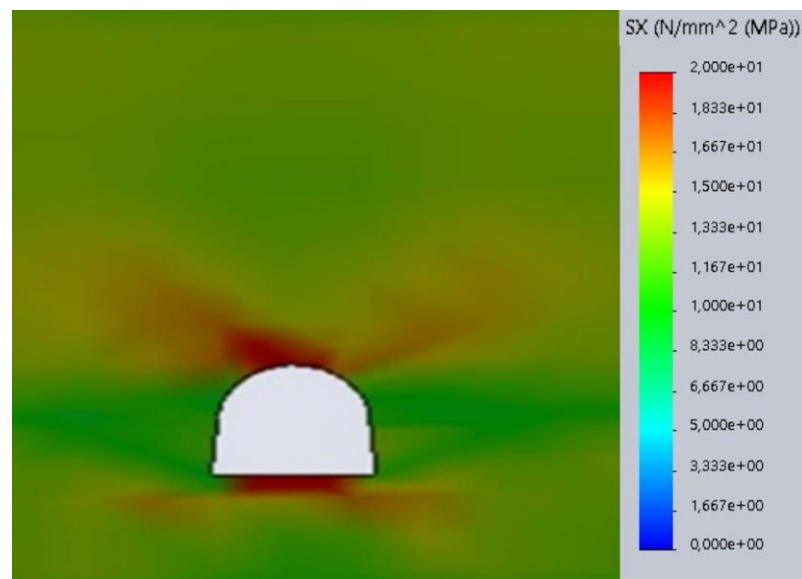
При горизонтальних напруженнях після проходження виробки виникають напруження на стиск -1 МПа, а ближче до підшви - напруження на розтяг до +1 МПа. У стінах виробки спостерігається тиск для зони напружень стиску з розмірами 4,8 м по висоті і 2,7 м по ширині.

Зона ослаблення знаходиться у нижній частині робочої зони, враховуючи ступінь руйнування. Концентровані напруження на розтяг більш помітні в правому куті виробки, де ця частина правого кута має розміри приблизно 2,2 метра у ширину і 2,1 метра у глибину. У основі виробки є зона послаблення з обох сторін, з площею 5,5 м по ширині і 3,2 м по глибині з діапазоном розтягу від +0,79 до +1,42 МПа [11 - 12].

a)



б)



в)

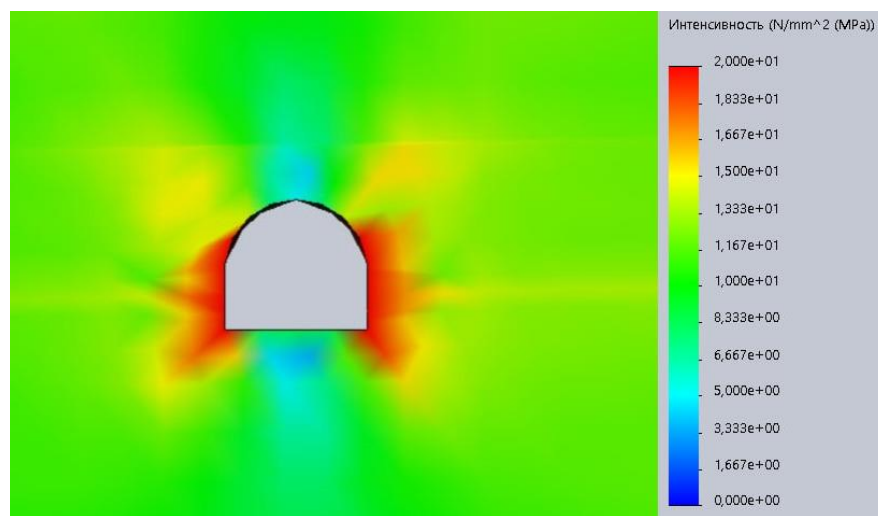


Рисунок 3.12 – Аналіз НДС масиву за вертикальним (а) та горизонтальними та інтенсивністю (в)

Верхні та нижні шари вугільного пласта, які складаються з прошарків вапняку з коефіцієнтом Пуассона 0,21, також демонструють опір стінок виробки на стиск.

При аналізі безпосередньої покрівлі можна помітити напруження на розтяг. У середній частині це напруження коливається від 2,0 до 2,5 МПа. Цілісність покрівлі може пошкодитися на ділянці шириною близько 1,8 метра та висотою приблизно 1 метр. З урахуванням бокових частин покрівлі виникають додаткові напруження, які орієнтовані перпендикулярно до скату покрівлі і становлять від 0,75 до 1,5 МПа. Ураховуючи руйнівність порід Західного Донбасу, які не витримують тиск, утворюються зони слабкості висотою близько 3,5 метра та шириною 2 метри по обидва боки виробки.

Коефіцієнт якості вказує на розподіл параметрів напружень та деформації навколо виробки, що подібно існуючим концепціям деформаційних процесів у гірському масиві навколо виробки. Отримані результати узгоджуються з численними дослідженнями у галузі геомеханіки, що підтверджує схожість запропонованої моделі з умовами експлуатації підземних виробок у Західному Донбасі [13 - 16].

Підтвердженням ефективності використання запропонованого арочного вуглепластичного кріплення є ретельний аналіз та вивчення напружено-деформованого стану в складних умовах. Ключовим фактором для адекватного аналізу є розподіл інтенсивності напружень σ у визначених умовах.

При розрахунку напружено-деформованого стану вуглепластичного кріплення постійного перерізу інтенсивність напружень була прийнята на рівні 300 МПа. Рівень напружень показав декілька змін при застосуванні цього виду кріплення. Зона розвантаження розташована у покрівлі, яка схожа за розмірами на базову.

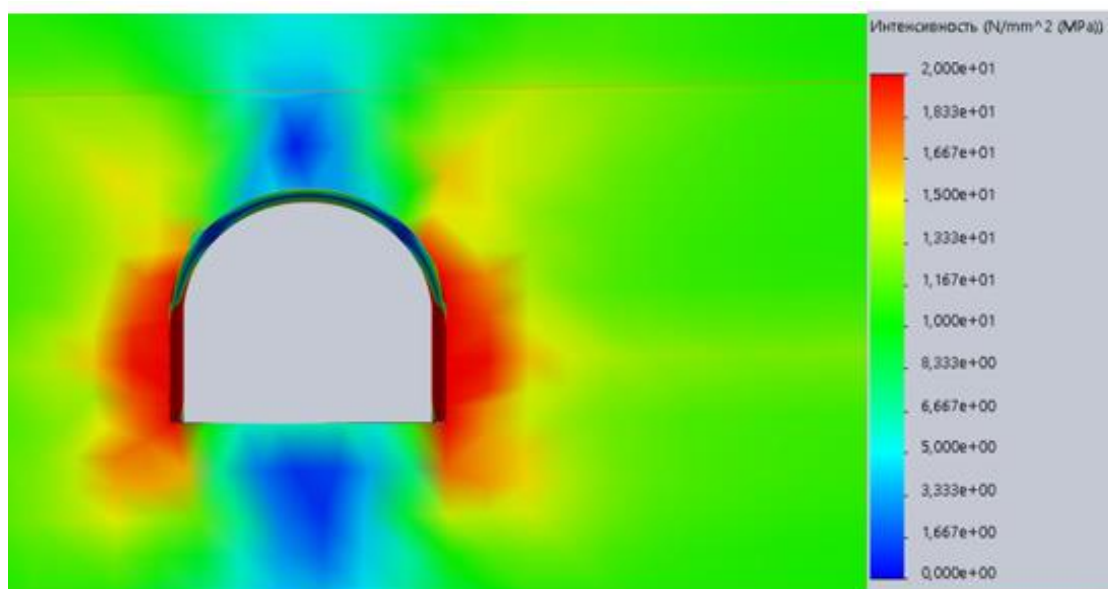
Було проведено різноманітні обчислювальні експерименти, але неможливо вмістити всі отримані результати у рамках одного дослідження. Тому був обраний один з варіантів арочного вуглепластичного кріплення для порівняння з традиційною системою кріплення.

Результати порівняльного аналізу щодо розподілу трьох основних компонентів напружень у масиві та системі кріплення показали, що особливості епюри розподілу інтенсивності напружень σ мають вирішальне значення як

узагальнююча характеристика напруженого стану будь-якого гірничотехнічного об'єкту.

Аналіз епюри інтенсивності напружень (рис. 3.13) навколо виробки при використанні арочного вуглепластичного кріплення показав ряд змін порівняно з базовим методом. У покрівлі виїмкового штрека утворилася зона розвантаження σ , яка відрізняється за формою та розмірами від базової схеми кріплення. Наприклад, розвантаження практично не впливає на породу безпосередньої покрівлі, тоді як з іншого боку утворюється локальна зона з величиною σ , що вказує на стан незайманого масиву.

а)



б)

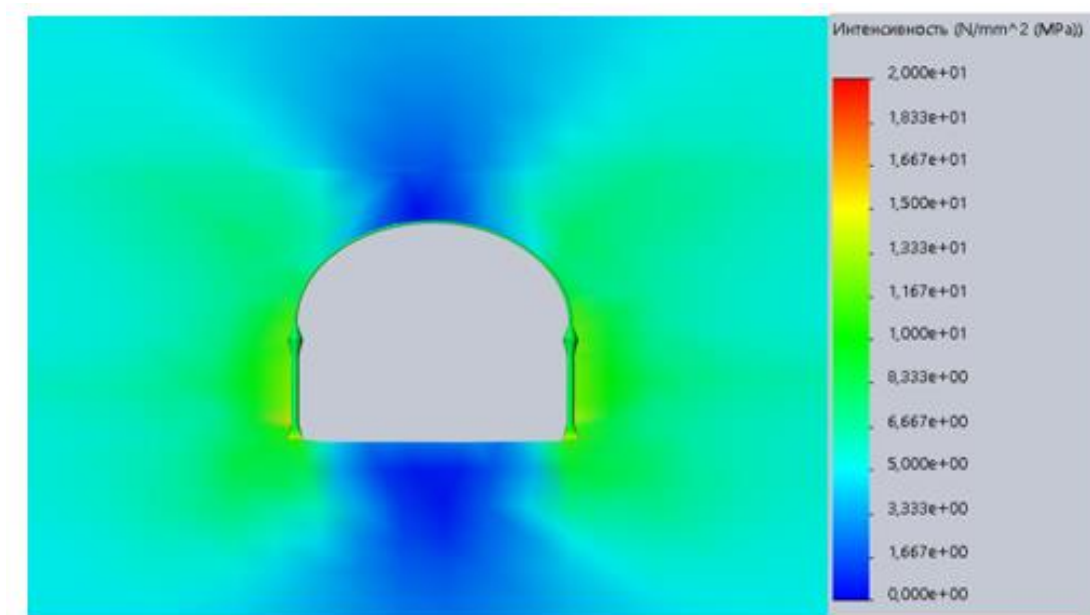


Рисунок 3.13 – Епюра інтенсивності напружень σ у шаруватому породному масиві навколо виробки із використанням вуглепластичного арочного кріплення постійного (а) та змінного (б) перерізу

Над центральною частиною зводу у породах виникає область з концентрацією σ рівня 1,6 - 2,0 від початкового стану незайманого масиву. За абсолютною величиною ця концентрація σ не становить небезпеки, так як в 3,0 - 3,8 рази нижче опору стисненню піщаника безпосередньої покрівлі. На цей факт необхідно звернути увагу з наступної причини. Зазвичай, в тому числі і в базовій схемі кріплення, в безпосередній покрівлі над виробкою утворюється зона розвантаження, де знижені σ характеризують прогин породного зводу у виробку з відповідними його горизонтальними зрушеннями.

Якщо товща породи ціла, то її горизонтальні зміщення не зменшують опору вертикальному тиску породи. Як правило, безпосередня покрівля розбивається тріщинами розриву, і якщо породи виходять з контакту один з одним, то при їх вигині розпірна структура не утворюється, і вони падають на рамну опору. При наявності горизонтального розриву породи чинять опір вертикальному тиску, і, зокрема, мала концентрація σ свідчить про збільшений горизонтальний розрив

блоків породи. Описаний стан безпосередньої покрівлі утворився за рахунок її з'єднання з основною покрівлею за допомогою арочного вуглепластичного кріплення та утворює дуже потужну зону з високою несучою здатністю.

По-друге, характер розподілу σ в першому шарі основної покрівлі вказує на можливість частково незалежного прогину основної і безпосередньої покрівлі з деякими горизонтальними зрушеннями відносно один одного. Можливість горизонтальних переміщень відносно шарів безпосередньої та основної покрівлі сприяє появі в останній локальній області розвантаження розмірами в площині перерізу $0,9 \times 1,3$ м.

Рівень розвантаження становить $0,4 - 0,8$ від величини початкового стану незайманого масиву. Це вказує на збереження частини горизонтального розпору в межах цієї локальної зони, вище якої стан алевроліту переходить у початкове положення. На половині потужності породного шару основної покрівлі діє концентрація σ рівня $1,2 - 2,0$. Дана концентрація характеризує дію розпірних зусиль при опорі прогину нижнього шару основної покрівлі, а абсолютні значення σ в $1,75 - 2,91$ рази нижче опору стиску алевроліту.

Негативною обставиною є поява ділянки розущільнених порід на глибину до $0,15 - 0,20$ м в приконтурній зоні з боку незайманого масиву. Однак, це не може істотно вплинути на опір безпосередньої покрівлі гірському тиску. Концентрація σ зайвий раз підкреслює активне залучення порід безпосередньої покрівлі в протидію процесам зсування надкутної товщі.

У прилеглих бічних породах з боку незайманого масиву спостерігається ще одна особливість в розподілі інтенсивності напружень - знижені σ в порівнянні з базовим варіантом кріплення. Так, концентрація σ становить $1,6 - 2,0$ на ширину в масив до $2,1$ м, яка багаторазово менше опору стисненню, як порід безпосередньої покрівлі, так і вугільного пласта; у слабких породах безпосередньої підшви така концентрація викликає розущільнення та сприяє інтенсифікації процесу здибання.

Досить чітко проявляються на епюрі горизонтальних напружень σ_x . Область їх концентрацій поширюється по всій ширині склепіння і потужності

безпосередньої покрівлі. Величина $\sigma_x \leq 18 - 25$ МПа висока у порівнянні з вихідним станом незайманого масиву (коефіцієнт концентрації $k_x = 5,2 - 7,3$). Розшарування порід безпосередньої покрівлі це не викликає. Підвищені горизонтальні напруження на стиск діють по всій потужності шару, створюючи такий розпір в породних блоках безпосередньої покрівлі, який не допускає істотних прогинів у порожнину виробки.

У бічних частинах безпосередньої покрівлі також має місце відносно неоднорідне поле розподілу стискаючих σ_x по її потужності відбувається розпір породних блоків. В результаті розпірна блокова система в безпосередній покрівлі не тільки стійка, але і активно чинить опір навантаженню з боку основної покрівлі.

Таким чином, за фактором розподілу компоненти σ_x в породах покрівлі прогнозується їх стійкий стан; особливо це стосується безпосередньої покрівлі, де арочне вуглепластичне кріплення створює високі зусилля розпору між породними блоками, тим самим, має достатній опір вертикальному гірському тиску.

Верхняк арочного вуглепластичного кріплення знаходиться в розвантаженому стані, яке вельми часто фіксується при проведенні обчислювальних експериментів для умов шахт Західного Донбасу. Однак, ступінь недовантаженості верхняка відрізняється від базового варіанту кріплення, що розглянуто більш докладно. Периферійна ділянка верхняка в районі замків податливості характеризується мінімальною напруженістю ($\sigma \leq 15 - 19$ МПа), що цілком зрозуміло штатним режимом їх роботи.

У базовому варіанті кріплення на верхняку з боку виробленого простору величина інтенсивності напружень становить вже $47 - 93$ МПа, тобто, зростає в кілька разів. З боку незайманого масиву ділянка верхняка схильна до дії $\sigma = 85 - 100$ МПа.

Така висока інтенсивність напружень свідчить про настання жорсткого режиму роботи вузла сполучення верхняка і стояка через вичерпання вертикальної податливості кріплення. Далі, при русі до центральної частини склепіння (в

базовому варіанті кріплення) інтенсивність напружень знижується до 15-20 МПа з боку незайманого масиву і підвищується з боку виробленого простору.

На противагу вагомим відмінностей в стані верхняка кріплення розподіл σ в стояках досить схожі для обох порівнюваних варіантів кріплення. Основна риса цієї схожості полягає у високій завантаженості стояків, але є і деякі відмінності в розподілі інтенсивності напружень.

Здебільшого по довжині стояка розподіл інтенсивності напружень рівномірний в її поперечному перерізі, що вказує на відсутність скільки-небудь істотного згинаючого моменту.

Слід відзначити, що при використанні вуглепластику [17 - 18], навантаження на арочне вуглепластичне кріплення та інтенсивність напружень розподіляється рівномірно. Такого результату вдалось досягти, завдяки високій питомій потужності матеріалу (близько 3500 МПа) та його здатності при проектуванні задавати будь-які властивості, котрі в декілька разів будуть перевершувати метали.

Якщо порівнювати наведені дані з базовим варіантом кріплення, то істотних відмінностей за величиною стискаючих σ_x не спостерігається, однак, присутні дві ділянки з боку виробленого простору, де зафіксовано дію середнього за величиною згинаючого моменту різних знаків. Проте, ці збурення не грають вирішальної ролі в настанні граничного стану верхняка.

У стояках рами діють знижені горизонтальні напруження для обох порівнюваних варіантів кріплення виїмкової виробки з відмінностями, що не вносять істотний внесок у стійкість кріплення; проте, відзначимо основні з них.

В криволінійній частині стояки з боку незайманого масиву в базовому варіанті кріплення діють стискаючі $\sigma_x = 30-70$ МПа, а в рекомендованому варіанті - знакозмінний σ_x від 10-15 МПа розтягу біля замку податливості і до 15 - 35 МПа розтягу біля замку податливості стиснення внизу криволінійної частини стояка. Ці результати вказують на знижений бічний тиск через зменшення концентрацій опорного тиску в боках виробки. У прямолінійній частині стояка величина стискаючих напружень виявилася дещо нижчою в базовому, ніж в

рекомендованому варіанті. Їх абсолютне значення практично не впливає на стійкість.

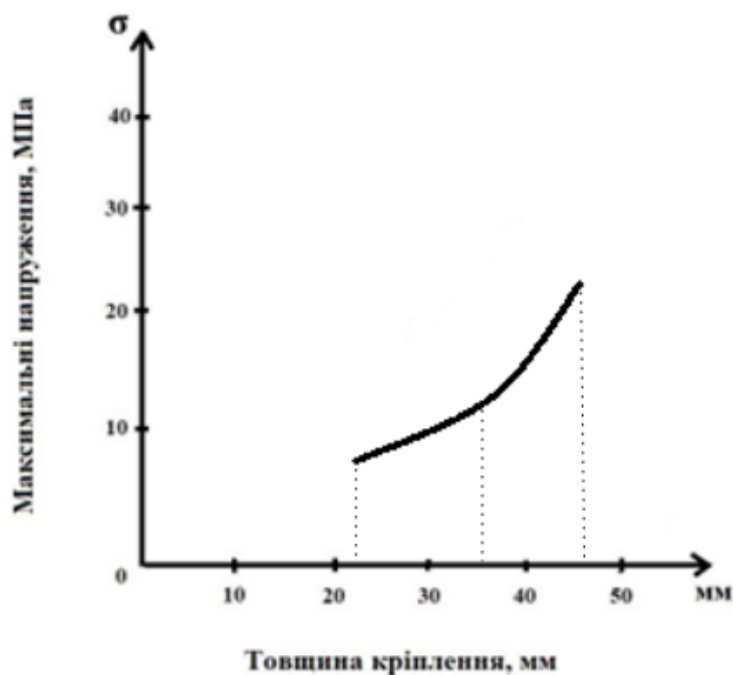


Рисунок 3.14 – Закономірність розподілу інтенсивності напружень для умов шахти «Дніпровська»

Підводячи підсумки виконаного аналізу НДС (рис.3.14), констатуємо всебічно обґрунтований факт зниження напруженості конструкції кріплення при застосуванні аrochenого вуглепластичного кріплення. Цей факт цілком пояснимо, враховуючи закономірності зміни напруженого стану масиву в напрямку підвищення стійкості порід навколо виробки за рахунок формування високої вантажонесучої здатності [9 - 12].

3.4 Дослідження та аналіз НДС системи кріплення із вуглепластику в умовах шахти «Західно-Донбаська»

Шахтне поле розташоване в Павлоградсько-Петропавлівському районі і має протяжність по простяганню 15 км, по падінню 3 - 6 км. Воно складається з трьох блоків. Пласти c_n^8 і c_e^{10} використовуються для розробки та розташовані на глибині 390, 445, 480 і 585 м. Межує з іншими полями видобутку відносно таких же шахт,

як імені Героїв Космосу, «Павлоградська», «Тернівська», «Самарська» та «Дніпровська».

Геологічна будова родовища включає продуктивні відкладення, що перекривають осадові утворення тріас-юрського, палеогенового, неогенового і четвертинного віків.

У тектонічному відношенні ділянка характеризується неспокійним заляганням порід та вугільних пластів. З великих тектонічних порушень відзначений Богданівський скид з амплітудою до 300 м, що є межею шахтного поля з боку підняття уздовж південної межі шахти.

