

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Шека Іван Валерійович

УДК 622.28.042.44

ДИСЕРТАЦІЯ
ОБґРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КРІПЛЕННЯ ІЗ
КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ВУГІЛЬНИХ
ШАХТ, ЩО РОЗТАШОВАНІ НА ГЛИБИНАХ ПОНАД 1000 МЕТРІВ

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.

І.В. Шека

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Бондаренко Володимир Ілліч, д.т.н, професор

Дніпро – 2024

ЗМІСТ

ВСТУП	15
Розділ 1 СТАН ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	22
1.1 Сучасний стан гірничодобувної промисловості. Аналіз використання композитних матеріалів та їх фізико-механічні властивості	22
1.2 Передумови використання композитних матеріалів у елементах кріплення гірничих виробок	33
1.3 Аналіз особливостей методу комп'ютерного моделювання геомеханічних систем	40
1.4 Аналіз особливостей технології 3D-друку	45
1.5 Висновки. Мета, ідея, методи та основні задачі досліджень	47
Розділ 2 РОЗРОБКА КРІПЛЕННЯ ІЗ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ	52
2.1 Розробка моделей кріплення із композитних матеріалів	52
2.2 Методика проведення обчислювального експерименту з обґрунтування взаємодії композитного кріплення з гірським масивом	57
2.3 Обґрунтування параметрів геомеханічної моделі вуглевмісного масиву при композитному кріпленні	63
2.4 Аналіз НДС гірського масиву та кріпильної системи штреку	70
2.5 Лабораторні дослідження на стинення кріплення із композитних матеріалів	78
2.6 Висновки за розділом	80
Розділ 3 АНАЛІЗ НДС ВУГЛЕВМІСНОГО МАСИВУ ТА КОМПОЗИТНОГО КРІПЛЕННЯ ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ В УМОВАХ ШУ «ПОКРОВСЬКЕ»	83

3.1 Вдосконалення геомеханічної моделі за результатами розрахунку її НДС	83
3.2 Закономірності зміни НДС кріпильної системи штреку при надпрацюванні його лавою	87
3.3 Закономірності зміни НДС кріпильної системи штреку в зоні ведення очисних робіт	92
3.4 Визначення раціонального виду композитного кріплення в умовах ШУ «Покровське»	96
3.5 Висновки за розділом	106
Розділ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПОЗИТНОГО КРІПЛЕННЯ, ЩО ПІДТРИМУЄТЬСЯ У МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ГЛИБИНАХ ПОНАД 1000 МЕТРІВ	
4.1 Узагальнення особливостей проявів гірського тиску при кріпленні виробок, які знаходяться на великих глибинах	108
4.2 Алгоритм пошуку раціональних параметрів системи кріплення	110
4.3 Розрахунок та аналіз НДС удосконаленої системи композитного кріплення	113
4.4 Обґрунтування раціональних параметрів композитного кріплення для вугільних шахт, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів	116
4.5 Висновки за розділом	120
ЗАКЛЮЧНІ ВИСНОВКИ	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	123
Додаток А. Методика розрахунку кріпильної системи дільничних виробок шахт Західного Донбасу	148
Додаток Б. Розрахунок очікуваного економічного ефекту	151
Додаток В. Патенти на корисну модель	155

АНОТАЦІЯ

Шека І. В. Обґрунтування раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів. – 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.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної для вугледобувної галузі науково-технічної задачі обґрунтування раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів, яка вирішена шляхом використання виявлених закономірностей зміни напружено-деформованого стану вуглевмісного масиву, параметрів навантаження гірських порід на кріплення підготовчих виробок.

Для вирішення поставлених у роботі завдань виконано аналіз використання композитних матеріалів у різних галузях промисловості. За його результатами встановлено, що краще використовувати композитні матеріали на основі вуглепластичних волокон. Проаналізовано можливості використання вуглепластиків у елементах кріплення гірничих виробок. Фізико-механічні властивості композитів відрізняються від металевих тим, що густина вуглепластику складає 1500 кг/м^3 , в той же час як густина металу становить 7750 кг/м^3 . З цього можна зробити висновок, що даний інноваційний матеріал буде в 5 разів легшим за сталь.