У межах шахтного поля промислове значення мають 7 вугільних пластів: c_{10}^e , c_9 , c_8^e , c_8^h , c_7 , c_5 і c_1 . За даними геологічного звіту газоносність пластів коливається від 0,9 до 59 м³/т і в середньому становила 8 - 15 м³/т. Для окремих груп встановлена наступна природна метаноносність пластів (на масив породи):

- c_8^e і c_8^h - від 9 до 25 м³/т, на більшій частині родовища максимум становить 14 м³/т;

- c_7 , c_7^h , c_6 , c_5 - від 11 до 25 м³/т, на більшій частині території максимум -15 м³/т;

Таблиця 3.5 – Загальні відомості про вугільні пласти

№ п п	Синоніма	Відста нь між пласта ми, м	Глибина залягання, м		Потужність вугільного пласта, м від- до/переваж.	Будова вугільног о пласта	Витриманість вугільного пласта
			від	до			
1	2	3	4	5	6	7	8
Пласти з балансовими запасами							
1	c_{e}^{10}	-	224,6	501	0,6-1,35/0,95	проста	Відносно витриманий
2	c_{h}^{8}	7-8	264	587	0,6-1,2/0,9	складна	невитриманий

У гідрогеологічному відношенні шахтне поле віднесено до закритого типу, а тому обводнення гірничих виробок очікується за рахунок статичних запасів підземних вод, що містяться в піщаниках та вугільних пластах. При відпрацюванні пластів c_{10} та c_8 можливі короткочасні притоки води до 1-3 м³/год за рахунок статичних запасів води в піщаниках покрівлі, тому відпрацювання цих пластів стовпами по падінню не рекомендується.

Загальний приплив води при максимальному видаленні гірничих робіт, складе 250 - 350 м³/год. В окремих випадках підвищені притоки можливі у зонах тектонічних порушень і при підробці неякісно затампонованих свердловин.

Шахтне поле не осушується через незначний приплив. Раптових проривів води на очисні виробки не очікується. Приплив води в лаву можливий зі швидкістю до 3 м³/год.

На початок 2022 року на балансі шахти знаходиться 137 мільйонів тонн високоякісного вугілля. За час існування підприємства обсяг видобутого вугілля збільшився до 1,5 мільйона тон. Розподіл шарів від складного до простого. Основним споживачем шахти є Павлоградська центральна збагачувальна фабрика, яка видобуває 67% загального обсягу вугілля, переважно через високу зольність маси, що становить 42%.

Підприємство використовує 1% вугілля для власних потреб. Протягом цього періоду промислові запаси скоротилися з 160 до 148 мільйонів тонн, а загальний обсяг запасів збільшився з 6,6 до 11 мільйонів тонн. Вміст золи у видобутому вугіллі за останні чотири роки залишився на рівні 33%. Вміст вологи у вугіллі зросла на 8,3%, а вміст сірки збільшився з 0,99% до 1,11%.

Середня кількість активних довгих вибоїв зменшилася з 3,7 до 3,2. Максимальна потужність видобутку зросла з 1160 до 1812 тонн на добу. Середня тривалість перебування в лавовому переході зросла з 118 днів у 2018 році до 172 днів у 2022 році. Продуктивність шахтарів у роботі зросла на 62% до 96 тонн на місяць. Модель шаруватого гірського масиву була побудована на основі

геологічних досліджень. Для дослідження був обраний пласт c_6^{10} . Геологічна потужність від 0,6 до 1,35 м.

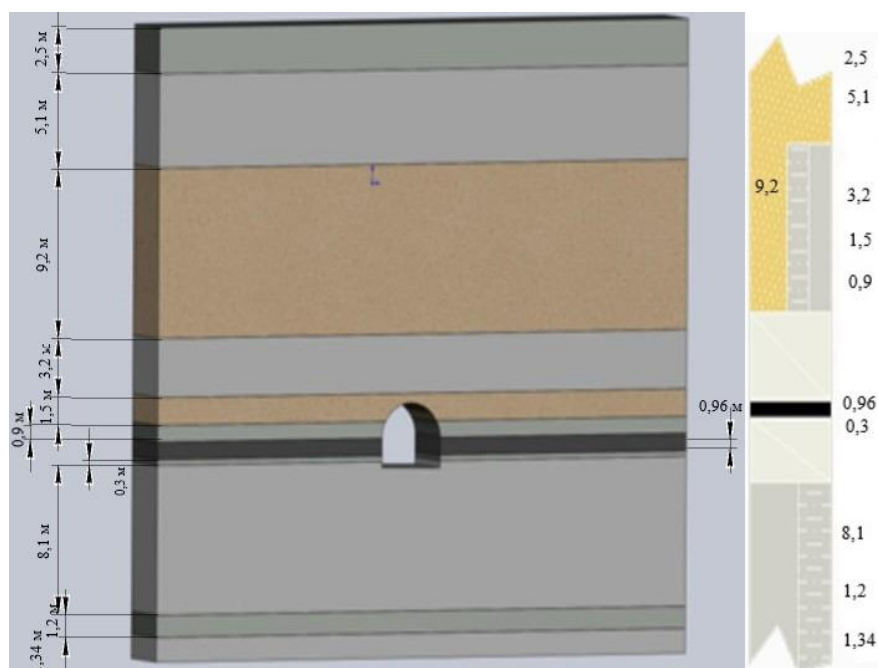


Рисунок 3.15 – Шаруватий гірський масив побудований за стратиграфічною колонкою для пласта c_6^{10} умовах шахти «Західно-Донбаська»

Модель структури досліджуваного породного масиву навколо пласта c_6^{10} побудована згідно стратиграфічної колонки та представлена на рисунку 3.15. Вона включає 11 породних шарів: 1 – аргіліт потужністю 2,5 м; 2 – алевроліт потужністю 5,1 м; 3 – піщаник потужністю 9,2 м; 4 – алевроліт потужністю 3,2 м; 5 – піщаник потужністю 1,5 м; 6 – аргіліт потужністю 0,9 м; 7 – вугільний пласт c_6^{10} потужністю 0,96 м; 8 – аргіліт потужністю 0,3 м; 9 – алевроліт потужністю 8,1 м; 10 – аргіліт потужністю 1,2 м, 11 – алевроліт потужністю 1,34 м.

Для дослідження напружено-деформованого стану масиву була прийнята висота та ширина моделі породного масиву 35 метрів (по координаті Y та X відповідно). Згідно плану гірничих робіт кут залягання пласта c_6^{10} – 1° та розташований на глибині 490 – 500 метрів. Саме такі розміри моделі дали змогу провести точний та достовірний результат моделювання у програмі SolidWorks (табл. 3.6).

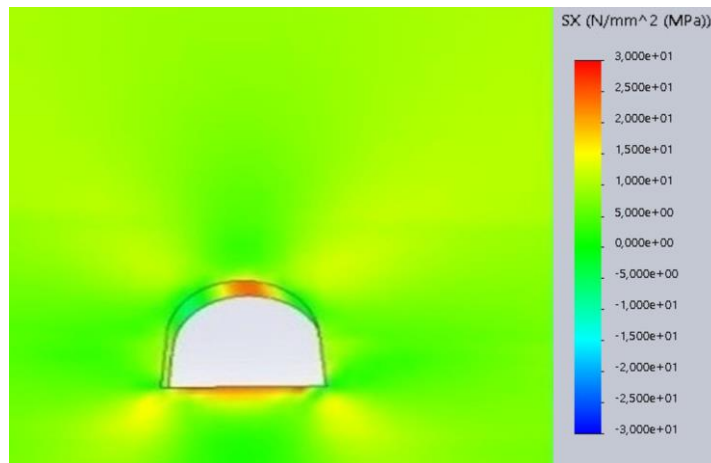
Таблиця 3.6 – Фізико-механічні властивості гірських порід умовах шахти «Дніпровська»

Властивість	Найменування порід			
	Алевроліт	Аргіліт	Піщаник	Вугілля
Модуль пружності, МН/ м ²	2110	2190	2580	3600
Коефіцієнт Пуассона	0,25	0,21	0,26	0,25
Модуль зсуву, МН/ м ²	6090	6150	9710	1570
Масова щільність, кг/ м ³	2615	2370	2690	1240
Межа міцності на розтяг, МН/ м ²	3	2,8	5,6	5
Межа міцності на стиск, МН/ м ²	25	18,5	28	30

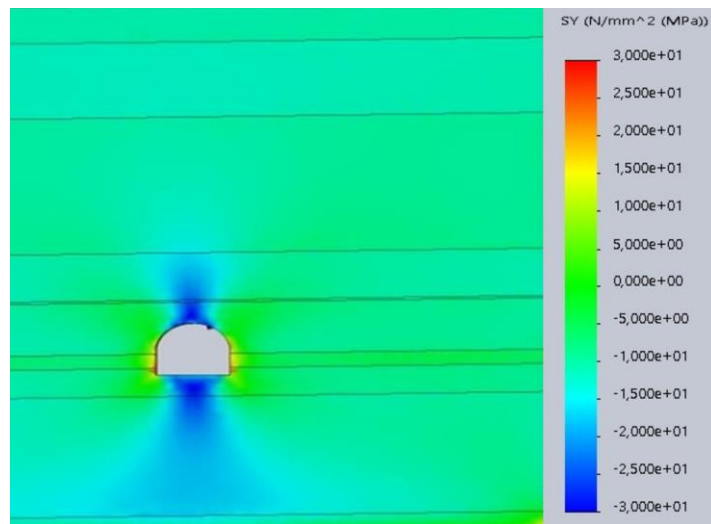
Прикладене навантаження при розрахунку досягло 12,25 МПа на глибині видобутку 490 метрів. Проведений аналіз напружено-деформованого стану гірського масиву показав, що інтенсивність напружень коливається від 2,8 до 13,9 МПа на даній глибині. Також спостерігається підвищення здимання порід у місцях наявності вугільного пласту та прошарків вугілля.

З точки зору горизонтального напруження, увесь масив характеризується напруженням на розтяг +1,6 МПа і напруженням на стиск -3 МПа. Також спостерігається зона стиснення розміром 7,2 метри висотою та 19,1 метри шириною, що є типовим для цієї глибини.

а)



б)



в)

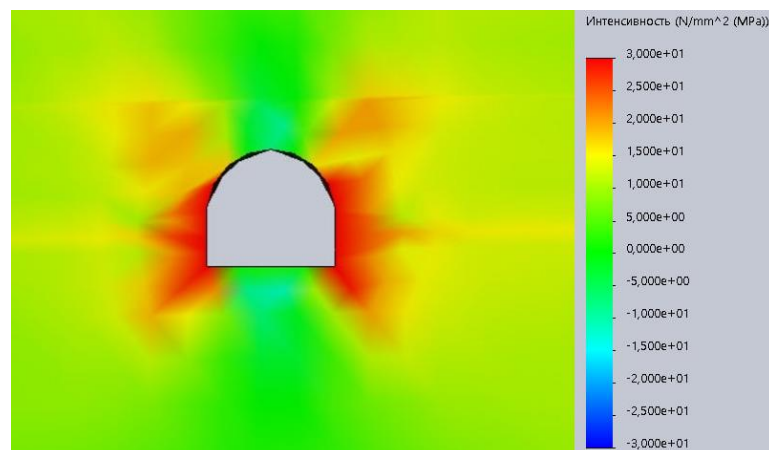


Рисунок 3.16 – Аналіз НДС за горизонтальними (а), вертикальними (б) та за інтенсивністю напружень (в)

У середині видобутого простору спостерігається зона ослабленої породи шириною близько 2,79 метра та висотою 1 метр під впливом вертикальних напружень на розтяг. Навантаження приблизно 37 кН додається на кожен метр видобутку, проте це не призводить до втрати стійкості покрівлі.

У безпосередній покрівлі спостерігаються концентрації напружень (рис.3.16) від +1,3 до -9,8 МПа, що створює ослаблену зону з руйнівними породами, такими як піщаник, аргіліт та алевроліт.

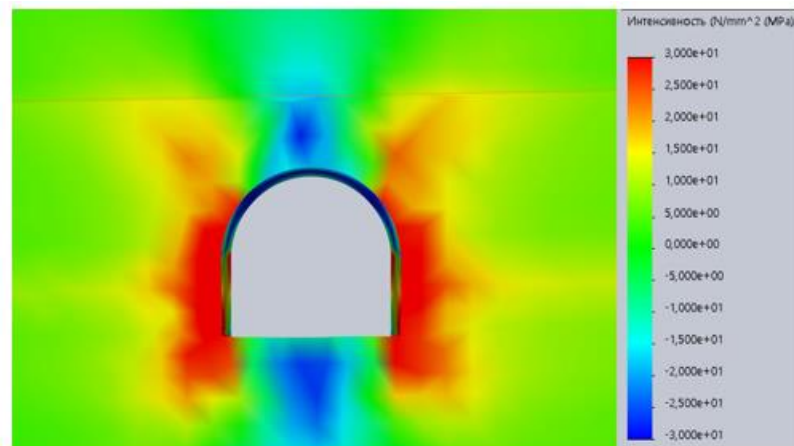
Розподіл вертикальних напружень по всьому масиву є рівномірним (від +3,8 до +4,6 МПа), а напруження на стиск вугільного пласта становить близько -9,2 МПа. Графічний аналіз показує, що отримані значення напружень відповідають геостатичним умовам в масиві. Розрахований боковий тиск цього шару становить приблизно -2,1 МПа.

Негайне руйнування покрівлі починається з розвитку значних вертикальних навантажень на систему кріплення при зростанні тиску у цих областях. Цей процес пояснюється збільшенням податливості породи над видобутком. В результаті верхні шари покрівлі перш за все опираються на систему кріплення [19 - 20].

При аналізі взаємодії шаруватого масиву та вуглепластичного кріплення виявлено діапазон напружень на стиск -30 МПа до напруження на розтяг +30 МПа (рис. 3.17).

Результати розрахунку показали, що в прилеглих бічних породах концентрація напружень σ_x становить 0,64 - 0,82 на метр ширини, що в рази менше опору як порід біля покрівлі, так і вугільного пласта.

а)



б)

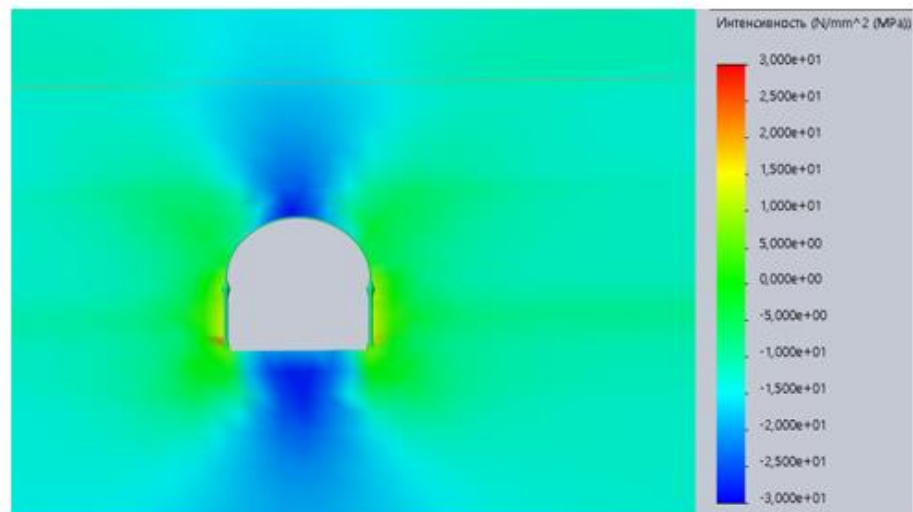


Рисунок 3.17 – Епюра інтенсивності напружень σ у шаруватому породному масиві навколо виробки із використанням вуглепластичного арочного кріплення постійного (а) та змінного (б) перетину

Для слабких порід у підшві створюється зона здибання, яка простягається на глибину до 3,1 м, а в кутах виробки діють руйнівні напруження. У системі кріплення зафіксовано максимальні напруження від 32 до 71 МПа по всьому профілю верхняка змінного перетину.

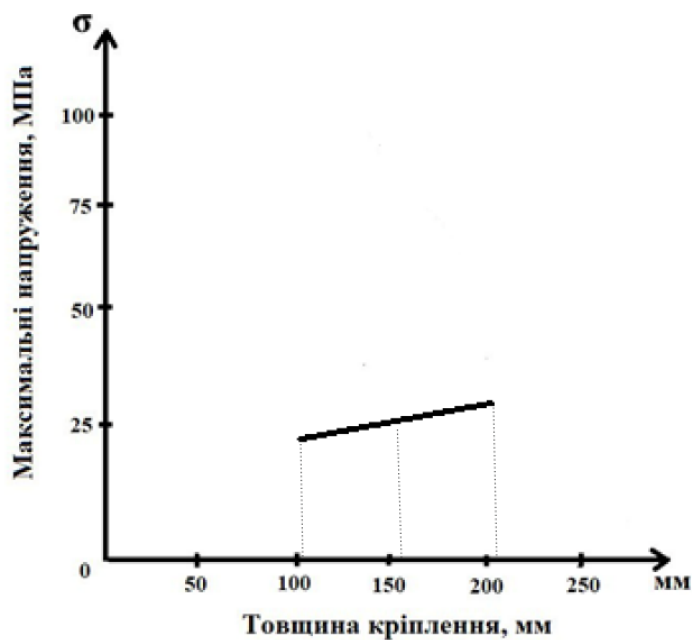


Рисунок 3.18 – Закономірність розподілу інтенсивності напружень для умов шахти «Західно-Донбаська»

Для стояків змінного перетину максимальна концентрація напружень знаходиться (рис. 3.18) в п'яті та становить від 56 до 89 МПа, що узгоджується з попередніми дослідженнями цього типу кріплення. Тобто, незважаючи на те, що поперечний переріз кріплення було змінено з постійного на змінний, це свідчить про те, що навіть при таких структурних відмінностях кріплення все ще функціонує.

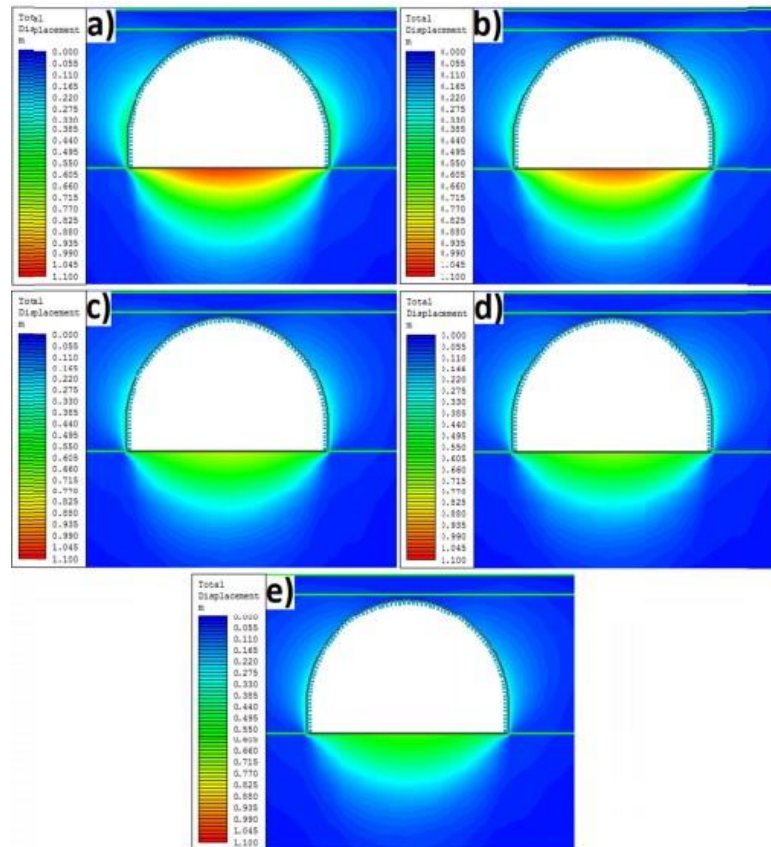


Рисунок 3.19 – Епюри інтенсивності зміщень напружень σ навколо виробки

Достовірність отриманих нами результатів досліджень підтверджується у працях дослідників напружено-деформованого стану масиву, де були отримані закономірності розподілу тиску у масиві та кріпленні.

Наприклад, у роботі [21] представлені результати дослідження констант mb та s критерію Хока-Брауна для гірських порід: алевроліту, аргіліту, вугілля та середньозернистий піщанику, що оточують виробку.

Ще одним прикладом достовірності проведених досліджень є робота [22], в якій отримані результати розподілу напружень σ для дренажного вентиляційного штреку пласта c_4^2 шахти «Самарська» показали повну картину напружено-деформованого стану в складних гірничо-геологічних умовах.

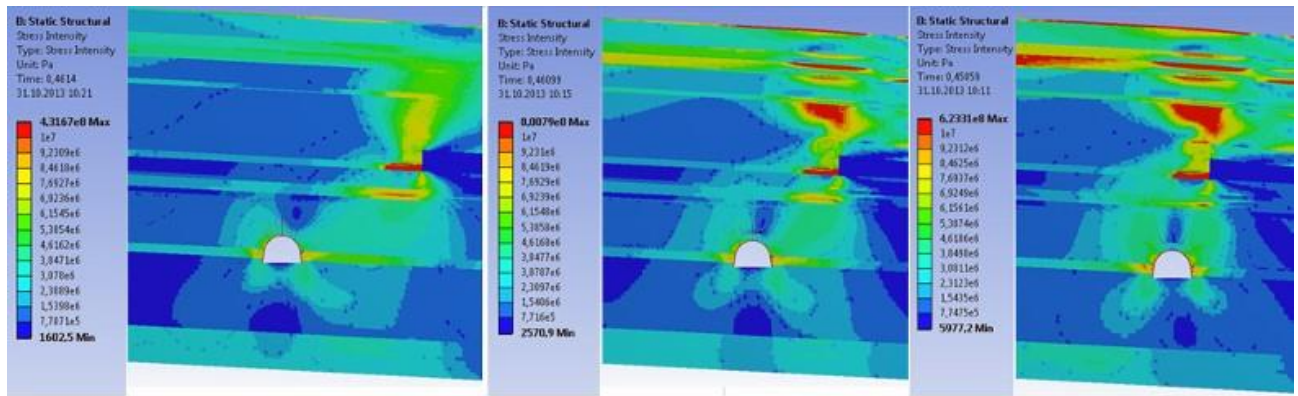


Рисунок 3.20 – Епюри інтенсивності напружень σ у породному масиві

Проведені нами дослідження не суперечать чисельним геомеханічним дослідженням у цьому напрямі, що підтверджено еквівалентністю моделі для імітації умов утримання під час гірничих робіт у підземних умовах [21 - 22].

3.5 Вибір типів та раціональних параметрів арочних вуглепластичних кріплень

Вибір раціональних параметрів кріплення, прогнозування та забезпечення стійкості є найважливішим завданням гірничої науки та практики. Незважаючи на велику кількість робіт, виконаних у цьому напрямку [24 - 26], цю проблему не можна вважати повністю вирішеною. Стійкість зазвичай розглядають з двох позицій - стійкість гірських порід та стійкість виробки. Незважаючи на близькість цих понять, вони все ж мають відмінності. Під стійкістю гірських порід у виробці розуміють ступінь їх піддатливості пластичній деформації, здатність протистояти діючим напруженням без руйнування. Визначається складом, будовою і властивостями гірського масиву; наявністю тектонічних порушень та гідрогеологічних умов.

Під стійкістю гірничої виробки розуміється нормальний робочий стан протягом необхідного терміну її служби.

Загалом виробка буде стійкою, якщо діючі напруження на контурі не перевищуватимуть міцність масиву:

$$K\gamma H \leq k_{cmp} \sigma_{cm}, \quad (3.2)$$

де γ та σ_{cm} – об'ємна вага і міцність при стисненні гірських порід;

K – коефіцієнт концентрації напружень на контурі виробки;

H – глибина закладення виробки;

$k_{стр}$ – коефіцієнт структурного ослаблення масиву.

У роботі [27] досліджувався метод визначення міцності породного масиву, що ґрунтується на ймовірно-статистичному підході, з урахуванням різних характеристик тріщинуватості порід, включає встановлення залежності реальної міцності породного масиву від якості поверхонь втрати суцільності за допомогою багатоваріантного моделювання дефектного породного масиву з використанням методу дискретних елементів.

Якщо умова стійкості не виконується, породи всередині деякої зони навколо виробки частково або повністю руйнуються та втрачають несучу здатність. При цьому напруження на контурі виробки зменшуються та утворюється зона низьких напружень - зона непружних деформацій. Слід зазначити, що напруження на контурі виробки з часом зменшуються навіть за відсутності руйнування за рахунок деформації масиву в напрямку виробленого простору та явищ повзучості. Після утворення зони непружних деформацій пік напружень зміщується вглиб масиву, утворюючи зону підвищених напружень - зону опорного тиску. Зі збільшенням відстані від виробки напруження зменшуються і стають рівними напруженням незайманого масиву.

Ліва частина критерію формули 3.1 виражає поточні напруження, що утворюють навантаження на кріплення підземної виробки. Однак через складну будову гірських масивів, наявність тектонічних напружень та лінійне зростання тиску з глибиною в реальності спостерігається рідко. В інженерних розрахунках навантаження на кріплення виробки використовується одна з двох конкуруючих гіпотез - розрахунок за схемою заданих напружень і розрахунок за схемою заданих деформацій.

Загальна ідея всіх розрахункових методів та гіпотез за схемою із заданою деформацією полягає в тому, щоб врахувати зміщення гірського масиву та арочного вуглепластичного кріплення (рис. 3.21).

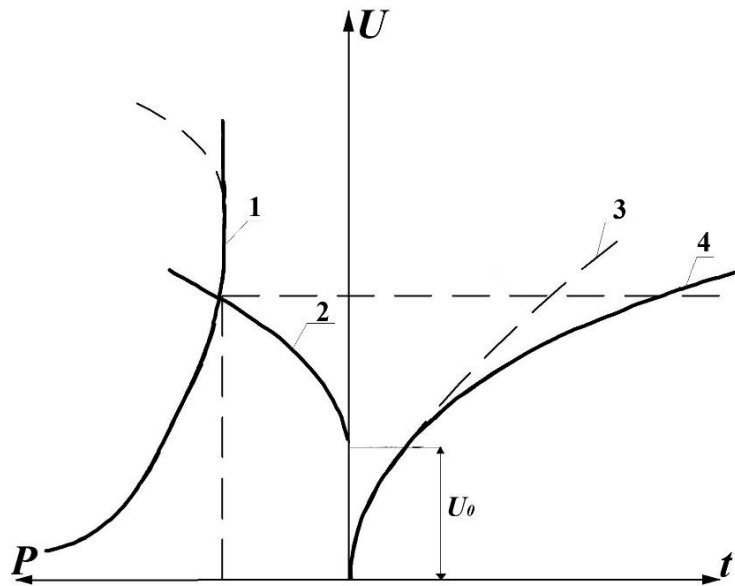


Рисунок 3.21. – Діаграма взаємодії кріплення та породного масиву [26]:

1 - розвантаження масиву; 2 - опір кріплення; 3 - зміщення порід у незакріпленій виробці; 4 - розвиток зміщень порід та кріплення в часі

Суть цієї діаграми полягає в наступному. Крива (1) відображає графік рівноважних станів масиву і показує зменшення напружень по мірі просування порід у видобутий простір. Нелінійність лінії (1), підтверджена спостереженнями у шахтах, свідчить про участь незворотних пластичних деформацій разом із пружним розвантаженням. У деяких випадках на завершальній стадії може спостерігатися певне збільшення тиску, пов'язане з розривом фрагментів руйнованої породи.

Під час установки кріплення масив має початкове зміщення. Потім, при взаємодії з масивом, реакція кріплення зростає, утворюючи лінію (2), і в точці перетину кривих (1) і (2) досягається стан рівноваги. Нелінійний характер кривої (2) пояснюється стисканням вузлів податливості. Для жорсткого металевого кріплення лінія (2) буде прямою. Криві (3) і (4) вказують на зміщення порід у часі. Поведінка породного масиву без кріплення показана пунктиром на лінії (3). Після встановлення характер деформації змінюється - це відображено на лінії (4). Така діаграма наочно показує закономірності спільної роботи гірського масиву і кріплення.

Так, як властивості гірських масивів та гірничих виробок досить різноманітні, то при описі їх характеристик виникла потреба їх систематизувати та

звести до загального числового показника. Тому дослідники віддають перевагу числовим значенням та якісним описам і тому кількісні класифікації корисні при розвідці та проектуванні шахт.

У складних гірничо-геологічних умовах і в умовах високого гірського тиску, підвищеної тріщинуватості порід коригуються з урахуванням проведення геотехнічної оцінки стану масиву і уточнюються з використанням програм чисельного моделювання Map3D і Rocscience.

Сучасний підхід до вибору типів і раціональних параметрів кріплення базується на результатах досліджень, проведених в кінці ХХ століття. За минулий час суттєво змінилися умови розробки родовищ, у тому числі глибина гірничих робіт, з'явилися нові конструкції кріплення, розроблені сучасні підходи до оцінки стійкості масиву. Як показує досвід ведення гірничих робіт, при виборі параметрів кріплення необхідно додатково враховувати такі фактори: геологічні умови покладу; фізико-механічні властивості гірських порід; напружено-деформований стан масиву та розшарування масиву.

Останнім етапом перед лабораторними дослідженнями був вибір раціональних параметрів кріплення для 3-х шахт: імені Героїв Космосу, «Західно-Донбаська» та «Дніпровська». Саме вибір раціональних параметрів кріплення та надійна підтримка гірничих виробок [18] допоможуть підвищити ефективність видобутку вугілля та забезпечити більш безпечні умови праці для шахтарів. Необхідність вибору цих параметрів зумовлена тим, що на вугільних шахтах України гірничі роботи ведуться на великих глибинах, у нашому випадку шахти Західного Донбасу ($H = \leq 500$ метрів).

Наше дослідження показує, що перспективним напрямом є застосування аروحних вуглепластичних кріплень (постійного та змінного перетину), в залежності від глибини розробки, фізико-механічних властивостей та розрахунку НДС масиву.

Адекватність та правильність наших розрахунків при виборі раціональних параметрів за допомогою моделювання у комп'ютерному продукті SolidWorks підтверджують роботи дослідників у цьому напрямі. Наприклад, у роботі [29] епюри отриманих розрахунків показали, що напруження навколо виробки при

використанні типових систем кріплень є несиметричні. Подібний результат був отриманий нами у аналізі напружено-деформованого стану масиву з використанням профілю СВП 27.

Зменшити інтенсивність нерівномірного розподілу тиску навколо виробки вдалось вирішити шляхом моделювання вуглепластичної системи кріплень у досліджуваних нами умовах.

Встановлена закономірність (рис. 3.22) допомогла відобразити напруження у конкретній точці, результати дослідження зображені на рисунках, як 3.23; 3.24; 3.25.

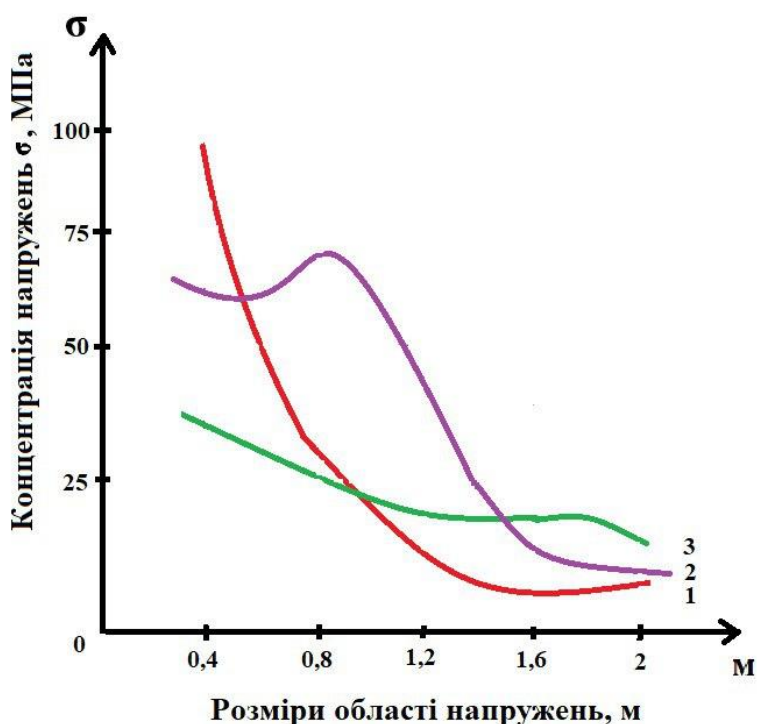


Рисунок 3.22. – Закономірність розподілу концентрації напружень від розмірів області напружень для умов шахти: 1 – імені Героїв Космосу, 2 – «Дніпровська» та 3 – «Західно-Донбаська»

Моделювання системи кріплення у породному масиві на глибині (H=450 метрів) шахти «Дніпровська» показало, що при врахуванні інтенсивності напружень навколо виробки, необхідно використовувати кріплення постійного перетину. Розподіл напружень рівномірний по всьому контуру. Беручи до уваги, верхняк та стояки, то найвищі напруження до 50 МПа у п'ятах, що є нормальною

умовою для експлуатація, щодо верхняка та стояків напруження коливались від 20 до 30 МПа. Для замків податливості діапазон коливався в районі 5-15 МПа.

Результати досліджень НДС масиву показали, що в умовах шахти «Дніпровська» для пласта c^5 на глибині 400 метрів варто застосовувати арочне вуглепластичне кріплення постійного перерізу круглого перетину з постійним діаметром 200 мм (рис.3.23) по всьому контуру виробки. Постійний діаметр 200 мм - це відношення товщини перетину контуру на напруження у відповідній точці при навантаженні кріплення в 11 МПа. Так, як напруження, які сприймає вироблений простір та виробка без великих коливань від 13 до 23 МПа, то таке кріплення буде постійного перерізу.

Зміна діаметру та зменшення ваги кріплення можлива, завдяки високим показникам фізико-механічних властивостей та їх здатності гнучкості для створення конструкції різних геометричних фігур, що і є основою цього відношення.

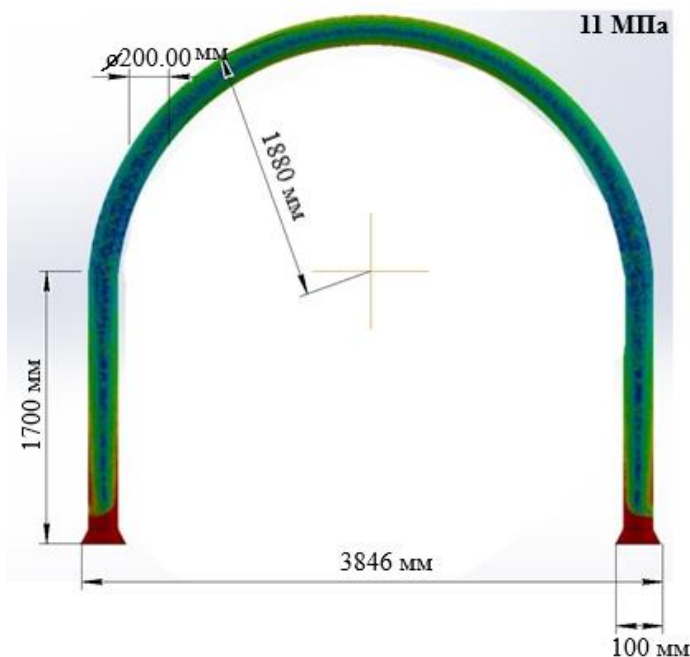


Рисунок 3.23 – Раціональні параметри арочного вуглепластичного кріплення для умов шахти «Дніпровська» для пласта c^5 на глибині 400 метрів

Також слід виділити переваги та недоліки цього виду кріплення у даних умовах. До переваг можна віднести: простий монтаж-демонтаж, можливість повторного використання та безпека праці. Одним з недоліків є висока собівартість.

Це спричинено великою кількістю використання вуглепластику при таких параметрах.

Наступною у дослідженні була шахта «Західно-Донбаська». Модель кріплення шаруватого масиву з вуглепластичним кріпленням була розташована на глибині 490 метрів.

Розподіл показав, що у верхняку змінного перетину коливались напруження від 20 до 25 МПа. У стояках змінного перерізу була підвищена концентрація приблизно 60 МПа, а в п'ятах до 97 МПа, що відповідає даним попередніх досліджень арочного вуглепластичного кріплення.

Для цих умов розподіл напружень приймає інший вид, спостерігали більші коливання та вище напруження від 15 до 30 МПа (рис.3.24), тому варіант кріплення, який найбільше підходить є арочне вуглепластичне кріплення змінного перетину з діаметром перерізу від 50 до 100 мм.

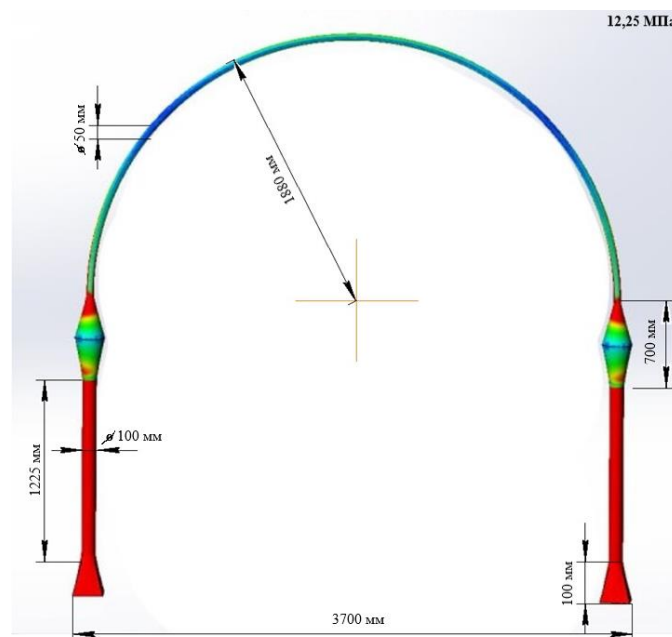


Рисунок 3.24 – Раціональні параметри арочного вуглепластичного кріплення для умов шахти «Західно - Донбаська» для пласта c_6^{10} на глибині 490 метрів

Замки податливості (16 - 25 МПа) не порушуються і повноцінно демфують. Не дивлячись на те, поперечний переріз був змінений, навіть при таких структурних змінах кріплення функціонує.

Щодо переваг кріплення, все те ж саме, як і у попередньому варіанті, та ще й невелика кількість матеріалу, а при зменшенні об'єму вуглепластику зменшилась і собівартість кріплення.

Останнім етапом дослідження була шахта імені Героїв Космосу. Модель кріплення та шаруватого масиву знаходилась на глибині 450 метрів. Розподіл напружень був рівномірний по всьому контуру кріплення: верхняк та стояки (близько 18 МПа), лише у деяких місцях п'яти стояка спостерігались напруження рівні 20 МПа. Замки податливості не порушені і сприймають тиск 15 МПа.

Щодо до цих умов, то ситуація подібна до розподілу тиску навколо виробки для умов шахти «Західно-Донбаська», також є нерівномірні коливання тиску, але на рисунку 3.25 (від 12 до 20 МПа) та в розрахунках у SolidWorks спостерігається невисокий тиск. Для цього кріплення діаметр перетину від 35 до 100 мм.

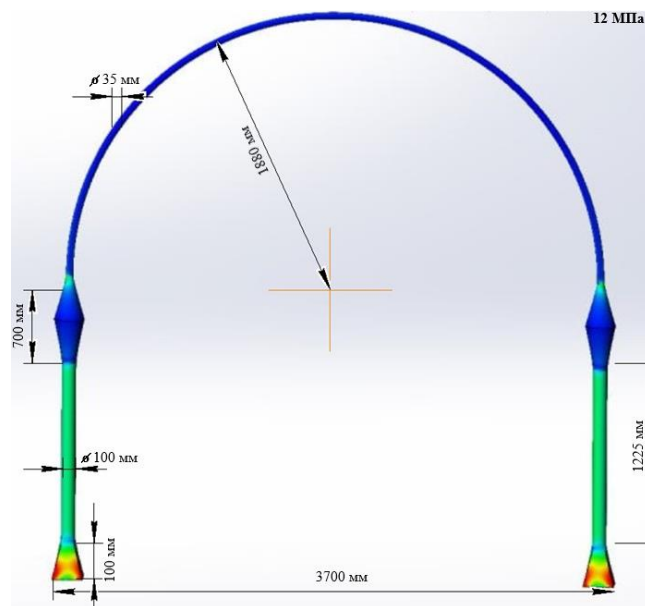


Рисунок 3.25 – Раціональні параметри арочного вуглепластичного кріплення для умов шахти імені Героїв Космосу для пласта c^5 на глибині 450 метрів

Підтверджуючим фактором коректних розрахунків раціональних параметрів кріплення є графік розподілу максимальних напружень від товщини кріплення (рис. 3.24) для обраних умов.

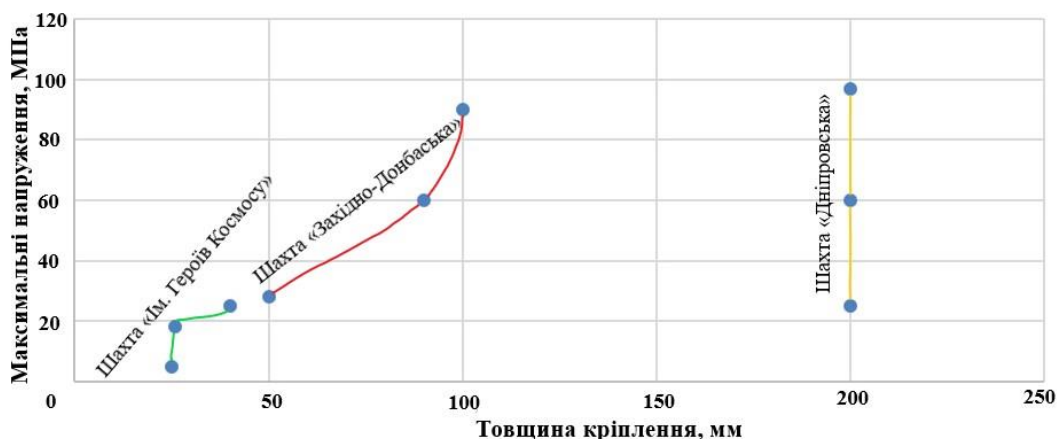


Рисунок 3.26 – Графік розподілу максимальних напружень від товщини кріплення

Були взяті значення напружень у 3-х точках конструкції кріплення, а саме: верхняк, замки податливості та стояки. Там де діаметр кріплення постійний, то таке кріплення постійного перетину, а де великий розбіг, то змінного.

Порівнявши результати досліджень напружено-деформованого стану шаруватого гірського масиву та обравши нові різновиди вуглепластичних кріплень: постійного (для шахти «Дніпровська») та змінного перерізу (для шахти імені Героїв Космосу та «Західно-Донбаська») круглого перетину з обраними раціональними параметрами. Підтверджено, що саме на глибинах розробки до 500 метрів притаманних для шахт Західного Донбасу та складних гірничо-геологічних умовах з нестійкими породами необхідно звернути увагу на модернізацію типових кріплень гірничих виробок, за допомогою введення в експлуатацію нових видів кріплень з високими показниками фізико-механічних властивостей: гнучкістю та низькою питомою вагою.

Розподіл напружень повністю відповідає існуючими дослідженням [28] про процеси деформації навколо виробки. Отримані результати не відрізняються від численних досліджень геомеханіки. Аналіз результатів напружено-деформованого стану масиву з врахуванням властивостей кріпильних елементів, показав повний розподіл напружень навколо підготовчої виробки. Нові типи вуглепластичних кріплень мають явну перевагу перед традиційними аналогами через свої фізико-механічні властивості. Наше дослідження показало, що інноваційні кріплення в

5 разів менше, ніж традиційні кріплення, вони також більш стійкі до механічних впливів і можуть бути розроблені в будь-якій формі.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено зниження (у 2 рази) концентрації інтенсивності напружень і області їх поширення, що обумовили зменшення обсягів зруйнованих порід в шарах покрівлі пласта і формування зниженого гірського тиску навколо підготовчої виробки.