На підставі сучасних вимог до конструкцій кріплення гірничих виробок розроблено дві моделі кріплення із композитних матеріалів: арочне піддатливе кріплення постійного перерізу та арочне кріплення змінного перерізу. Інноваційне кріплення дозволить збільшити темпи проведення гірничих виробок, зменшить трудомісткість робіт, що виконуються та підвищить безпеку праці шахтарів з прискоренням роботи зміни.

Для виконання обчислювального експерименту розроблено методика

проведення обчислювального експерименту з обґрунтування взаємодії композитного кріплення з гірським масивом. Методикою проведення експерименту передбачалася побудова моделі вуглевмісного масиву та композитного кріплення. На базі програмної системи скінченно-елементного аналізу ANSYS проведено серію обчислювальних експериментів у пружній та пружно-пластичній постановці з поданням реальної картини напруження у композитному кріпленні.

У результаті обчислювального експерименту отримано поля розподілу концентрацій інтенсивності напружень у гірському масиві та композитному кріпленні за різних гірничо-геологічних умов та різному перерізі композитного кріплення, що зводиться у виробленому просторі.

Аналіз розрахункових даних показав, що при збільшенні перерізу композитного кріплення значно знижуються як абсолютні значення максимумів напружень, так і області їх поширення, підвищується стійкість породних шарів надвугільної товщі зі зниженням навантаження на кріпильну систему виїмкової виробки.

Визначено, що переріз композитного кріплення змінюється за степеневою залежністю від співвідношення глибини проведення виробки H та середнього розрахункового опору на стискання R гірських порід. Це дозволяє прогнозувати стійкий стан виробки протягом усього терміну її експлуатації.

Встановлено, що навантаження на композитне кріплення підготовчої виробки, знаходиться в прямо пропорційній степеневій залежності від параметра H/R і обернено пропорційно перерізу композитного кріплення. Це забезпечує вибір параметрів системи композитного кріплення зі зниженою матеріаломісткістю без погіршення стійкості виробки.

За результатами виконаних досліджень розроблено та обґрунтовано кріплення із композитних матеріалів для вугільних шахт, що розташовані на великих глибинах, що дозволить збільшити темпи проведення гірничих виробок, зменшить трудомісткість робіт, що виконуються та підвищить безпеку праці шахтарів з прискоренням роботи зміни.

Таким чином, дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше встановлених закономірностей розподілу тиску на композитне кріплення вирішено актуальне науково-технічне завдання, яке полягає в обґрунтуванні раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт з урахуванням глибини розробки, а також ведення очисних робіт. Результати роботи дозволяють розробити рекомендації щодо удосконалення кріплення виробленого простору новими видами кріплення у складних умовах видобутку вугілля в умовах ШУ «Покровське», а також мінімізувати аварійні випадки, пов'язані з посадкою кріплення «на жорстку базу» і тим самим підвищити стійкість виробок, що проводяться.

Ключові слова: вугільна шахта, вуглепластик, гірничі виробки, композитне кріплення, напружено-деформований стан, обчислювальний експеримент, фізико-механічні властивості.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у 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 НГУ*, 64, 112–121. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.112>

Здобувачем обґрунтовано використання інноваційного матеріалу вуглепластику для кріплення гірничих виробок.

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 НГУ*, 68, 30–42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.030>

Здобувач обґрунтував за допомогою розрахункового експерименту ефективність використання кріплення з вуглепластику для гірничих виробок на шахтах Західного Донбасу.

3. Шека, І.В., Салєєв, І.А., Шишов, М.В., Малова, О.К., Почепов, В.М., & Мамайкін, О.Р. (2023). Аналіз використання композитних матеріалів для подальшого застосування у кріпленнях гірничих виробок. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 72, 30–42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.062>

Здобувач аналітично визначив використання композитних матеріалів для подальшого застосування у кріпленнях гірничих виробок.

4. Шека, І.В. (2023). Результати дослідження впливу надпрацювання на гірничі виробки, що закріплені композитним кріпленням. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 25, 67-79. <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.006>

Статті у виданнях, що індексуються у наукометричних базах даних Scopus і Web of Science:

1. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Podkopaiev, S.V., Sheka, I.V., & Tsivka, Y.S. (2022). Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth*

and Environmental Science, Volume 1049, 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>

Здобувачем виконано дослідження взаємодії кріплення із вуглепластику з масивом гірських порід задля обґрунтування використання кріплення із композитних матеріалів на вугільних шахтах.