2. Визначено, що зниження напружень верхняка та стояків рами відбувається при використанні вуглепластику, завдяки новим замкам податливості. Це підтверджено сприйняттям частини вертикального гірського тиску з високим спротивом, завдяки фізико - механічних властивостям композиту зі збереженням демпфувального ефекту.

3. Отримано залежність, яка підтвердила доцільність використання вуглепластичного матеріалу, завдяки гнучкості та високим характеристикам міцності і визначено, що ресурсозберігаючі умови рівномірності елементів систем кріплень підготовчої виробки дають змогу зменшити металоємність конструкції кріплення у 5 разів, завдяки збільшенню діаметру ($D=50 - 100$ мм) у конкретній точці контуру виробки, де прогнозується найбільший вплив тиску.

4. Отримані результати порівняння розрахунків НДС базового металевого та арочного вуглепластичного кріплень виявили зменшення інтенсивності напружень навколо підготовчої виробки, де завдяки за рахунок несучої здатності вуглепластику зменшились напруження σ по всій системі кріплення на 30 - 35 %, що підтверджує тезу зниження вертикального тиску на конструкцію кріплення.

5. Встановлено, що зниження концентрацій напружень та розмірів зон розущільнення порід в боках виробки сприятливо позначається на рівні напруженості підшви.

6. Отримані рекомендації та закономірності щодо раціональних розмірів та типів кріплення з вуглепластику, які підтвердили доцільне використання у шаруватому масиві слабометаморфізованих порід.

Перелік використаних у розділі 3 джерел

1. 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* 2022, 15, 4653. <https://doi.org/10.3390/en15134653>
2. Sotskov, V.O., Podvyhina, O.O., Dereviahina, N. I., Malashkevych, D. S. (2018). Substantiating the criteria for applying selective excavation of coal deposits in the Western Donbass: *Dniprop. Univer. bulletin, Geology, geography.*, 26(1), 158-164. <https://doi.org/10.15421/111817>
3. Yihong, L. (2022). Characterization of arching effect and failure mode of longwall panel floor / [et al.]. *Engineering Failure Analysis*. № 138. pp. 106-121. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106427>
4. Li, C.C. (2022). A study on the energy sources and the role of the surrounding rock mass in strain burst / [et al.] // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. № 154. pp. 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105114>
5. Isleyen, E. (2021). Interpretable deep learning for roof fall hazard detection in underground mines / E. Isleyen, S. Duzgun, R. Carter // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 13, № 6. pp. 1246-1255. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.09.005>
6. He, M. (2021). Innovation and future of mining rock mechanics / *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 13, № 1. pp. 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.005>
7. Zhang, F. (2022). Fixed-length roof cutting with vertical hydraulic fracture based on the stress shadow effect : A case study [et al.] . *International Journal of Mining Science and Technology*. Vol. 32, № 2. pp. 295-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.007>
8. Власов, С. Ф., Тимченко, С. Є., Молдаванов, Є. В. (2021). Аналіз геологічних умов та особливостей будови пісковиків, які залягають у покрівлі розроблювальних вугільних пластів в умовах шахт Західного Донбасу. *Збірник*

наукових праць Національного гірничого університету. № 65. С. 37-48. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.007>

9. Bondarenko, V. I. (2018). Geomechanics of interference between the operation modes of mine working support elements at their loading / [et al.]. *Mining Science*. № 25. pp. 219-235. <https://doi.org/10.5277/msc182515>

10. Sebastian, R., Mishra, B. (2019). Numerical investigation of massive roof failure in an underground coal mine in pittsburgh seam. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development : Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, Foz do Iguassu, 13–18 September 2019. Foz do Iguassu: CRC Press/Balkema, 2019. pp. 2895-2901.*

11. Islavath, R., Deb, D., Kumar, H. (2020). Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020.№ 127. pp. 104-121. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104221>

12. ПАСПОРТ виймкової ділянки 543 лави пласта C_5+C_5 (пункт 10.1.5 ст.155 - 157; пункт 10.9 ст.162-163).

13. Sreenivasa, R. I., Debasis, D., Hemant, K. (2020). Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. № 127. pp. 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104221>

14. Behera, B. (2020). A numerical modeling approach for evaluation of spalling associated face instability in longwall workings under massive sandstone roof. *Engineering Failure Analysis*. № 117. pp. 225-236. <https://doi.org/10.1016/j.Engfailanal.2020.104927>

15. Ze, X. (2021). Numerical study of stability of mining roadways with 6.0-m section coal pillars under influence of repeated mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. № 138. pp. 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104641>

16. Małkowski, P., Ostrowski, L., & Bachanek, P. (2017). Modelling the small throw fault effect on the stability of a mining roadway and its verification by in situ investigation. *Energies*, 10(12), 2082. <https://doi.org/10.3390/en10122082>

17. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Podkopaiev, S., Sheka, I., & Tsivka, Y. (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*, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>

18. Jinfu, L. (2021). Characteristics of evolution of mining induced stress field in the longwall panel: insights from physical modeling. *International Journal of Coal Science & Technology*. № 1, pp. 18-27. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00390-5>

19. Давиденко, О.М., Ігнатов, А.О. (2019). Механіка ефективного руйнування гірських порід шарошково-ланцюговими долотами/ Породоруйнівний і металообробний інструмент - техніка і технологія його виготовлення та застосування: *Зб. наук. тр. - К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України*. - Вип. 22. - С. 148-157.

20. Zhang, H. (2020). Breaking mechanism and control technology of sandstone straight roof in thin bedrock stope. *International Journal of Mining Science and Technology*. Vol. 30, № 2. pp. 259-263. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.10.006>

21. Małkowski, P., Ostrowski, L. (2019). Convergence monitoring as a basis for numerical analysis of changes of rock-mass quality and Hoek-Brown failure criterion parameters due to longwall excavation. *Archives of Mining Sciences*, 68(1):93-118. DOI: 10.24425/ams.2019.126274

22. Вівчаренко, А.В., Руських, В.В., Соцков, В.А. (2015). *Визначення параметрів кріплення надпрацьовуваної виробки при відпрацюванні зближених пластів в умовах шахт Західного Донбасу*. DOI: [10.15407/mining09.01.035](https://doi.org/10.15407/mining09.01.035)

23. Jun, L. (2021) Three-dimensional physical model experiment of mining-induced deformation and failure characteristics of roof and floor in deep underground coal seams. *Process Safety and Environmental Protection*. № 150. pp. 400-415. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.029>

24. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Varabash, M., Chervatiuk, V., Husiev, O., Snihur, V. (2020). Combined roof-bolting systems of mine workings. *CRC Press*, 281 pp. <https://doi.org/10.1201/9781003081432>

25. Ковалевська, І.А. (1995). Взаємодія анкерного та комбінованого кріплення з породним масивом та розробка методу розрахунку їх раціональних параметрів: дис. кандидата техн. наук:05.15.02; 05.15.11 / Ковалевська Ірина Анатоліївна.- Д.: ДДАУ, - 200 с.

26. Rajwa, S., Janoszek, T., Prusek, S. (2019). Influence of canopy ratio of powered roof support on longwall working stability – A case study. *International Journal of Mining Science and Technology*. Vol. 29, № 4. pp. 591-598. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.06.002>

27. Сдвижкова, О., Бабець, Д., Сосна, Д. (2018). Чисельне моделювання впливу поверхні тріщин під час оцінки міцності породного масиву *Вісник Криворізького національного університету*. Вип. 47, С. 169-175. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2018-1-47-169-175>

28. Ji S., Wang Z., Karlovšek J. (2022). Analytical study of subcritical crack growth under mode I loading to estimate the roof durability in underground excavation. *International Journal of Mining Science and Technology*. Vol. 32, № 2. pp. 375-385. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.08.006>

29. Бузило, В.І., Васильєв, В.Є., Яворська, О.О., Яворський, А.В., Кошка, О.Г., Сердюк, В.П. (2015). *Граничні параметри концентрації гірничих робіт при відпрацюванні Г77 зближених вугільних пластів Західного Донбасу*: монографія/ М-во освіти і науки України; Нац. гірн. ун-т. - Д.:НГУ. - 99 с.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЗМІНИ ДЕФОРМАЦІЇ МАСИВУ ТА КРІПЛЕННЯ У ЕКВІВАЛЕНТНІЙ МОДЕЛІ

4.1 Основні принципи фізичного моделювання. Переваги та недоліки

Підтвердити доцільність нашого дослідження на шахтах Західного Донбасу, при видобутку корисних копалин є неможливим, так як виконання таких експериментальних робіт в наявних умовах не тільки значно ускладнене, але і пов'язане з безпекою для здоров'я персоналу, які будуть брати безпосередню участь. Крім цього, серйозною перешкодою для проведення дослідження на діючих промислових об'єктах є такий фактор, як втрата виробничого часу.

В такій ситуації, а також при введенні в експлуатацію нових видів абочних вуглепластичних кріплень найбільш прийнятним способом вирішення можливих проблем варто вважати застосування фізичного моделювання.

Фізичне моделювання на відміну від математичного - це заміна вивчення явища, що протікає в природі, вивченням подібного явища на моделі, як правило зі значеннями визначальних параметрів цього явища, зручно досяжними в експерименті, зазвичай в спеціальних лабораторних умовах.

Основний сенс моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів з моделями, які необхідно з меншими витратами коштів та часу виготовити, можна було вказати найкращі характеристики натурального виробу, а іноді просто встановити невідомі раніше закономірності.

Встановлення шуканих закономірностей за допомогою фізичного моделювання часто є єдиноможливим способом експериментального вивчення і вирішення важливих практичних завдань. Річ йде про вивчення природних явищ, де процеси бувають надзвичайно складні та протікають довго.

В умовах модельних дослідів подібне явище може тривати всього кілька годин або днів.

Можуть бути і зворотні випадки, коли явище дуже швидко протікає в природі, яке можна експериментально вивчати подібне йому, що відбувається на моделі набагато повільніше [1-4].

Фізичне моделювання ґрунтується на глибокому розумінні явищ та розробці експериментальних та теоретичних методів дослідження для отримання достовірних результатів і рекомендацій для практичного застосування. Протилежністю фізичному моделюванню є математичне моделювання.

Переваги фізичного моделювання випливають з обмежень математичного підходу:

1. Математичні алгоритми ґрунтуються на спрощених припущеннях, що може призводити до неточностей.
2. Є межі точності математичних функцій.
3. Помилки округлення можуть вплинути на результати моделювання.
4. Надійність результатів залежить від попереднього розуміння досліджуваних ефектів.

Фізичне моделювання базується на масштабуванні середовища до розмірів лабораторної моделі з урахуванням критеріїв подібності. Високоякісне фізичне моделювання забезпечує якісний та реалістичний результат, уникаючи недоліків математичного підходу.

Основний недолік фізичного моделювання - складність виготовлення моделей, що робить його менш ефективним для "типових" завдань, де математичне моделювання може бути прийнятним.

Проте фізичне моделювання є необхідним для вирішення деяких завдань, наприклад, вивчення анізотропних середовищ, тріщинуватих структур, моделювання складних тривимірних структур та інших складних процесів, де математичне моделювання може бути обмеженим. Питання про коректне використання тієї чи іншої розрахункової схеми успішно вирішується за допомогою методів фізичного моделювання.

Дослідження на фізичних моделях для перевірки теоретичної інтерпретації процесу взаємодії підземної виробки навколишнім середовищем або для визначення можливих грубих помилок та невірних припущень особливо ефективні, коли їх застосовують для прогнозування поведінки кріплень незвичайних конструкцій за новою, раніше не застосовуваною в даних інженерно-геологічних

умовах технологією. У цьому випадку експериментальні дослідження на моделях, як правило, мають пріоритет перед теоретичними, оскільки вони створюють основу для об'єктивної математичної інтерпретації досліджуваного процесу.

4.2 Методика фізичного моделювання на еквівалентних матеріалах

При вивченні напружено-деформованого стану арочних вуглепластичних кріплень та характеру їх взаємодії з навколишнім масивом широко використовують метод фізичного моделювання за допомогою еквівалентних матеріалів.

Основним критерієм при виборі методу фізичного моделювання є геомеханічні властивості та характеристики гірських порід, які мають вирішальне значення для розуміння геологічних характеристик. Точна оцінка цих властивостей є важливою при видобутку у глибоких та надглибоких шахтах, а також для визначення безпеки. Одним із найважливіших факторів, що впливають на міцність порід, є їх текстура та мінеральний склад. Звертаючи увагу на анізотропію гірських порід, то вона впливає на механічні властивості та міцність. Точна інтерпретація даних також повинна враховувати як літологічні, так і геомеханічні описи гірського масиву, щоб зрозуміти його властивості та характеристики. Пористість значно впливає на параметри гірської породи; загальна пористість та вага сухої одиниці в гірських породах лінійно залежать. Це і є основною складовою вибору методу фізичного моделювання нашого дослідження, так як вона дала можливість максимально точно врахувати властивості гірських порід (алевроліт, аргіліт, піщаник). Враховуючи те, що замість типового кріплення профіля СВП 27, ми використовували арочне вуглепластичне кріплення, яке створили на 3D-принтері, то найбільш здатним підтвердити достовірність дослідження є метод еквівалентних матеріалів.

Даний метод був впроваджений ще у 1936 році і широко використовується для вивчення гірського тиску у підземних виробках у багатьох дослідницьких інститутах.

Основною перевагою цього методу є можливість вимірювання показників, які відображають напружено-деформований стан у вивчених зонах, що практично

неможливо здійснити в реальних умовах через складність доступу до ділянок масиву.

Моделювання за допомогою методу еквівалентних матеріалів ґрунтується на заміні природних шарів та конструкційних матеріалів штучними матеріалами у моделі, які мають фізико-механічні властивості, що перебувають у певних взаємозв'язках з аналогічними показниками реальних матеріалів. Ці взаємозв'язки визначаються на основі загальних принципів теорії механічної подібності та забезпечують аналогію процесів, які відбуваються у природі та моделі під впливом сил гравітації.

Метод еквівалентних матеріалів [6 - 7] дозволяє створити великомасштабні моделі, які максимально точно відображають характеристики ґрунту та особливості будови шаруватого масиву. Цей метод наукового пізнання включає не лише інструментальні вимірювання, але й можливість візуального спостереження. Руйнування моделі дає дослідникам цінну інформацію про статичну поведінку об'єкту.

Теоретична база моделювання ґрунтується на законах теорії подібності. Основна вимога полягає у дотриманні принципу подібності, який передбачає однакові умови і критерії подібності для явищ. Теорія подібності дозволяє аналізувати та відтворювати схожість об'єктів у моделі, а також застосовувати її для наукового аналізу різних явищ та процесів.

Для правильної побудови моделей використовують технологію комп'ютерного моделювання, яка дозволяє перевірити кінцеві результати за допомогою математичних алгоритмів. Теорія подібності має широкий спектр застосувань у фізичних функціях та промисловості, допомагаючи вирішувати складні інженерні проблеми у різних галузях [8].

Для кожної конкретної задачі, виконаною методом моделювання, перш за все повинні бути виділені головні фактори, що визначають досліджуваний процес та обґрунтовані умови проведення дослідження. Все це здійснюється на основі аналізу інженерно-геологічних і виробничих умов у поєднанні з науковим підходом до планування числа експериментів та досліджуваних параметрів у

кожному з них. Значно спрощують підбір матеріалів еквівалентів, технологія проведення експерименту та аналіз його результатів, що виконуватимуть вимоги подібності за окремими показниками, які є визначальними у досліджуваному процесі.

Лабораторні методи дослідження показників гірського тиску на моделях дозволяють визначити основний механізм та характер процесу зсуву, деформації та руйнування гірських порід при проведенні виробок у масиві, що є важливим етапом у розвитку гірських порід. Ці методи дають можливість перевірити достовірність аналітичними рішеннями.

Підбір еквівалентних матеріалів, які відповідають усім вимогам, є складним завданням. Для спрощення цього процесу, коли розглядається плоска задача, можна внести деякі спрощення у вимоги до подібності. У цьому випадку процеси деформації та руйнування відбуваються при статичних навантаженнях, що дозволяє обмежити умови лише за числовими значеннями масштабу моделі. Для модулів, що характеризують пружні та пластичні властивості еквівалентного матеріалу, точна відповідність масштабу не обов'язкова, але важливо забезпечити однаковість відношень деформаційних модулів для елементів натурального об'єкта та моделі.

Узгодженість механічних процесів та подібність граничних умов можуть бути досягнуті, якщо еквівалентний матеріал задовольняє критеріям подібності та забезпечує геометричну подібність. Модель із еквівалентних матеріалів повністю відображає НДС гірського масиву, хоча граничні умови на торцях моделі не можуть бути ідеально задоволеними.

При виборі та тестуванні еквівалентних матеріалів для моделювання важливо знаходити суміші з подібними фізичними та механічними властивостями до гірських порід. Коефіцієнти Пуассона і кут внутрішнього тертя повинні бути узгодженими в еквівалентних матеріалах і природних породах.

4.3 Основні принципи технології 3D-друку

Технологія 3D-друку [9 - 10] дозволяє візуалізувати результати своєї праці та застосовувати їх на практиці, створюючи різноманітні механізми. Вміння моделювання дає можливість змінювати прототип у віртуальному середовищі, експериментувати з параметрами та вдосконалювати його перед друком. Це надає значну мотивацію для практичного застосування навичок і забезпечує їм авторитет.

При моделюванні на 3D-принтері важливо дотримуватись основних правил для створення якісних та точних моделей:

1. Модель повинна мати плоску основу та всі точки повинні бути на одній площині за координатою Z. Це впливає на міцність моделі під час друку.

2. Сітка моделі повинна бути без помилок, оскільки нестандартні перетини граней можуть призвести до артефактів при друку. Для складних моделей рекомендується об'єднувати їх за допомогою логічних операцій.

3. У невеликих моделях важливо слідкувати за товщиною стінок, яка повинна бути кратною діаметру сопла принтера.

4. При моделюванні для FDM-принтера слід уникати нависаючих елементів, оскільки принтер не може друкувати їх у повітрі без підставок. Підтримка може бути використана для друку таких елементів, але потребує подальшої обробки після друку.

5. При моделюванні і друкуванні деталей на побутових 3D-принтерах важливо враховувати низьку точність друку, яка може бути близько 0,3 мм. Жорсткість конструкції принтера, напруга ременів, рівень стола та інші фактори можуть впливати на точність по осях XY. Точність по осі Z зазвичай визначається висотою шару (0,1-0,4 мм). Різні види пластика можуть мати різну ступінь усадки після охолодження. Для досягнення кращого з'єднання деталей рекомендується спочатку роздрукувати їх у чорновому варіанті та підігнати під конкретний випадок.

6. При створенні великих моделей важливо враховувати розміри 3D-друку. Розміри зазвичай обмежені розмірами друкованого столу для FDM-принтерів. Якщо модель більшого розміру, її можна роздрукувати по частинах та з'єднати їх клеєм або за допомогою столярних з'єднувальних конструкцій.

7. Програми моделювання можуть бути різними, але основний формат для 3D-друку - це STL. Файли STL містять інформацію про геометрію поверхні об'єкта. Перед друком модель перетворюється в G-код. Важливо моделювати об'єкти для 3D-друку в міліметрах або конвертувати в одиниці виміру перед експортом в STL.

Процесу друку передуює обробка тривимірної цифрової моделі за допомогою програми-слайсера. Модель розбивається на шари заданої висоти, розраховується співвідношення товщини сопла та стінок моделі і при необхідності генеруються несучі конструкції, необхідні для друку нависаючих елементів. Програма також розраховує приблизний час друку моделі та витрати пластику; при необхідності може навіть відобразити вартість моделі з урахуванням тарифу на електроенергію і вартості витратних матеріалів; цю функцію можна налаштувати. Будь-яка програма-слайсер дозволяє подивитися на процес побудови моделі «пошарово» і визначити, чи не з'явилися в моделі несподівані артефакти; деякі програми-слайсери самі виправляють невеликі дефекти.

Дана технологія має такі переваги: можна виготовляти конструкції та вироби, які неможливо або дуже дорого виготовити традиційними методами; адитивна технологія дуже гнучка, щоб виготовити ще одну деталь достатньо завантажити в принтер новий файл; переналаштування самого принтера не потрібно; вартість підготовки файлу до друку значно нижче, ніж заміна обладнання; новий продукт розробляється за допомогою 3D-друку швидше і з меншими витратами.

До його недоліків можна віднести: порівняно високу вартість продукту при масовому виробництві; асортимент матеріалів, що використовується у 3D-друці, менше, ніж в традиційному виробництві; проблема міцності та зносостійкості виробів.

Технологія 3D-друку [11 - 13] стрімко розвивається, багато в чому завдяки тому, що принтери RepRap і Mendel Prusa, а також більшість програм-слайсерів

ліцензуються як програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, що дозволяє широкій публіці вносити зміни в конструкцію і розробляти нові матеріали для друку. Він має великі перспективи в основних галузях промисловості, чим більше працівників оволодіють вмінням користуватися 3D-принтером, можливо, тим швидше ця технологія отримає своє широке застосування [10].

Технологія 3D-друку у принтері Ender 3 відома як адитивне виробництво, що завоювала широку популярність в різних областях завдяки своїй універсальності та ефективності.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики Creality Ender 3

Модель принтера	Ender-3
Технологія друку	FDM
Діаметр нитки	1,75 мм
Область друку	220*220*250 мм
Швидкість друку	Максимальна – 180 мм/сек, оптимальна до 60 мм/сек
Роздільна здатність друку	± 0,1 мм
Діаметр сопла	0,4 мм
Температура стола	до 100 °C
Завантаження друку	Друк через USB або SD карту
Формат файлів	STL, OBJ, AMF
Слайсер	Cura, Repetler-Host, simplify-3D
Блок живлення	24v 270w
Вага нетто	6,62 кг
Розміри принтера	440*440*465 мм
Вага брутто	8,1 кг

Наукова основа використання полягає в їх здатності створювати складні 3D-об'єкти шар за шаром з цифрових проектів. Цей процес відрізняється від

традиційних методів субтрактивного виробництва, при яких матеріали видаляються для формування кінцевого продукту.

Одним з найбільш поширених методів 3D-друку є екструзія матеріалу, при якій зв'язка матеріалу (наприклад, пластика або металу) нагрівається і видавлюється через сопло на робочу платформу. Сопло рухається відповідно до цифрових інструкцій з проектування, наносячи матеріал шар за шаром.

Можливість пошарового підходу дозволяє створювати складні геометричні форми, завдяки його високим технічним характеристикам (табл.4.1), при яких можна досягти необхідно результату у процесі моделювання.

Ця лінійка принтерів використовує системи управління, що забезпечують точне нанесення матеріалу і рух друкуючої головки. Дані системи управління зазвичай керується комп'ютером, що забезпечує автоматизацію та повторюваність процесу друку.

Обраний нами 3D-принтер для створення еквівалентного масиву має переваги та недоліки. До переваг можна віднести: низьку собівартість; простоту його складання; компактність; високу якість друку та здатність до модернізації. Щодо недоліків, то це - хитре вирівнювання робочого столу; має проблеми з крихким філаментом та потребує додаткового зчеплення.

Отже, основою правильного створення еквівалентної моделі є розуміння властивостей матеріалів, що використовуються при друці, бо воно має вирішальне значення для досягнення бажаних результатів. Різні матеріали мають свої фізико-механічні властивості, які впливають на придатність кінцевого друкарського об'єкта для його передбачуваного застосування. Разом ці принципи забезпечують перетворюючу силу технології 3D-друку.

4.4. Експериментальні дослідження шаруватого гірського масиву за допомогою еквівалентних матеріалів на пресі

Масив гірських порід являє собою досить складне середовище, в якому при гірничих роботах одночасно відбуваються процеси деформування різного типу: пружні, пружно-пластичні переміщення та руйнування гірських порід з

порушенням суцільності. Тому теоретичні розрахунки деформування гірських порід, міцності та стійкості гірничих виробок для різних конструкцій в масивах гірських порід часто являють собою досить складну задачу. Натурні дослідження характеризуються значною трудомісткістю, високою вартістю і вимагають досить тривалого періоду часу.

Крім того, в натурних умовах можливості варіювання параметрів системи, технології та послідовності гірничих робіт зазвичай досить обмежені, тоді як при лабораторному (фізичному) моделюванні можна простежити вплив основних параметрів в найширших межах.

Метою фізичного моделювання на еквівалентних матеріалах є відтворення на моделі процесу, аналогічного тому, що відбувається в природних умовах. Таким чином, моделювання відкриває можливості для вивчення геомеханічних процесів, які не можуть дати ні аналітичні методи, ні спостереження і вимірювання в природних умовах. У той же час за допомогою моделей неможливо відтворити всі деталі модельованих об'єктів, тому моделювання дозволяє вивчати процеси з певним ступенем спрощення і схематизації природних об'єктів, що істотно полегшує інтерпретацію результатів шахтних спостережень та вимірювання, що дозволяють з більшим ступенем узагальнення простежити і уточнити механізм процесів і максимально повно вивчити вплив поточних факторів на ці процеси.

Однією з переваг методу моделювання на еквівалентних матеріалах є можливість вимірювання показників, що відображають напружено-деформований стан масиву на ділянках, що цікавлять та практично неможливо здійснити в природних умовах через важкодоступність ділянок масиву. За умови дотримання всіх критеріїв подібності для еквівалентних матеріалів і забезпечення геометричної подібності збіг механічних процесів може бути забезпечено за аналогічних граничних умов.

Лабораторний підбір і випробування еквівалентного матеріалу для виготовлення моделей спрямований на пошук пластиків, а саме вуглепластичного волокна та пластику PLA, які не мали б тривалих термінів схоплювання і затвердіння, але забезпечували б схожість з гірськими породами за своїми фізико-

механічними властивостями. При цьому безрозмірні константи - коефіцієнти Пуассона і кути внутрішнього тертя повинні бути чисельно ідентичні в еквівалентному матеріалі і природних гірських породах [4].

Методика фізичного моделювання напружень навколо виробки, включає в себе наступні етапи: підбір еквівалентного матеріалу; приготування еквівалентного матеріалу; формування моделі; навантаження моделі та проведення експериментів.

Тестування еквівалентного матеріалу почалося з перевірки його відповідності основним вимогам моделювання: кількісна схожість фізико-механічних властивостей; якісна відповідність характеру деформації; технологічність за якістю та швидкістю виготовлення; однорідність, міцність і здатність деформувати матеріал по всьому об'єму моделі; сталість властивостей готового матеріалу при зміні умов навколишнього середовища з плином часу та доступність і дешевизна компонентів з еквівалентного матеріалу.

Для адекватних результатів лабораторного дослідження, обраний масштаб геометричного моделювання 1:60. У цьому випадку перетин виробленого простору буде мати максимальний розмір 9 см. Вплив виробленого простору на навколишній масив носить локальний характер. Його невеликий обсяг при дотриманні граничних умов дозволяє сформувати та випробувати велику кількість моделей за досить короткий період часу з мінімальною витратою матеріалів. Основними критеріями вибору еквівалентного матеріалу здійснювався шляхом визначення його міцності на стиск, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. Для коректного дослідження на пресі, були визначені фізико-механічні властивості еквівалентного матеріалу (табл. 4.2) керуючись теорією подібності

Таблиця 4.2 – Основні фізико-механічні параметри натури та еквівалентного матеріалу, отримані на основі подібності Ньютона

Характеристика матеріалу	Натури				Коефіцієнт подібності	Моделі			
	Алевроліт	Аргіліт	Піщаник	Вугілля		Алевроліт	Аргіліт	Піщаник	Вугілля
Гірська порода									
Межа міцності на одновісне стиснення, МПа	16	17	15	13	0,046 – 0,044	0,7	0,75	0,65	0,6
Модуль Юнга, Е, МПа	3,22·10 ⁵				0,013 – 0,093	0,042	0,05	0,060	0,03
Об'ємна маса, γ , т/м ³	3	2,7	4	2	0,62 – 0,73	1,6	1,8	1,7	1,9
Коефіцієнт Пуассона, μ	0,25	0,21	0,26	0,25	1	0,25	0,21	0,26	0,25

Тестування пластику типу PLA та вуглепластичного волокна проводилося на зразках, що мали циліндричну форму перетином 211 мм² та висоту 74 мм, з використанням малогабаритного преса. Ці та попередні дослідження дали змогу зафіксувати відповідні деформації та навантаження на зразках.

Деформаційні властивості еквівалентного матеріалу мають лінійну залежність зі збільшенням зовнішнього навантаження. Для визначення процесу деформації еквівалентного матеріалу приймають середнє значення деформації ряду матеріалів.

4.5 Вибір робочого матеріалу та постановка задачі розрахунків

Керуючись потребами моделювання, які зазначені вище, будемо розглядати два матеріали, з яких будуть виготовлятися моделі: вуглепластичне волокно та пластик типу PLA. Матеріали подаються в канал, де вони прогріваються до відповідної температури і частково плавляться та виходять з тонкого каналу насадки на виріб, що друкується.



Рисунок 4.1 – Матеріали для виготовлення еквівалентної моделі (вуглепластичне волокно та пластик PLA)

Ці два види пластику неможливо використовувати для створення моделі без впливу температури. Під ними варто розуміти суміш матеріалів, які мають необхідні властивості до затвердіння під дією часу та температури. Пластики можуть бути використані без підігріву, так як в окремих випадках температурний режим використовується як регулюючий фактор, який дозволяє забезпечити необхідну витрату матеріалу та його консистенцію.

Основою роботи 3D-принтеру Ender для тривимірного друку є подача та нагрів робочого тіла, яким, в нашому дослідженні є пластик PLA та вуглепластичне волокно, які мають певні властивості. Найважливішою складовою процесу друку до якого потрібно звернути особливу увагу це перехід робочого матеріалу до розплавленого стану та відстежувати його течію в каналі з урахуванням звуження насадки та кінцевий стан на виході.

Для коректного моделювання еквівалентного масиву, необхідно виконати основні етапи послідовності 3D друку у лабораторних умовах:

Етап 1. Створення цифрової моделі

Процес 3D-друку починається з розробки віртуальної 3D-моделі майбутнього об'єкта в 3D-редакторі або CAD-програмі (3D Studio Max, AutoCAD, Compass або SolidWorks). Просту модель може створити будь-який користувач, що володіє навичками роботи з персональним комп'ютером та стандартними пакетами прикладних програм.

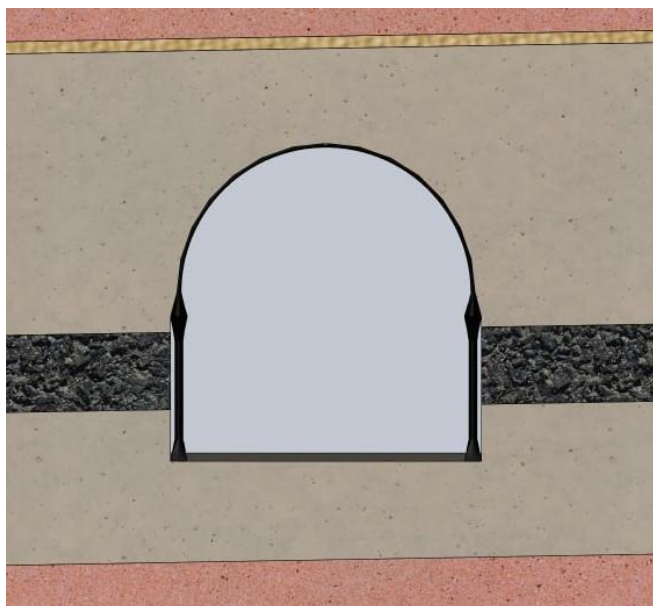


Рисунок 4.2 – Віртуальна 3D-модель створена у програмному продукті SolidWorks

Створення віртуальної моделі майбутнього об'єкта займає від декількох хвилин до декількох днів, залежно від ступеня складності моделі.

Етап 2. Експорт 3D-моделі у формат STL

Після завершення моделювання слід перетворити отриманий файл у формат STL, який розпізнається більшістю сучасних 3D-принтерів. Для цього необхідно вибрати «Зберегти як» або «Імпорт/Експорт» залежно від програми, яку використовуємо.

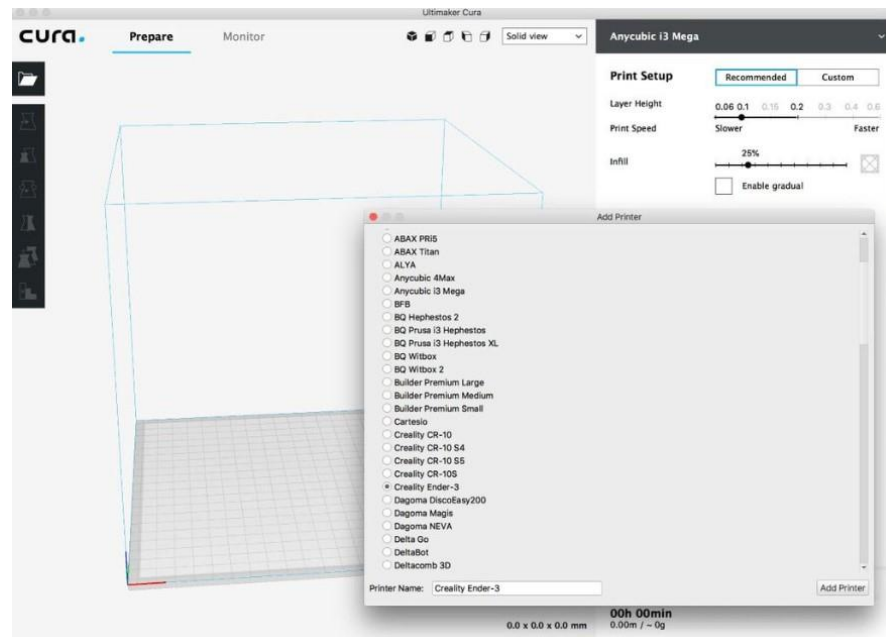


Рисунок 4.3 – Експорт файлу в STL формат

Перед експортом файлу необхідно вказати рівень деталізації моделі або її поділ на трикутники. Якщо вибрати варіант «Точно», то розбиття буде щільним, готовий файл займе достатньо місця на жорсткому диску комп'ютера і буде довше оброблятися спеціальним програмним забезпеченням, але користувач отримає об'єкт з високою якістю.

Якщо вибрати варіант «Грубо», то розбиття буде менш щільним або не щільним взагалі, готовий файл буде займати менше місця на жорсткому диску і швидше оброблятися в спеціальній програмі, але якість зовнішніх поверхонь буде істотно нижче, ніж при тонкому дробленні.

Етап 3. Генерація G-коду

STL-файл з майбутнім об'єктом обробляється спеціальною програмою-слайсером, яка перетворює його в керуючий G-код для 3D-принтера. Якщо модель не нарізана, 3D-принтер її не розпізнає. Серед найбільш популярних програм нарізки – Kisslicer та Slic3r.

Етап 4. Підготовка 3D-принтера до роботи

На етапі підготовки 3D-принтера з технологією FDM-друку до роботи слід наклеїти на робочу платформу спеціальну самоклеючу плівку або нанести на

платформу клей та завантажити в спеціальний відсік катушку з полімерними нитками.

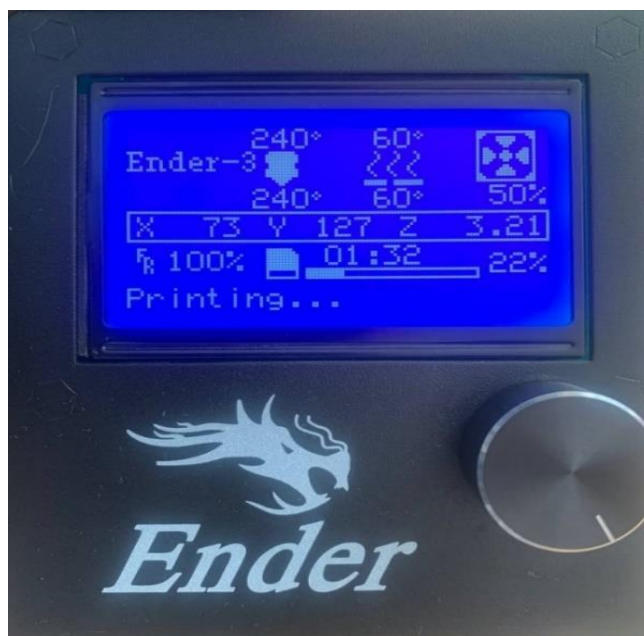


Рисунок 4.4 – Енкодер, здатний задавати параметри для початку друку

Етап 5. Друк 3D-об'єкта

Найбільш важливими елементами 3D-принтера є робоча платформа і друкуюча головка. Готовий об'єкт формується на робочій платформі. Під час роботи платформа/головка переміщається вниз або вгору (в залежності від типу принтера) по осі Z. Друкуюча головка видавлює розплавлену полімерну нитку на робочу платформу, шар за шаром формуючи готовий об'єкт. Головка переміщується по осях X, Y або X, Y і Z, залежно від кінематики 3D-принтера.



Рисунок 4.5 – Процес друку еквівалентних деталей на принтері

Сам процес 3D-друку досить простий. Друкуюча головка видавлює перший шар розплавленого пластика в робочу зону, після чого платформа опускається на товщину шару та починається формування наступного шару, який буде накладатися поверх попереднього. Після завершення друку кожного шару платформа опускається вниз, це відбувається протягом усього циклу друку, поки на платформі не з'явиться готовий об'єкт.

Етап 6. Фінішна обробка об'єкта

Після завершення друку більшість 3D-моделей мають підтримуючі елементи, які необхідно обережно видалити за допомогою кусачок.



Рисунок 4.6 – Готові еквівалентні моделі для лабораторного дослідження на пресі

Підбравши відповідні еквівалентні матеріали, які включали весь спектр фізико-механічних властивостей, котрі досліджувались при аналітичному та комп'ютерному моделюванні відобразили у лабораторному дослідженні за допомогою пресу та розмірної сітки.

Метою цього дослідження було визначення зміщень еквівалентних шарів порід під дією навантаження для підтвердження результатів математичного моделювання та можливого застосування нового виду арочного вуглепластичного кріплення різного геометричного перерізу для вирішення проблеми нерівномірного

розподілу тиску навколо виробки у складних гірничо-геологічних умовах шахт Західного Донбасу.

Кожний отриманий еквівалентний матеріал перевіряли на відповідність [14-15] основним характеристикам міцності та теорії подібності, а масив гірських порід повинен був виконати такі умови подібності пружної деформації гірських порід:

$$E_M = \frac{\gamma_M l_M}{\gamma_n l_n} E_n, \quad (4.1)$$

$$\nu_M = \nu_n,$$

де E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуасона.

Для відповідності подібності пластичної деформації масиву порід виконуємо наступну умову

$$\frac{\varepsilon_{n,m}}{(\varepsilon_{np} + \varepsilon_n)_m} = \frac{\varepsilon_{n,n}}{(\varepsilon_{np} + \varepsilon_n)_n} \quad (4.2)$$

При цьому

$$(\varepsilon_{np} + \varepsilon_n) = f(\sigma), \quad (4.3)$$

де ε_n та ε_{np} – пластична та пружна відносні деформації.

Навантаження моделі проводили на пресі, який повністю задовольняє вимогам моделювання на еквівалентних матеріалах.

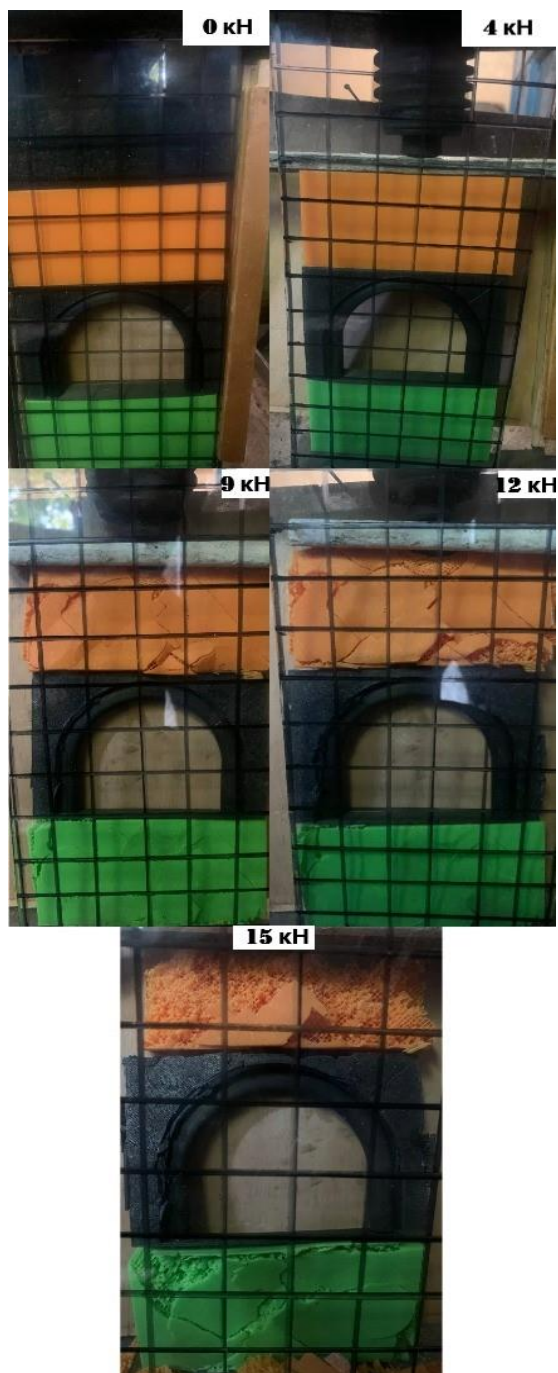


Рисунок. 4.7 – Деформації еквівалентної моделі шаруватого масиву з прикладеним навантаженням від 0 до 15 кН

Він являє собою систему важелів та монтажних гвинтів, які повністю затискають модель. Для безпеки проведення експерименту використовували оргскло товщиною 30 мм.

Після повного формування моделі на протязі години прикладали навантаження в такі послідовності: 1) 0 кН; 2) 4 кН; 3) 9 кН; 4) 12 кН та 5) 15 кН, що відповідають реальним умовам навантажень за визначений відрізок

часу. Для того, щоб зафіксувати результати зміщень еквівалентної моделі на поверхню скла було нанесено прямокутну розмірну сітку з розміром комірок 20x20 мм. В центрі моделі була відображена виробка з арочним вуглепластичним кріпленням пропорційного розміру.

Навантаження задавалось відповідно з розташуванням геометричного центру з інтервалом 700 Н. Кожні 30 хвилин, спостерігали за розвитком деформацій за мірної сіткою, реєстрували тріщини та зміщення на фотоапарат. Він був встановлений в одному положенні на весь час експерименту. Заключним етапом у дослідженні була побудова залежності (рис. 4.8), яка якісно відображала поведінку породного масиву навколо виробки у еквівалентних умовах.