2. Bondarenko V., Kovalevska I., Sheka I., & Sachko R. (2023). Results of research on the stability of mine workings, fixed by arched supports made of composite materials, in the conditions of the Pokrovske Mine Administration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 1156, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012011>

Здобувач дослідив стійкість гірничих виробок, які закріплені аروحними рамами із композитних матеріалів в умовах ШУ «Покровське».

3. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Symanovych, H.A., Sachko, R.M., & Sheka, I.V. (2023). Integrated research into the stress-strain state anomalies, formed and developed in the mass under conditions of high advance velocities of stope faces. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 1254, 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012062>

Здобувач дослідив аномалії напружено-деформованого стану, що утворюються та розвиваються в гірському масиві за умов високих швидкостей просування вибоїв.

4. Kovalevska, I.A., Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., Tsivka, Y.S., & Sheka, I.V. (2023). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. *In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. *Austrian Society for Geomechanics: Salzburg*. pp.1538-1543.

Здобувач змодлював раціональні параметри інноваційних систем кріплення гірничих виробок з використанням композитних матеріалів

Патенти

1. Арочне піддатливе кріплення: пат. 148329 Україна: МПК E21D 11/14 (2006.01). №u2020 08107; заявл. 18.12.2020; опубл. 28.07.2021, Бюл. №30.

Здобувач розробив елементи арочного піддатливого кріплення.

2. Арочне кріплення: пат. 148395 Україна: МПК E21D 11/14 (2006.01). №u2020 08272; заявл. 23.12.2020; опубл. 04.08.2021, Бюл. №31.

Здобувач розробив елементи арочного кріплення.

3. Кільцеве піддатливе кріплення: пат. 151958 Україна: МПК E21D11/14 (2006.01), № u2022 01449; заявл. 05.05.2022; опубл. 05.10.2022; Бюл. № 40

Здобувач розробив елементи кільцевого піддатливого кріплення.

Матеріали наукових конференцій:

1. Бондаренко, В., Салєєв, І., Шека, І., & Цівка, Є. (2020). Обґрунтування використання композитних матеріалів для підвищення стійкості гірничих виробок. *Ukrainian School of Mining Engineering 2020*, 25–26. <https://doi.org/10.33271/usme14.025>

Здобувачем обґрунтовано забезпечення стійкості гірничих виробок комбінованими способами кріплення за рахунок використання нових інноваційних технологій.

2. Шека І.В. (2021). До питання вибору програмного продукту при моделюванні геомеханічних процесів. *Інформаційні технології: теорія і практика. IV Всеукраїнська інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених*, 91 – 93.

3. Бондаренко, В., Шека, І., & Цівка, Є. (2021). Розробка інноваційного виду кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт. *Ukrainian School of Mining Engineering 2021*, 59–62. <https://doi.org/10.33271/usme15.059>

Здобувач розробив інноваційний вид кріплення із композитних матеріалів, який дозволить зменшити трудомісткість виконуваних робіт та покращить працю гірників.

4. Ковалевська, І., Цівка, Є., & Шека, І. (2021). Розробка кріплення із композитних матеріалів для зміцнення масиву гірських порід у зонах підвищеного гірського тиску. *Ukrainian School of Mining Engineering 2021*, 67–68. <https://doi.org/10.33271/usme15.067>

Здобувач розробив кріплення із композитних матеріалів, яке дозволить зміцнити масив гірських порід у зонах підвищеного гірського тиску.

5. Шека І.В. (2021). Створення моделі кріплення із вуглепластику та виготовлення її на 3D-принтері. *IX всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації 2021»*, 487-488

6. Шека І.В. (2022). Композити у гірничій промисловості. Минуле. Сьогодні. Майбутнє. *VII МІЖНАРОДНИЙ МОЛОДІЖНИЙ КОНГРЕС. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*. 10-11 лютого 2022 р.: тези доп. – Львів, 2022. – С. 248.

7. Шека І.В. (2022). Аналіз напружено-деформованого стану кріплення із композитних матеріалів на основах біоніки. *Молодь: наука та інновації: матеріали XII Всеукраїнської науковотехнічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, 18-19 травня 2022 р.: тези доп. – Дніпро, 2022. – С. 89-90

8. Шека І.В. (2022). Методика проведення обчислювального експерименту з обґрунтування взаємодії композитного кріплення з гірським масивом. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія» (присвячена Дню науки)*. 26 травня 2022 р.: тези доп. – Житомир, 2022. – С. 200

9. Шека І.В. (2022). Дослідження доцільності використання інноваційного виду кріплення із композитних матеріалів в умовах ШУ «Покровське». *Геотехнічні проблеми розробки родовищ: Матеріали XX міжнародної конференції молодих вчених*. 27 жовтня 2022 р. : тези доп. – Дніпро, 2022. – С. 76-78

10. Sheka, I.V. (2022). Analysis of the features of 3D-printing technology for its use in the creation of new types of fastening of mining workings. *V international scientific and technical conference “Innovative development of resource-saving technologies and*

sustainable use of natural resourcesat: Petroşani, Romania, November 11, 2022, 174-176

11. Бондаренко, В., & Шека, І. (2023). Дослідження впливу різних гірничо-геологічних умов на дренажний штрек, що закріплений композитним кріпленням. *Ukrainian School of Mining Engineering 2023*, 59–60. <https://doi.org/10.33271/usme16.059>

Здобувач за допомогою комп'ютерного експерименту дослідив вплив різних геологічних умов на напружено-деформований стан дренажного штреку, що закріплений композитним кріпленням

12. Mamaikin, O.R., Sydorenko, R.K., & Sheka, I.V. (2023). Preconditions for the use of composite materials in mine support elements. *VI international scientific and technical conference “Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resourcesat: Petroşani, Romania, November 16, 2023, 120-122*

Здобувач проаналізував передумови застосування композиційних матеріалів в елементах кріплення гірничих виробок

13. Шека І.В. (2023). Дослідження впливу очисних робіт на гірничі виробки, що закріплені композитним кріпленням. *XI всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації 2023»*, 167-168. 22-24 листопада 2023 р., Дніпро, Україна

ABSTRACT

Sheka I. V. – Substantiation of the rational parameters arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mining workings coal mines located at depths of more than 1000 meters. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Qualifying research paper manuscript copyright.

Thesis of the scientific degree of the Philosophy Doctor (Ph.D.) in specialty 184 «Underground mining of mineral deposits» – Dnipro University of Technology, Dnipro, 2024.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem relevant for the scientific and technical field to create rational fastening parameters of mixed materials for mining coal mines found at depths of more than 1000 meters, which is determined using certain patterns of superimposed-deformed state of carbohydrate mass on fastening of preparatory products.

To solve the tasks set in the work, an analysis of the use of composite materials in various industries was performed. It has been established that it is better to use composite materials based on carbon fiber. The possibilities of using carbon plastics in the elements of fastening of mining products are analyzed. The physical and mechanical properties of composites differ from those of metal in that the density of carbon fiber is 1500 kg/m^3 , while the density of metal is 7750 kg/m^3 . From this we can conclude that this innovative material will be 5 times lighter than steel.

On the basis of modern requirements for the constructions of fastening of mine workings, two models of fastening made of composite materials have been developed: an arched flexible fastening of a constant section and an arched fastening of a variable cross-section. The innovative fastening will allow to increase the pace of mining operations, reduce the labor intensity of the work being performed and increase the safety of the miners by speeding up the work of the shift.

To conduct a computational experiment, a methodology for conducting a computational experiment was developed to substantiate the interaction of composite fasteners with a rock massif. The method of conducting the experiment involved the construction of a model of the carbon-containing massif around the bench and the

prefabricated stretch in the SolidWorks program. On the basis of the finite element analysis software ANSYS, a series of computational experiments was conducted in an elastic-plastic setting with a presentation of the real picture of stress in the "array - composite fastener" system.

As a result of the computational experiment, distribution fields of vertical and horizontal stress concentrations and stress intensity in the rock massif and composite fastening under different mining and geological conditions and different cross-sections of the composite fastening erected in the created space were obtained.

The analysis of calculated data showed that with an increase in the cross-section of the composite fastener, both the absolute values of the maximum stresses and the area of their distribution are significantly reduced, the stability of the ultra-coal layer rock layers increases with a decrease in the load on the fastening system of the excavation.