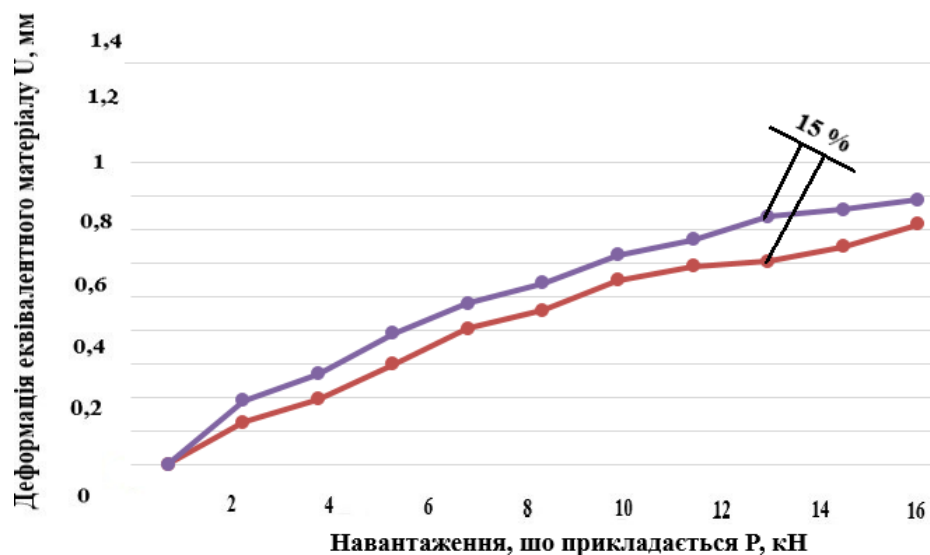


Рисунок 4.8 – Залежність деформації еквівалентного матеріалу при збільшенні навантаження, що прикладається (фіолетова лінія – лабораторні, червона лінія – математичні дослідження, відповідно)

Отримана залежність показала значення притаманні для умов шахт Західного Донбасу, так як розбіжність лабораторних та математичних досліджень склала 15 % [17] та підтвердила доцільність використання арочних вуглепластичних кріплень у складних гірничо-геологічних умовах.

Доказом того, що наше дослідження було коректним є робота [16] у якій було отримано залежності зміщень контуру виробки з обраних еквівалентних

матеріалів, що були навантаженні пресом. За результатами досліджень побудовані залежності зміни висоти та ширини виробки від величини вугільного цілика.

Дослідження [18] показало, що наявність проміжку між литими смугами призводить до руйнування бічних сторін кожної зі смуг. Це призводить до руйнування більш слабкої по відношенню до діючої на неї навантаженні смуги.

Адекватність результатів отриманих нами у ході лабораторного дослідження деформування приконтурного масиву на еквівалентних матеріалах підтверджується наявними дослідженнями для умов шахт Західного Донбасу. А саме, у роботі [17] на рисунку 4.9 досліджувався шаруватий масив шахти «Комсомолець Донбасу», де дослідники за допомогою еквівалентних матеріалів отримали залежності зміщень контуру виробки зі збільшенням величини навантаження на масив.

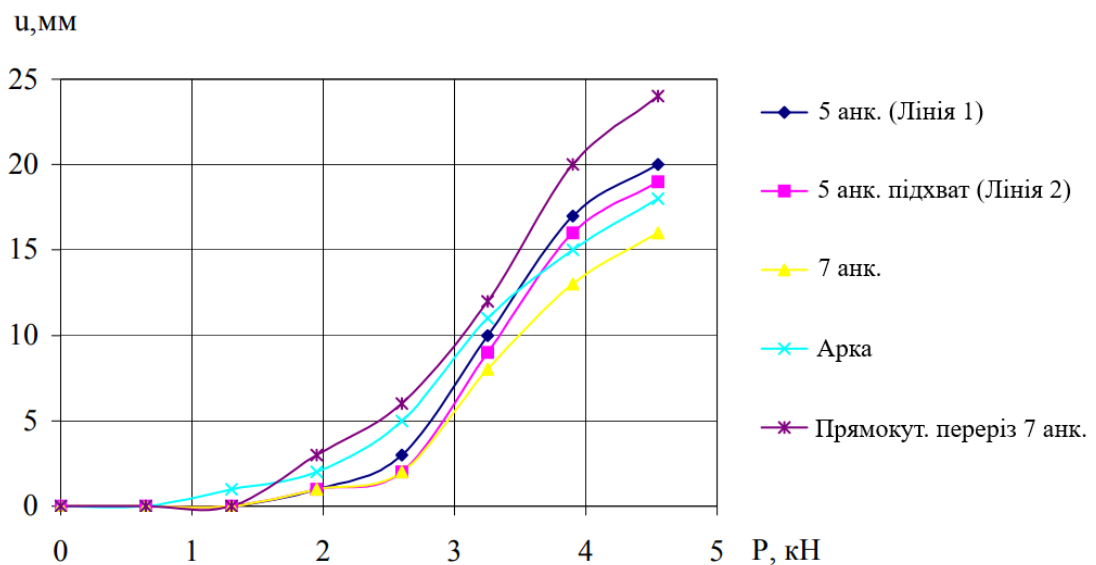


Рисунок 4.9 – Залежність зміщення покрівлі виробки від величини навантаження при різних видах кріплення та формах поперечного перерізу [18]

Порівнюючи результати наших досліджень та вищезгаданих вони є коректні та правильні. Сукупний аналіз отриманих досліджень дав змогу сформуванати наступні висновки:

1) Зміщення контуру виробки виявляється не відразу після установки постійного кріплення, а через деякий проміжок часу, який визначається, в першу чергу, стійкістю кріплення та міцністю навколишнього масиву.

2) Еквівалентність моделі була підтверджена, тим що в деяких моментах дослідження суперечили чисельним геомеханічним даним у цьому напрямі.

3) Отримані закономірності розподілу напружено-деформованого стану шаруватого масиву з використанням сталі Ст.5 показали нерівномірний розподіл тиску навколо виробки та підтвердили необхідність використання нового виду кріплення – вуглепластичного.

4) В складних гірничо-геологічних умовах Західного Донбасу арочне вуглепластичне кріплення забезпечило різке уповільнення процесів зміщень порід покрівлі та значно зменшило величину зміщень як на контурі, так і в глибині масиву. З цього слідує також рівномірний розподіл тиску навколо підготовчої виробки.

5) Аналітичні, математичні та лабораторні дослідження дали змогу сформуванати залежності, які відображали зменшення тиску по всьому контуру виробки на 30% та уповільненню здибання порід у підшві при використанні вуглепластичного кріплення

На основі проведених досліджень деформаційних процесів навколо підготовчої виробки були встановлені закономірності зміни НДС масиву в залежності від використовуваної системи кріплень, що дозволило для умов шахт Західного Донбасу визначити раціональні параметри нового виду кріплення для запобігання негативного впливу гірського тиску в зоні дії очисних робіт. Раціональні параметри арочного вуглепластичного кріплення є достатніми для підтримки підготовчих виробок у складних гірничо-геологічних умовах на глибині видобутку до 500 метрів в експлуатаційному стані.

Висновки до розділу 4

1. Встановлено, що за допомогою методу фізичного моделювання проявів гірського тиску, за умови дотримання критеріїв подібності всебічно буде вивчено механізм деформації товщі порід навколо підготовчої виробки у взаємодії з вуглепластичним кріпленням.

2. Визначено, що для коректного проведення лабораторного дослідження необхідно керуватись законами теорії подібності, враховуючи основні фізико-механічні характеристики деформації моделі з вуглепластику та PLA: модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, міцність на стиск та розтяг, кут тертя та зчеплення. Результати експериментальних досліджень показали, що завдяки композитному кріпленню тріщинуватість та зміщення контуру виробки зменшились на 20 %.

3. З'ясовані залежності деформації у шарах порід при збільшенні навантаження з певним періодом часу. Інтенсивність нерівномірного розподілу напружень σ навколо виробки вдалось зменшити за рахунок нового виду кріплення.

4. Отримані залежності взаємодії арочного вуглепластичного кріплення з шаруватим масивом не мали розбіжностей з подібними проблемами досліджень у галузі геомеханіки, а його використання є реальним для умов шахт Західного Донбасу.

5. Очікуваний економічний ефект за використання арочних вуглепластичних кріплень при видобутку вугілля для умов шахт Західного Донбасу складе 650 000 грн для підготовчої виробки довжиною 600 метрів [Додаток Г].

Перелік використаних у розділі 4 джерел

1. Fu, H., Wang, S., Pei, X., Chen, W. (2019). Indices to Determine the Reliability of Rocks under Fatigue Load Based on Strain Energy Method. *Appl. Sci.*, 9, 360. [CrossRef]
2. X. Wang, J., Xie, J. (2021). Effects of Coal Mining Height and Width on Overburden Subsidence in Longwall Pier-Column Backfilling. / *Applied Sciences*. Vol. 11. 3105. URL : <https://doi.org/10.3390/app11073105>
3. Guodong, L., Shugang, L., Feng, L. (2018). Research on mining-induced deformation and stress, insights from physical modeling and theoretical analysis. *Arabian Journal of Geosciences*. 11:100. URL: <http://doi.org/10.1007/s12517-018-34229>
4. Zhao H. (2019). State-of-the-art of standing supports for gob-side entry retaining technology in China. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 119(11), P. 891 906. URL: <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/17/449/2019>
5. Konieczky, H., Ismael, M.A. (2017). Failure criteria for rocks – an introduction. Freiberg: *Geotechnical Institute TU Bergakademie Freiberg* — 20 p.
6. Symanovych, H., Odnovol, M., Yakovenko, V. (2023). Assessing the geomechanical state of the main working network state in the case of undermining in the conditions of weak rocks. *Mining of Mineral Deposits*. Vol. 17. P 91 – 98. URL: <https://doi.org/10.33271/mining17.02.091>
7. Tiutkin, N., Petrosian, A., Radkevych, A. (2019). Regularities of stress state of unsupported working occurring in a layered massif. Essays of mining science and practice (Scopus): International Conference // *E3S Web of Conferences* 109, 00100. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100>
8. Liu, J., Feng, X.T., Ding, X.L. (2023). Stability Assessment of the Three-Gorges Dam Foundation, China, Using Physical and Numerical Modeling. Part I: Physical Model Tests. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 40, N 5 609 – 631.
9. Огляд технологій 3D-друку.- Режим доступу: <http://www.orgprint.com/ru/wiki/obzor-tehnologij-3D-pechati>

10. Шатов, А. *Економічний прогноз про майбутнє індустрії 3D-друку від Freedomia Group*. - Режим доступу: <http://3dwiki.ru/ekonomicheskij-prognoz-na-budushheeindustrii-3d-pechati-ot-freedomia-group/>

11. Shi, X.M., Liu, B.G., Xiang, Y.Y., Qi, Y. (2018). A Method for Selecting Similar Materials for Rocks in Scaled Physical Modeling Tests. *Journal of Mining Science*. Vol. 54, N 6. 938 948.

12. Figovsky, O., Shteinbok, A. (2023). Some of the Most Innovative 3D Printing Additive Manufacturing Technologies, *Additive Manufacturing*.

13. Liu, T., Wu, C., & Wang, C. (2021). 3D printing in construction: current status, implementation hindrances, and development agenda. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-12

14. Ковалевська, І.А., Почепов, В.М., Мамайкін, О.Р., Ковалевська І.А. (2009). Експериментальні дослідження переміщень опору стійок кріплення пластової виробки // *Школа підземної розробки: матеріали III міжнарод. наук.-практ. конф.* - Д.: ЛізуновПрес, 2009. - С. 392 - 397.

15. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А. (2015). Взаємодія вантажонесучих елементів кріпильної системи виїмкових виробок «масив - рама - анкер» - *Д.: Літограф*, 2015. - 214 с.

16. Зюков, Ю.Є. (2008). Визначення раціональних параметрів вугільних ціликів на моделях з еквівалентних матеріалів. *GROUND CONTROL IN MINING*, №16.

17. Kovalevska, I.A, Bondarenko, V.I, Symanovych, H. A, Sheka, I.V & Tsivka, Ye.S. (2023). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. *15th ISRM Congress*, Salzburg, Austria, October 2023. <https://onepetro.org/isrmcongress/proceedings-abstract/CONGRESS23/All-CONGRESS23/540051>

18. Терещук, Р.М., Лозовський, С.П. (2014). *Стійкість підготовчих виробок з нестійким ґрунтом в зоні впливу очисних робіт: монографія*; М-во освіти і науки України; Нац. гірн. ун-т. - Д.:НГУ - 104 с.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науковою роботою, у якій на підставі теоретичних висновків та результатів експериментальних досліджень є нове вирішення важливої науково-технічної задачі підвищенні стійкості шаруватого масиву навколо підготовчої виробки у шаруватому масиві слабометаморфізованих порід шляхом застосування арочного вуглепластичного кріплення для шахт Західного Донбасу.

За результатами відображених у роботі досліджень сформовані такі висновки:

1. Виконано аналіз різновидів та фізико-механічних властивостей композитних матеріалів, щодо їх використання у гірничодобувній промисловості. Одним з них є вуглепластик, який завдяки своїм властивостям та конструктивним особливостям здатний зменшити інтенсивність напружень навколо підготовчої виробки слабометаморфізованих порід Західного Донбасу.

2. Розроблено просторову модель взаємодії шаруватого масиву, гірничої виробки та кріплень вуглепластиків різної форми перетину у програмному продукті SolidWorks. Проведено серію досліджень НДС масиву та кріплення за допомогою МСЕ. Це дослідження дало змогу виявити деформації шаруватих порід навколо підготовчої виробки та обрати раціональні параметри кріплень у заданих умовах.

3. Розроблено методику проведення обчислювального експерименту з використанням методу скінченних елементів з вивчення інтенсивності напружень у шаруватому масиві слабометаморфізованих порід навколо контуру підготовчої виробки, використання, якої дозволило отримати найбільш достовірні результати розрахунку напружено-деформованого стану масиву.

4. Вперше розроблено фізичні моделі вуглепластичного кріплення та шаруватого масиву у лабораторних умовах за допомогою 3Д-принтера Ender. Дослідження моделі на пресі показало залежності деформації у шарах порід при збільшенні навантаження з певним періодом часу.

5. Вперше розроблена математична модель рівномірного арочного вуглепластичного кріплення змінного перетину, завдяки якому інтенсивність напружень σ навколо виробки вдалось зменшити за рахунок можливості збільшувати діаметр та форму елементів кріплення в зонах найвищого тиску.

6. За результатами математичного та лабораторного дослідження розроблено методику розрахунку кріпильної системи дільничих виробок шахт Західного Донбасу.

7. Розроблено методику розрахунку економічної ефективності використання арочних вуглепластичних кріплень, яка дозволяє врахувати техніко-економічні параметри для майбутніх видобувних робіт на шахтах Західного Донбасу.

8. Очікуваний економічний ефект за використання арочних вуглепластичних кріплень при видобутку вугілля для умов шахт Західного Донбасу складе 650 000 гривень для підготовчої виробки довжиною 600 метрів.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
АРОЧНЕ КРІПЛЕННЯ





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **148395** (13) **U**

(51) МПК

E21D 11/14 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ(21) Номер заявки: **u 2020 08272**(22) Дата подання заявки: **23.12.2020**(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: **05.08.2021**(46) Публікація відомостей
про державну
реєстрацію: **04.08.2021, Бюл.№ 31**

(72) Винахідник(и):

**Цівка Євгеній Сергійович (UA),
Бондаренко Володимир Ілліч (UA),
Ковалевська Ірина Анатоліївна (UA),
Шека Іван Валерійович (UA)**

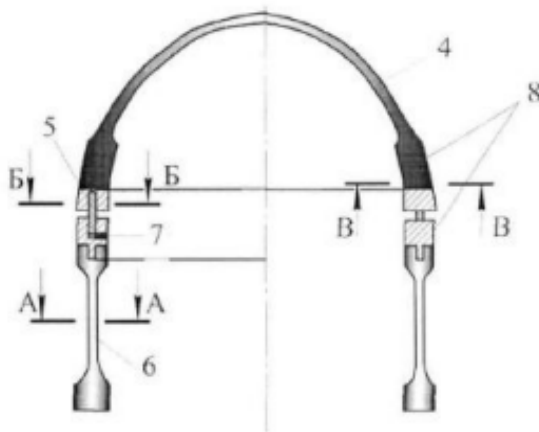
(73) Володілець (володільці):

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ "ДНІПРОВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА",
просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро,
49000 (UA)**

(54) АРОЧНЕ КРІПЛЕННЯ

(57) Реферат:

Арочне кріплення містить верхняк, з'єднаний вузлами піддатливості зі стійками. Стійки та верхняк мають змінний профіль із композитного матеріалу, а вузли піддатливості виконані у вигляді циліндра, що заповнений пластичним матеріалом штокоподібної форми, з можливістю переміщення верхняка рами у вертикальній площині та демпфірування кріплення.



Фіг. 1

UA 148395 U

UA 148395 U

Корисна модель належить до гірничої промисловості, зокрема до конструкції кріплення гірничих виробок, які споруджуються в складних гірничо-геологічних умовах, викликаних високим гірничим тиском.

5 Відоме металеве арочне податливе кріплення [RU, патент № 2029871, С1, E21D11/14, заявл. 28.11.91, опубл. 27.02.95, бюл. № 6], що включає сполучені між собою рами, кожна з яких складається з криволінійних верхняка і стояків, виконаних з металевого шахтного спецпрофілю і сполучених між собою вузлами піддатливості, утвореними зв'язаними внапусток кінцевими частинами верхняка і стояків та скріплені між собою замками.

10 Недолік: недостатня несуча здатність кріплення і стійкість відносно криво направлених навантажень, у вузлах піддатливості та конструкції кріплення, не забезпечуються достатні значення робочого опору.

Найбільш близьким аналогом є відоме металеве арочне піддатливе кріплення, що містить з'єднані між собою рами, кожна з яких містить скріплені вузлами піддатливості, утвореними з верхняком та стійками, виготовлені із шахтного спецпрофілю і з'єднані між собою вузлами піддатливості, утвореними зв'язаними внапусток кінцевими частинами верхняка і стояків і скріплені між собою замками [UA, патент № 52340, 6 E21D11/14, заявл. 11.04.2002, опубл. 17.01.2005, бюл. № 1].

20 Недоліки: досить висока трудоемність виконуваних робіт за рахунок великої ваги конструкції, замалі темпи проведення виробки. Недостатня величина конструктивної піддатливості, що після вичерпання до блокування вузла піддатливості і кріплення в жорсткий режим роботи із можливістю його подальшої деформації. Ще одним недоліком цієї конструкції є трудомісткість виготовлення конструктивних елементів і складність зведення її в гірничих виробках.

25 В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалення арочного кріплення, в якому введенням нових конструктивних елементів та їх взаємозв'язку досягається можливість демпфірування за рахунок іншої взаємодії верхняка та стійок при полегшенні конструкції та зменшення напружень навколо контуру кріплення, особливо в складних гірничо-геологічних умовах і за рахунок цього зменшується трудоемність з прискоренням часу технологічних робіт та безпеки праці.

30 Поставлена задача вирішується тим, що арочне кріплення, що містить верхняк, з'єднаний вузлами піддатливості зі стійками, згідно з корисною моделлю, стійки та верхняк мають змінний профіль із композитного матеріалу, а вузли піддатливості виконані у вигляді циліндра, що заповнений пластичним матеріалом штокоподібної форми, з можливістю переміщення верхняка рами у вертикальній площині та демпфірування кріплення.

Корисна модель, що заявляється, представлена на кресленнях:

35 на Фіг. 1 наведено загальний вигляд арочного кріплення із композитного матеріалу, де 1 - сталь Ст.5, 2 - композитний матеріал, 3 - пластичний матеріал, 4 - верхняк змінного перерізу, 5 - металевий штокоподібний стержень, 6 - стійка змінного профілю, 7 - дросельний отвір, 8 - вузол піддатливості;

на Фіг. 2 наведено переріз вузла піддатливості кріплення;

40 на Фіг. 3 приведений переріз збільшення діаметра кріплення;

на Фіг. 4 приведений переріз стандартного діаметра кріплення.

45 Арочне кріплення (див. Фіг. 1) складається з верхняка змінного перерізу 4 арочної форми, в який вмонтовано центральний металевий штокоподібний стержень 5 вузла піддатливості, що з'єднується зі стійками змінного перерізу 6, в яких розміщені стакани циліндричної форми, заповнені парафіном 3. При спрацюванні кріплення зі стійок 6 у циліндрі через дросельний отвір 7 можливе витікання парафіну.

Для встановлення арочного кріплення необхідно використати дві стійки змінного перерізу 6, які мають стакани циліндричної форми, заповнені парафіном 3 та з'єднуються з верхняком змінного перерізу 4, в якому вмонтовані металеві штокоподібні стержні 5.

50 Дана корисна модель реалізується під час виникнення навколо гірничої виробки зони непружних деформацій, коли відбувається всебічне обтиснення кріплення порушеними породами. Тиск порід, з боків, сприймається стійками змінного перерізу 6. Тиск порід, з боку покрівлі, сприймається верхняком змінного перерізу 4. Даний профіль контуру рами кріплення має арочну форму зі змінним перерізом, який забезпечує підвищену несучу здатність кріплення від вертикальних та горизонтальних напружень та в зонах, де виникає нерівномірний розподіл тиску, має збільшений діаметр перерізу і таким чином відбувається рівномірний розподіл тиску зі збереженням демпфірування та піддатливості конструкції. Також досягається необхідна геомеханічна рівновага системи "кріплення-масив", яка забезпечується силами опору вузлів піддатливості, тобто підвищеним робочим опором, що реалізується на основі підвищення несучої здатності вдосконаленої конструкції кріплення.

UA 148395 U

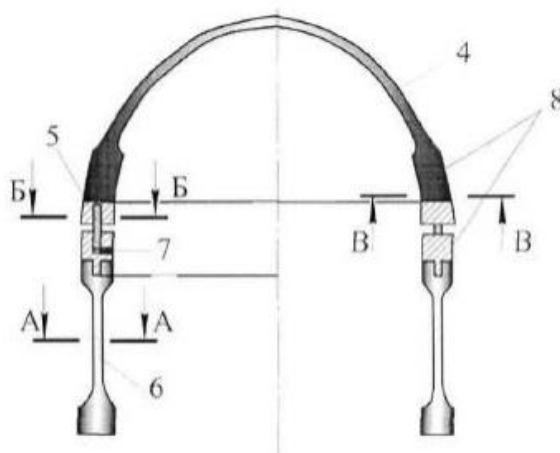
Арочне податливе кріплення зі змінним перерізом з використанням композитного матеріалу, що пропонується, може бути виготовлене в умовах виробництва композитних матеріалів (наприклад, вуглепластик) і може знайти своє застосування на шахтах Західного Донбасу в складних гірничо-геологічних умовах.

5

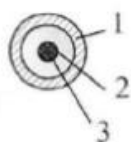
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Арочне кріплення, що містить верхняк, з'єднаний вузлами піддатливості зі стійками, яке відрізняється тим, що стійки та верхняк мають змінний профіль із композитного матеріалу, а вузли піддатливості виконані у вигляді циліндра, що заповнений пластичним матеріалом штокоподібної форми, з можливістю переміщення верхняка рами у вертикальній площині та демпфірування кріплення.

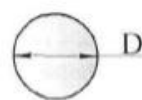
10



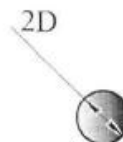
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК Б
ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
АРОЧНЕ ПІДДАТЛИВЕ КРІПЛЕННЯ





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **148329** (13) **U**

(51) МПК

E21D 11/14 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

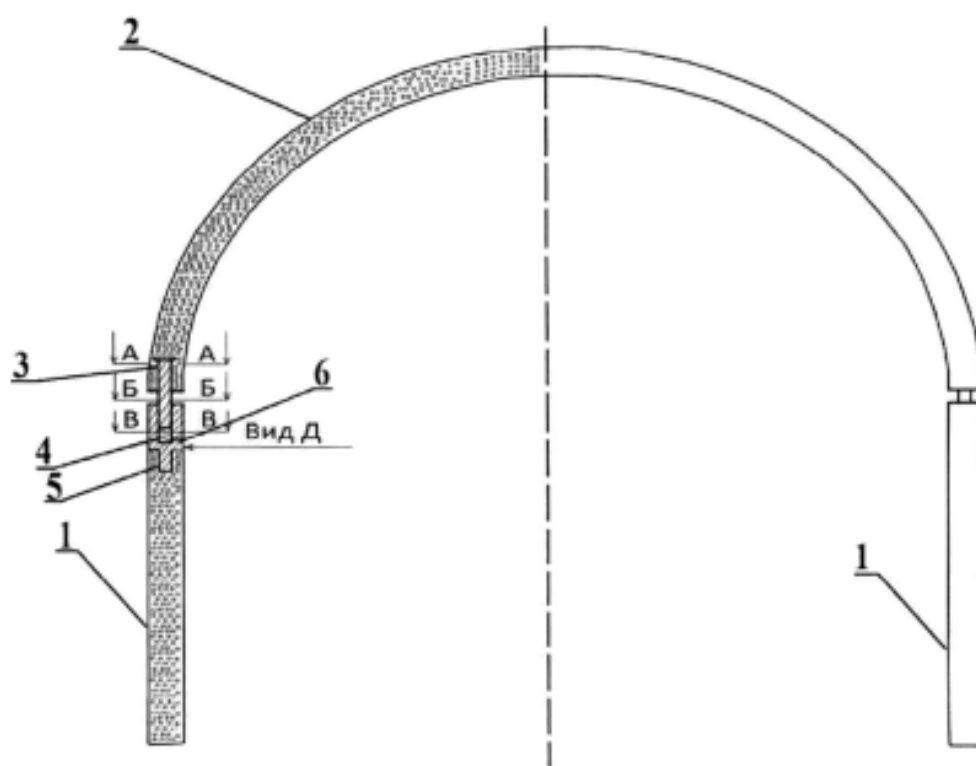
<p>(21) Номер заявки: u 2020 08107</p> <p>(22) Дата подання заявки: 18.12.2020</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 29.07.2021</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 28.07.2021, Бюл.№ 30</p>	<p>(72) Винахідник(и): Бондаренко Володимир Іллч (UA), Шека Іван Валерійович (UA), Ціпка Євген Сергійович (UA), Ковалевська Ірина Анатоліївна (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА", просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000 (UA)</p>
---	---

(54) АРОЧНЕ ПІДДАТЛИВЕ КРІПЛЕННЯ**(57) Реферат:**

Арочне піддатливе кріплення містить верхняк, з'єднаний через вузли піддатливості зі стояками. Верхняк та стояки із вузлами піддатливості виконані круглим перерізом ідентичного профілю із композитних матеріалів. Кожен вузол піддатливості виконаний у вигляді циліндра, заповненого пластичним матеріалом, з можливістю переміщення верхняка у вертикальній площині, та можливістю демпфування кріплення.

UA 148329 U

UA 148329 U



Фиг. 1

UA 148329 U

Корисна модель належить до гірничої промисловості і може бути використана для кріплення гірничих виробок у процесі їх спорудження і експлуатації в умовах надглибоких горизонтів ($H > 1000$ м).

5 Відоме рамне металеве піддатливе кріплення, яке виконане із сталі та містить верхняки, стійки, поздовжні або поперечні лежні і вузли їх з'єднань. З'єднання стійок з лежнями виконані твердими (патент України № 6627 МПК: E21D 11/34, публ. 1994).

10 Проте, відоме металеве піддатливе кріплення має недоліки: недостатня величина піддатливості, що обумовлюється деформацією кріплення та переходу його в жорсткий режим роботи, досить велика вага конструкції.

15 Найбільш близьким аналогом є металеве арочне піддатливе кріплення, яке виконане із сталі та має з'єднані між собою багатоланкові рами, кожна з яких містить скріплені вузлами піддатливості верхняк і стійки, виготовлені із шахтного спецпрофілю і виконані з криволінійними частинами і прямолінійними кінцевими частинами, з'єднаними внапуск у вузлах піддатливості за допомогою замків так, що верхняк охоплює стояки (патент України № 20823, МПК: E21D 11/14, публ. 2007).

20 Недоліками відомого металевого арочного піддатливого кріплення є досить висока трудоемність виконуваних робіт за рахунок великої ваги конструкції, замалі темпи проведення виробки. Недостатня величина конструктивної піддатливості, що веде до подальшого блокування вузла та кріплення переходить в жорсткий режим роботи із можливістю його подальшої деформації.

25 В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення відомого арочного піддатливого кріплення, в якому введенням нових конструктивних елементів та їх взаємозв'язком досягається можливість демпфування арочного кріплення шляхом значно більш рівномірного розподілу напруження між верхняком та стійкою та зменшення напруження навколо контуру кріплення, і за рахунок цього зменшується трудоемність з прискоренням часу технологічних робіт та безпеки праці при полегшенні конструкції.

30 Поставлена задача вирішується тим, що у відомому арочному кріпленні верхняк та стійки із вузлами піддатливості виконані круглим перерізом ідентичного профілю із композитних матеріалів, причому кожен вузол піддатливості - у вигляді циліндра, заповненого пластичним матеріалом з можливістю переміщення верхняка у вертикальній площині та можливістю демпфування кріплення.

Корисна модель, що заявляється, представлена на кресленнях:

35 на Фіг. 1 загальний вигляд арочного піддатливого кріплення із композитних матеріалів, де 1 - стійка, 2 - верхняк, 3 - металевий шток, 4 - пластичний матеріал; 5 - металевий стакан; 6 - дросельний отвір;

40 на Фіг. 2 поперечні перерізи арочного піддатливого кріплення із композитних матеріалів, де 7 - сталь, 8 - композитний матеріал, 9 - пластичний матеріал; на Фіг. 3 вигляд дросельного отвору, через який буде виходити пластичний матеріал.

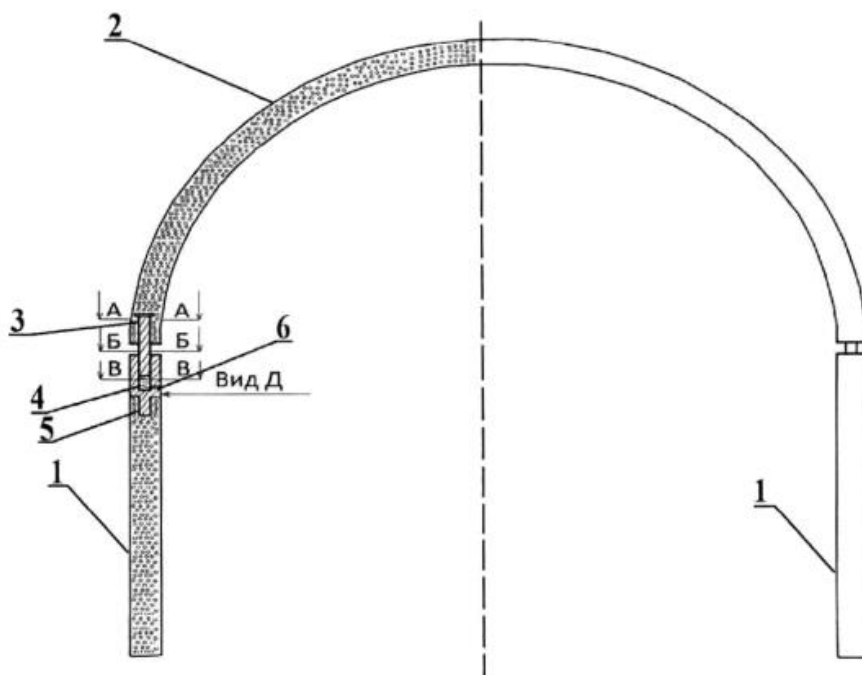
45 Корисна модель (див. Фіг. 1) реалізується наступним чином: спочатку встановлюють стійки 1 та зводять верхняк 2 арочної форми круглого перерізу, виконані з вуглепластику, у верхняк 2 вмонтовується металевий шток 3, який пропускається у металевий стакан 5, вмонтований у стійку 1, в якому міститься пластичний матеріал 4, який буде виходити через дросельний отвір 6. Піддатливий режим починає працювати в складних гірничо-геологічних умовах. Верхняк 1 з вмонтованим металевим штоком 3 починає просідати, пластичний матеріал 4 починає текти та виходити через дросельний отвір 6. Арочне кріплення починає працювати в піддатливому режимі в умовах вельми великих напружень та є можливість витікання пластичного матеріалу 4 через дросельний отвір 6, коли конструкція починає демпфувати, а металевий шток 3 опускається уздовж стійки 1. Це супроводжується більш рівномірним розподілом напруження між верхняком 2 та стійкою 1, що разом з фактором ідентичного профілю сприяє більш рівномірному напруженню по контуру кріплення. Облегшення конструкції арочного кріплення із композитних матеріалів також впливає на зменшення трудомісткості в процесі послідовного кріплення. Вага кріплення зменшується в 5-6 разів, що пов'язано з послідовним переносом роботи зміни, зниженням витрат часу на монтаж та демонтаж, а також безпекою праці шахтарів.

55 Арочне піддатливе кріплення з використанням композитних матеріалів, що пропонується, може бути виготовлене в умовах виробництва композитних матеріалів (наприклад, вуглепластику) та може знайти своє застосування для виробок вугільних шахт в складних гірничо-геологічних умовах.

UA 148329 U

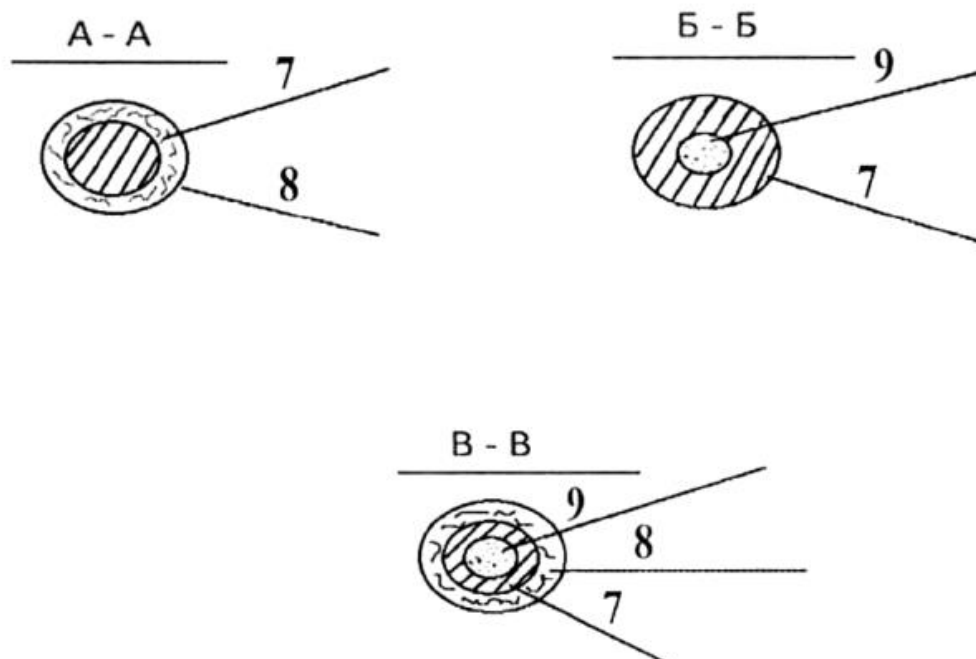
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Арочне піддатливе кріплення, що містить верхняк, з'єднаний через вузли піддатливості зі стояками, яке **відрізняється** тим, що верхняк та стояки із вузлами піддатливості виконані круглим перерізом ідентичного профілю із композитних матеріалів, причому кожен вузол піддатливості - у вигляді циліндра, заповненого пластичним матеріалом, з можливістю переміщення верхняка у вертикальній площині та можливістю демпфування кріплення.

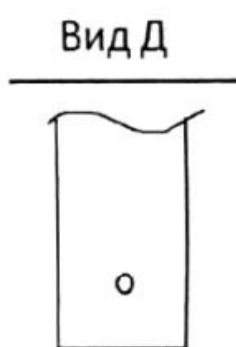


Фіг. 1

UA 148329 U



Фіг. 2



Фіг. 3

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК В
ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
КІЛЬЦЕВЕ ПІДДАТЛИВЕ КРІПЛЕННЯ





УКРАЇНА

(19) UA (11) 151958 (13) U

(51) МПК
E21D 11/14 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

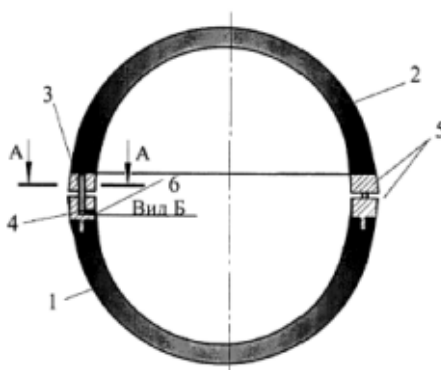
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2022 01449	(72) Винахідник(и): Бондаренко Володимир Ілліч (UA), Шека Іван Валерійович (UA), Ковалевська Ірина Анатоліївна (UA), Мамайкін Олександр Рюрикович (UA), Ціпка Євген Сергійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 05.05.2022	(73) Володілець (володілці): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА", просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 06.10.2022	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 05.10.2022, Бюл. № 40	

(54) КІЛЬЦЕВЕ ПІДДАТЛИВЕ КРІПЛЕННЯ

(57) Реферат:

Кільцеве піддатливе кріплення містить верхнє півкільце, з'єднане через вузли піддатливості із нижнім. При цьому верхнє та нижнє півкільця із вузлами піддатливості виконані з круглим перерізом ідентичного профілю із композитного матеріалу, причому кожен вузол піддатливості - у вигляді циліндра, заповненого пластичним матеріалом з можливістю переміщення верхнього півкільця у вертикальній площині та демпфування кріплення.



Фіг. 1

UA 151958 U

UA 151958 U

Корисна модель належить до гірничої промисловості і може бути використана для кріплення гірничих виробок у процесі їх спорудження і експлуатації в умовах підвищеного нерівномірного гірського тиску.

5 Відоме рамне металеве піддатливе кріплення, яке виконане із сталі та містить верхняки, стійки, поздовжні або поперечні лежні і вузли їх з'єднань. З'єднання стійок з лежнями виконані твердими [патент України № 6627, МПК: E21D: 11/34, публ. 1994].

Проте, відоме металеве піддатливе кріплення має недоліки: недостатня величина піддатливості, що обумовлюється деформацією кріплення та переходу його в жорсткий режим роботи, здирання порід підшоши виробки, а також досить велика вага конструкції.

10 Найбільш близьким аналогом є кільцеве кріплення гірничих виробок, яке виконане із сталі та містить два підтискних кільця, встановлених ексцентрично відносно один одного, виконаних із спецпрофілю СВП, з'єднаних між собою хомутами та встановлених між кільцями демпфуючих елементів [патент України № 4545, МПК: E21D 11/14, публ. 1994].

15 Недоліками відомого кільцевого кріплення гірничих виробок є досить висока трудоемність виконуваних робіт за рахунок великої ваги конструкції, замалі темпи проведення виробки, недостатня величина конструктивної піддатливості, що веде до подальшого блокування вузла та кріплення переходить в жорсткий режим роботи із можливістю його подальшої деформації.

20 В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення відомого кільцевого кріплення гірничих виробок, в якому введенням нових конструктивних елементів та їх взаємозв'язку досягається можливість демпфування кільцевого піддатливого кріплення шляхом значно більш рівномірного розподілу напруження між верхнім та нижнім півкільцями кріплення та зменшення напруження навколо контуру кріплення, за рахунок цього зменшується трудоемність з прискоренням часу технологічних робіт та безпеки праці при полегшенні конструкції.

25 Поставлена задача вирішується тим, що у відомому кільцевому піддатливому кріпленні верхнє та нижнє півкільця із вузлами піддатливості виконані з круглим перерізом ідентичного профілю із композитного матеріалу, при чому кожен вузол піддатливості - у вигляді циліндру, заповненого пластичним матеріалом (переважно, парафіном) з можливістю переміщення верхнього півкільця у вертикальній площині та демпфування кріплення.

Корисну модель, що заявляється, представлено на кресленнях:

30 - на Фіг. 1 - загальний вигляд кільцевого піддатливого кріплення із композитних матеріалів, де: 1 - нижнє півкільце, 2 - верхнє півкільце, 3 - металевий шток, 4 - пластичний матеріал; 5 - металевий стакан з дросельними отворами; 6 - дросельний отвір;

- на Фіг. 2 - поперечний переріз кільцевого піддатливого кріплення, де: 7 - металевий стакан, 8 - вуглепластик, 9 - пластичний матеріал;

35 - на Фіг. 3 - вид дросельного отвору, через який буде виходити пластичний матеріал.

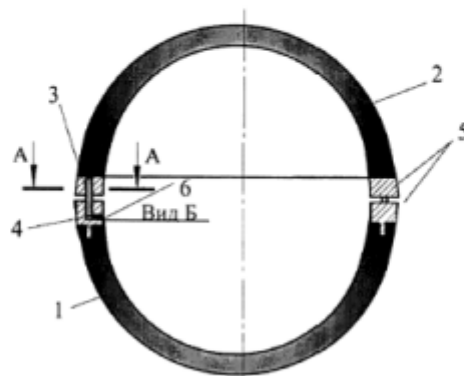
Корисна модель (див. Фіг. 1) реалізується наступним чином. Спочатку встановлюють нижнє півкільце 1 та зводять верхнє півкільце 2, утворюючи кільце ідентичного профілю круглого перерізу, виконане з вуглепластику. Верхнє півкільце 2 та нижнє 1 з'єднані вузлами піддатливості, причому кожен вузол піддатливості містить вмонтований у верхнє напівкільце 2 металевий шток 3, який пропускається у металевий стакан із дросельними отворами 5 нижнього півкільця 1, який заповнений пластичним матеріалом (переважно, парафіном) 4. Піддатливий режим починає працювати в складних гірничо-геологічних умовах. Верхнє півкільце 2 з вмонтованим металевим штоком 3 починає просідати у пластичний матеріал 4, який починає текти та виходити через дросельний отвір 6. Кільцеве кріплення має можливість працювати в піддатливому режимі в умовах дуже великих напружень та є можливість витікання пластичного матеріалу 4 через дросельний отвір 6, коли конструкція починає демпфувати. Металевий шток 3 опускається уздовж нижнього півкільця 1. Це супроводжується достатньо рівномірним розподілом напруження між верхнім півкільцем 2 та нижнім 1, що разом з фактором ідентичного профілю сприяє більш рівномірному напруженню по контуру кріплення. Облегшення конструкції 50 кільцевого кріплення із композитного матеріалу (наприклад вуглепластику) також впливає на зменшення трудомісткості в процесі послідовного кріплення. Вага кріплення зменшується в 5-6 разів, що пов'язано з послідовним переносом роботи зміни, зниженням витрат часу на монтаж та демонтаж, а також безпекою праці шахтарів.

55 Кільцеве піддатливе кріплення з використанням композитних матеріалів, що пропонується, може бути виготовлене в умовах виробництва композитних матеріалів (наприклад вуглепластику) та може знайти своє застосування для виробок вугільних шахт в складних гірничо-геологічних умовах.

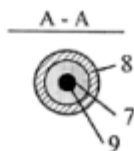
UA 151958 U

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

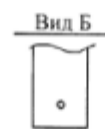
- 5 Кільцеве піддатливе кріплення, що містить верхнє півкільце, з'єднане через вузли піддатливості із нижнім, яке відрізняється тим, що верхнє та нижнє півкільця із вузлами піддатливості виконані з круглим перерізом ідентичного профілю із композитного матеріалу, причому кожен вузол піддатливості - у вигляді циліндра, заповненого пластичним матеріалом з можливістю переміщення верхнього півкільця у вертикальній площині та демпфування кріплення.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601

ДОДАТОК Г

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АРОЧНОГО ВУГЛЕПЛАСТИЧНОГО КРІПЛЕННЯ ДЛЯ УМОВ ШАХТ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

Міністерство енергетики та вугільної промисловості України
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
(НТУ «Дніпровська політехніка»)

ПОГОДЖЕНО:

Проректор з наукової роботи
НТУ «Дніпровська політехніка»,
доктор техн. наук

 І.С. Нікітенко

05 _____ 2024 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор
ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»

 С.А. Воронін

« _____ 2024 р.



МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВИКОРИСТАННЯ АРОЧНОГО ВУГЛЕПЛАСТИЧНОГО
КРІПЛЕННЯ ДЛЯ УМОВ ШАХТ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

ВСТУП

Наразі вугільна промисловість залишається ключовою галуззю економіки України. Водночас світові тенденції вказують на поступовий перехід до використання поновлюваних джерел енергії. Однак для забезпечення сталого зростання і отримання достатнього обсягу енергії з альтернативних джерел буде потрібно ще 40-50 років. Наразі необхідно гарантувати достатню кількість вугілля як сировини для теплових електростанцій.

Умови видобутку вугілля тут складні через велику глибину, слабкі вміщувальні породи та геологічні порушення. Проявами гірського тиску є здування підшви, обвалення порід покрівлі та значні деформації кріплення. Загальний приплив води у виробки сягає 1200 м³/рік, а шахти небезпечні через високий вміст метану.

Збільшення глибини розробки вугільних родовищ призводить до ускладнення гірничо-геологічних умов і підвищення інтенсивності гірського тиску, нерівномірність зміщень і формування гірських порід навантаження на кріплення, особливо в зоні впливу очисних робіт. Такі умови, типові методи проектування та існуючі металічні кріплення виявляються неефективними. Враховуючи результати досліджень необхідно створити методіку розрахунку економічної ефективності використання аротних вуглепластичних кріплень для умов шахт Західного Донбасу.

Важливість використання ресурсозберігаючих технологій для підтримання підземних гірничих виробок на шахтах Західного Донбасу збільшується через кілька основних причин. По-перше, ускладнення гірничо-геологічних умов розробки. По-друге, постійне зростання витрат на кріплення й обслуговування пластових підготовчих виробок. І, нарешті, необхідність підвищення вимог до безпеки підземних робіт. У поточній економічній ситуації найперспективнішим є зміцнення приконтурних порід для підвищення стійкості гірничих виробок та їх використання для зменшення гірського тиску.

Результати тривалих спостережень за станом підземних гірничих виробок, схильних до нерівномірного розподілу тиску та проведені дослідження показали, що навіть за частих ремонтів стан деяких підготовчих виробок залишається незадовільним. Відзначається значний обсяг робіт із підтримання виробок, з деякими ділянками, що потребують ремонту кожні 1-1,5 року, а на інших ділянках ремонт кріплення проводився 2-3 рази протягом року.

Стан виробок, де використовується металеве аркове кріплення з великим об'ємом металу у порівнянні з іншими конструкціями, викликає певні труднощі. Це кріплення повинне забезпечувати необхідні деформації без руйнування, але на практиці воно схильне до бічних навантажень, що призводить до звуження виробки або деформації рами без урахування податливості в конструкції кріплення.

Останнім часом активно розвиваються нові матеріали з покращеною гнучкістю та міцністю. Велика увага приділяється дослідженню та використанню відомих методів зміцнення сталі та алюмінієвих сплавів, а також їх поєднанню з процесами формування для створення комбінованих матеріалів. Ця комбінація сприяє досягненню максимальної міцності при високому модулі пружності та низькій щільності. Такими матеріалами є вуглепластики.

Саме високі фізико-механічні властивості вуглепластиків здатні забезпечити зменшення інтенсивності нерівномірного розподілу тиску навколо підготовчої виробки в складних гірничо-геологічних умовах.

Створена методика дозволяє визначити економічну ефективність використання арочного вуглепластичного кріплення в умовах шахт Західного Донбасу. У методиці приведений розрахунок для шахти «Дніпровська» на пласті c^5 при глибині розробки 400 метрів.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

1. Розраховується вага всього арочного вуглепластичного кріплення за формулою:

$$M_{\text{вугл.кріплення}} = M_{\text{верхняка}} + 2M_{\text{стояка}} + 2M_{\text{зам.подал.}}, \text{ кг} \quad (1)$$

де $M_{\text{верхняка}}$ – вага верхняка, кг;

$M_{\text{стояка}}$ – вага стояка, кг;

$M_{\text{зам.подал.}}$ – вага замків податливості, кг.

Встановити раціональні параметри арочного вуглепластичного кріплення вдалось за допомогою математичних та лабораторних досліджень з урахуванням фізико-механічних властивостей вуглепластику.

Фізико-механічні властивості вуглепластику	Показник
Щільність, кг/м ³	1500
Міцність при розтягуванні, МПа	1400
Модуль Юнга, МПа	125000
Питома міцність, е·10 ³ , км	83
Питомий модуль, Е·10 ⁶ , км	14
Межа міцності при вигині, МПа	1190
Межа міцності при стисненні, МПа	990

2. Визначається вага кожного окремого елемента кріплення за формулою:

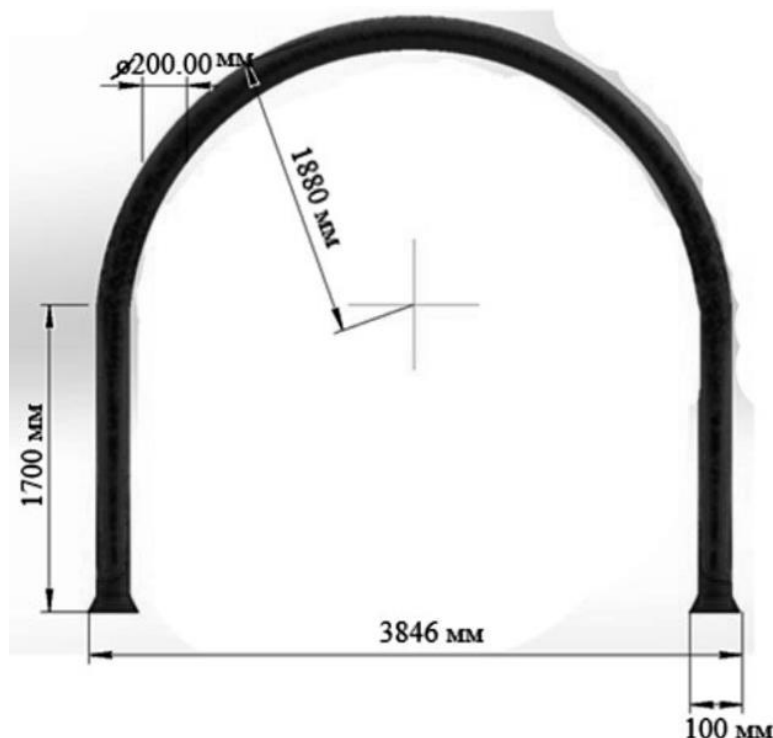
$$M = l \cdot D \cdot \rho, \text{ кг} \quad (2)$$

де l – довжина елемента кріплення, мм;

D – діаметр кріплення, мм;

ρ – густина матеріалу з якого виготовлене кріплення (для вуглепластику 0,015 г/мм³).

При розрахунку необхідно врахувати конструктивну особливість кріплення, головним параметром є діаметр (D) та довжина кріплення (l).



За формулою (2) визначаємо вагу верхняка кріплення:

$$M_{\text{верхняка}} = 1880 \cdot 200 \cdot 0,015 = 5400 \text{ (г)} = 5,4 \text{ кг};$$

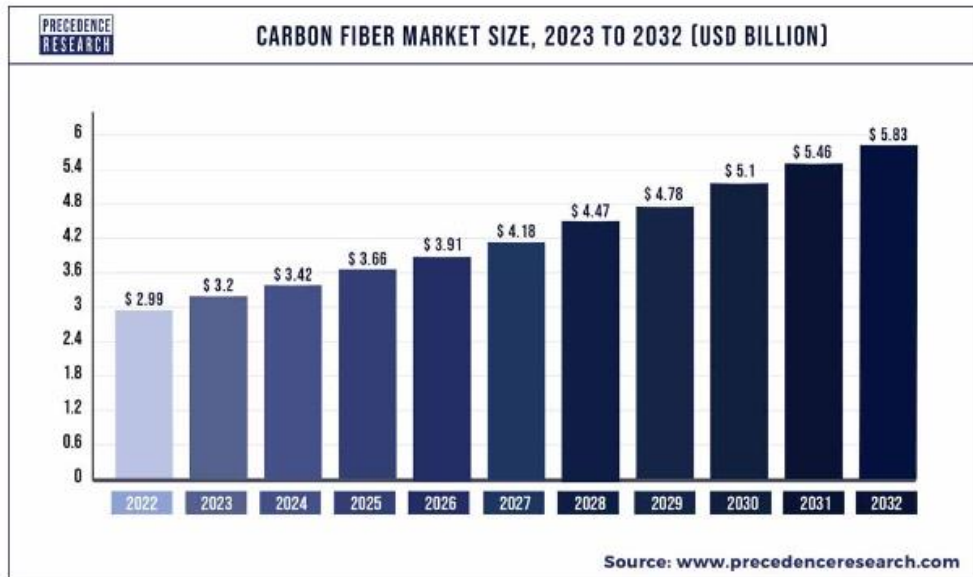
За формулою (2) розраховуємо вагу стояка кріплення:

$$M_{\text{стояка}} = 1700 \cdot 200 \cdot 0,015 = 5100 \text{ (г)} = 5,1 \text{ кг}.$$

Вага арочного вуглепластичного кріплення визначається за формулою (1):

$$M_{\text{вугл.кріплення}} = 5,4 + 2 \cdot 5,1 + 2 \cdot 2,5 = 20,6 \text{ (кг)}.$$

Важливим показником правильного розрахунку вартості кріплення є коректний аналіз ринку композитних матеріалів, на момент розрахунку вартість за 1 кг вуглепластику становила 1747 гривень.



3. Розраховується вартість арочного вуглепластичного кріплення за формулою:

$$C_{\text{вугл.кріплення}} = M_{\text{вугл.кріплення}} \cdot C_{\text{вуглепластику}}, \text{ грн} \quad (3)$$

де $C_{\text{вуглепластику}}$ – вартість вуглепластику за 1 кг (грн).

$$C_{\text{вугл.кріплення}} = 20,6 \cdot 1747 = 36000 \text{ грн.}$$

4. При розрахунку собівартості проведення одного погонного метра виробки закріпленої вуглепластичним кріпленням, враховуємо, що загальна сума комплекту коштує в 3 рази дорожче, ніж типове металеве арочне кріплення та визначається за формулою:

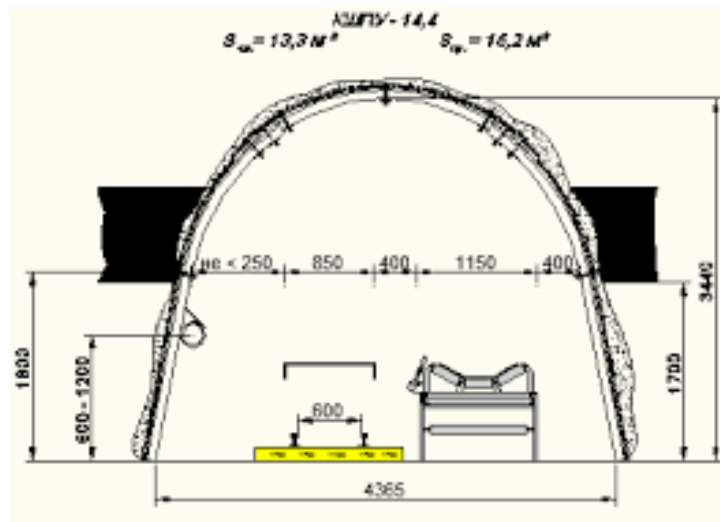
$$C_{\text{п.м}} = C_{\text{к}} + C_{\text{п}}, \text{ грн} \quad (4)$$

де $C_{\text{к}}$ – загальна сума комплекту, грн;

$C_{\text{п}}$ – вартість підхвату (1000 грн);

$$C_{\text{п.м}} = 36000 + 1000 = 37000 \text{ грн.}$$

Завдяки фізико-механічним характеристикам вуглепластику зменшилась площа перерізу виробки у світлі ($S = 11,7 \text{ м}^2$) та збільшилась податливість кріплення ($\Delta = 500 \text{ мм}$). Ці показники необхідно враховувати перед розрахунком у наступному пункті.



5. Визначається вартість перекріплення виробки та підбивки підосви з урахуванням повторного використання обраного кріплення за формулою:

$$C_{пер} = c_1 \cdot (11,97 \cdot \ln \Delta \cdot S + 168,62 \ln \Delta - 17,64 \cdot S - 248,5) \prod_1^3 k_i, \text{ грн/м} \quad (5)$$

c_1 – коефіцієнт, який враховує загальношахтні втрати (1,17);

S – площа перерізу виробки у світлі (11,7 м²);

Δ – податливість кріплення (500 мм);

$\prod_1^3 k_i$ – сума коефіцієнтів впливу факторів кріплення (коефіцієнт який враховує площу перерізу виробки в просвіті - 1,04, коефіцієнт, який враховує тип покрівлі пласта – 0,8, коефіцієнт, який враховує охоронну конструкцію кріплення – 0,2).

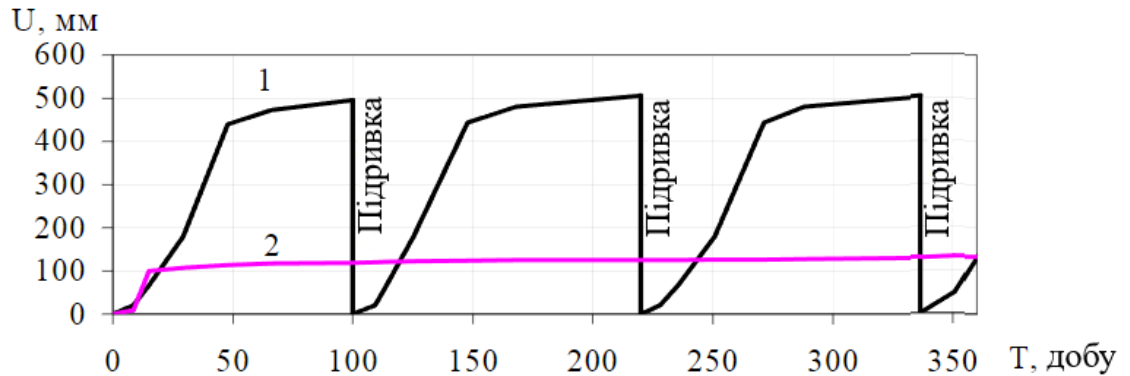
$$C_{пер} = 11,7 * (11,97 * \ln 500 * 11,7 + 168,62 * \ln 500 - 17,64 * 11,8 - 248,5) *$$

$$2,04 = 11,7 * (870,34 + 1048 - 40) * 2,04 = 44832 \text{ грн/м};$$

Так, як довжина підготовчої виробки 600 метрів, то загальні витрати на перекріплення складають:

$$C_{пер} = 600 * 44832 \approx 27 \text{ млн. грн.}$$

Варто звернути увагу на глибину підривки, яка визначена дослідженнями та представлена на графіку.



6. Розраховуються загальні витрати на підривку підосви за формулою:

$$R_{nid} = c_1 \cdot (0,34 \cdot h + 0,16 \ln \left(\frac{S}{12} \right)) \cdot h \cdot \prod_1^2 k_i, \text{ грн/м} \quad (6)$$

h – глибина підривки підосви (500 мм);

$\prod_1^2 k_i$ – сума коефіцієнтів факторів, тарифна ставка кріпильника (3,1 грн / зміна та відсоток відрахувань 1,03 %).

$$R_{nid} = 11,7 * (0,34 * 500 - 0,04 * 500) * 4,13 = 7250 \text{ грн/м,}$$

Розраховуються витрати на підривку в бортовому штреку довжина, якого 600 метрів:

$$R_{nid} = 600 * 7250 = 4,35 \text{ млн.грн.}$$

7. Визначається загальна сума витрат для використання арочного вуглепластичного кріплення для підготовчої виробки:

$$C_{пер.вугл} + R_{nid} = 27 + 4,35 = 31,35 \text{ млн.грн.}$$

8. Розраховується загальна сума витрат для використання арочного металевго кріплення для підготовчої виробки:

$$C_{пер.мет} + R_{nid} = 26 + 6 = 32 \text{ млн.грн.}$$

9. Визначається очікуваний економічний ефект при використанні арочного вуглепластичного кріплення для довжини виробки 600 метрів складає:

$$C_{оч.екоп.еф.} = C_{пер.мет} - C_{пер.вугл} = 650 \text{ 000 грн.}$$

ВИСНОВКИ

Результати розрахунку економічної ефективності використання арочного вуглепластичного кріплення показали основну економічну перевагу це потенціал довгострокової економії витрат. Хоч і початкові інвестиції можуть бути трохи вище в порівнянні з традиційними методами кріплення, але композитне кріплення буде міцним і довговічним та зменшить необхідність в частій заміні або ремонті. Це призведе до істотної економії з плином часу за рахунок мінімізації витрат на технічне обслуговування. Забезпечуючи надійне та стабільне кріплення конструкцій та обладнання, ця система допоможе оптимізувати процеси гірничих робіт, що призведе до підвищення продуктивності та скорочення часу простоїв, задля підвищення прибутковості гірничодобувних підприємств та безпеки праці гірників.

Таким чином, конкретна методика розрахунку підтверджує працездатність арочного вуглепластичного кріплення та можливість його повторного використання для створення системи кріплення з просторово-податливими зв'язками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang, F. (2022). Fixed-length roof cutting with vertical hydraulic fracture based on the stress shadow effect : A case study / *International Journal of Mining Science and Technology*. Vol. 32, № 2. pp. 295-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.007>
2. Власов, С. Ф., Тимченко, С. Є., Молдаванов, Є. В. (2021). Аналіз геологічних умов та особливостей будови пісковиків, які залягають у покрівлі розроблювальних вугільних пластів в умовах шахт Західного Донбасу. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. № 65. С. 37-48. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.007>
3. Sebastian, R., Mishra, B. (2019). Numerical investigation of massive roof failure in an underground coal mine in pittsburgh seam. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development: Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, Foz do Iguassu: CRC Press/Balkema*. pp. 2895-2901.
4. ПАСПОРТ виїмкової ділянки 543 лави пласта C_5+C_5 (пункт 10.1.5 ст.155 - 157; пункт 10.9 ст.162-163).
5. Volodymyr Bondarenko, Iryna Kovalevska, Hennadiy Symanovych, Mykhaylo Barabash, Viktor Chervatiuk, Oleksandr Husiev, Vasyl Snihur (2020) Combined roof-bolting systems of mine workings. CRC Press, 281 pp. <https://doi.org/10.1201/9781003081432>
6. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Podkopaiev, S., Sheka, I., Tsivka, Y. (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*, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>

7. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., Фомичов, В.В., Бондаренко, В.І. (2006). *Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану дрібно-шарового породного масиву навколо пластової виробки. Книга 1. Дограничне деформування системи «порода-кріплення»* [Текст]: монографія / . - Дніпро: Системні технології. - 172 с.

8. Sun, S., Li, S., Li, L., Shi, S., Wang, J., Hu, J., & Hu, C. (2018). Slope stability analysis and protection measures in bridge and tunnel engineering: a practical case study from Southwestern China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3305-3321. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1362-y>

9. Salieiev, I.A., Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., & Kovalevska, I.A. (2021). Development of a methodology for assessing the expediency of mine workings decommissioning based on the geomechanical factor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*.

10. Бондаренко, В.І., Салєєв, І.А., Шека, І.В., Цівка Є.С. (2020). Обґрунтування використання композитних матеріалів для підвищення стійкості гірничих виробок // *Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.* 7-11 вересня 2020 р.: тези доп. – Бердянськ. – С. 25-26

11. ГОСТ Р 57407-2017 *Вуглецеві волокна. Загальні технічні вимоги та методи досліджень*. – Вст. 2017-09-01. - М.: Вид-во стандартів, 2019.

12. ГОСТ Р 55045-2012 *Технічна діагностика. Акустично-емісійна діагностика. Терміни, визначення та значення* – Вст. 2014-01-01 - М.: Вид-во стандартів, 2019

13. Johnson T. (2018). *History of composites. The evolution of lightweight composite materials*. Available from: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>

Методика розрахунку кріпильної системи дільничних виробок шахт Західного Донбасу / Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Снігур В.Г., Яковенко В.Г., Сачко Р.М., Шека І.В., Цівка Є.С. – Дніпро: ЛізуновПрес, 2021. – 31 с.

За результатами експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приконтурних порід виїмкових виробок, їх кріпильної системи на різних ділянках впливу підвищеного гірського тиску, що змінюється в часі й просторі; отримані закономірності взаємозв'язку структури й властивостей порід вуглевміщуючої товщі з конструктивними параметрами кріплення виїмкових виробок, що дозволило вдосконалити методику їхнього розрахунку з урахуванням асиметрії додатка навантаження в зоні впливу очисних робіт.

Друкується за авторською редакцією.

© Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., 2021

© Симанович Г.А., Снігур В.Г., 2021

© Яковенко В.Г., Сачко Р.М., 2021

© Шека І.В., Цівка Є.С., 2021

© ТОВ «ЛізуновПрес», 2021

ЗМІСТ

ВСТУП		4
	МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ КРІПИЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЇВИХ ВИРОБОК НА ШАХТАХ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ	6
1	Загальні відомості	6
2	Вихідні дані для виконання розрахунків	6
3	Визначення розмірів області нестійких порід навколо виїмкової виробки	9
4	Вибір типу рамного кріплення та кроку його встановлення	11
5	Вибір параметрів кріпильної системи виїмкової виробки у зоні впливу очисних робіт	12
6	Розрахунок параметрів встановлення анкерів у боках виїмкової виробки	12
7	Вибір параметрів розміщення сталеполімерних анкерів у центральній частині склепіння виробки	14
8	Розрахунок параметрів канатних анкерів у центральній частині склепіння виробки	15
9	Вибір параметрів стояків кріплення посилення	17
	ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ КРІПИЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЇМКОВОЇ ВИРОБКИ	18
1	Вихідні дані для виконання розрахунків	18
2	Визначення розмірів області нестійких порід навколо виїмкової виробки	21
3	Вибір типу рамного кріплення та кроку його встановлення	23
4	Розрахунок параметрів встановлення анкерів у боках виїмкової виробки	23
5	Параметри розміщення сталеполімерних анкерів у центральній частині склепіння виробки	25
6	Параметри встановлення канатних анкерів в центральній частині склепіння виробки	27
7	Вибір параметрів стояків кріплення посилення	29
8	Висновки	30
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	31