It was determined that the cross-section of the composite fastener varies according to the degree of dependence on the ratio of the excavation depth H and the average calculated compressive strength R of the rocks. This makes it possible to predict the steady state of the product during the entire period of its operation.

It was established that the load on the composite fastener of the preparatory product is directly proportional to the power dependence of the H/R parameter and inversely proportional to the cross-section of the composite fastener. This ensures the choice of parameters of the composite fastening system with reduced material consumption without deterioration of the stability of the product.

Based on the results of the research, fasteners made of composite materials for coal mines located at great depths have been developed and substantiated, which will allow to increase the pace of mining operations, reduce the labor intensity of the work being performed, and increase the safety of the miners with the acceleration of the work shift.

Thus, the dissertation is a completed scientific research work, in which, based on the first established regularities of pressure distribution on the composite fastener and the adjacent rock massif, the actual scientific and technical task is solved, which consists in substantiating the rational parameters of fasteners made of composite materials for mining workings of coal mines with taking into account the depth of development, as

well as the conduct of cleaning works. The results of the work make it possible to develop recommendations for improving the fastening of the produced space with new types of fastening in the difficult conditions of coal mining in the conditions of the "Pokrovske" mine administration, as well as to minimize accidents associated with the installation of fasteners "on a rigid base" and thereby increase the stability of the products, which are held.

Keywords: coal mine, carbon fiber-reinforced plastic, composite fastening, mining workings, stress-strain state, computational experiment, physical and mechanical properties.

ВСТУП

Актуальність роботи. Кожна держава прагне зберегти економічну і, зокрема, енергетичну безпеку. Україна є в числі багатьох індикаторів національної економічної безпеки й важливе місце надає ступеню забезпеченості країни основними природними ресурсами і, зокрема, енергоносіями. З погляду енергетичної безпеки України, вугілля є достатньо надійним паливом. В сучасних умовах впливу тенденцій декарбонізації, значна увага все ж таки приділяється видобутку корисних копалин, особливо в умовах погіршення гірничо-геологічних умов, що відповідає науковим потребам світової економіки.

Позитивні зміни соціально-економічної ситуації при видобутку корисних копалин в Україні та підвищення її енергетичної безпеки можна реалізувати шляхом впровадження інноваційного підходу до корінного удосконалення нових технологій, де основним напрямом є ресурсозберігаючі сучасні розробки в геофізиці та геомеханіці.

Проблема підтримки підземних гірничих виробок новими видами кріплення набуває для гірничодобувної промисловості України дедалі більшої актуальності з основних причин: по-перше, неухильна тенденція до ускладнення гірничо-геологічних умов розробки; по-друге, постійно зростаючі матеріальні та трудові витрати на кріплення виробок; по-третє, необхідність посилення вимог безпечного ведення підземних робіт.

Процес підвищення надійності кріплення підготовчих виробок ускладнюється зі збільшенням глибини їх проведення, а також пошуком раціональних технологічних параметрів.

Розробка вугільними шахтами надглибоких горизонтів ($H > 1000$ метрів) є невід'ємною складовою при видобуванні корисних копалин, та зі збільшенням глибини розробки суттєво зростають і витрати на проведення та підтримку підготовчих виробок, частка яких у собівартості вугілля сягає 30 – 45%. Для кріплення гірничих виробок застосовуються, переважно, арочні кріплення зі спецпрофілю СВП (90 – 95%), питома металоємність яких постійно зростає і становить на даний період часу в середньому 800 – 1300 кг/пог.м. Також, щорічно,

середня довжина ремонтованих виробок сягає 40 – 60 %, а таких, що повністю перекріплюються – 12 – 25% від обсягу підтримуваних.

У зв'язку з цим новим технологічним рішенням при кріпленні гірничих виробок відбувається перехід від традиційних металевих матеріалів і перехід до композитних пластмас. Таким матеріалом є вуглепластик або так званий карбон. А ефективним напрямом підвищення стійкості гірничих виробок є розробка нового інноваційного виду кріплення з композитних матеріалів, що покращить стан виробок. Інноваційне кріплення дозволяє знизити негативні прояви гірського тиску і створює сприятливі умови для безперебійної та безпечної роботи гірничих виробок. Це істотно знижує трудомісткість робіт, що виконуються, з прискоренням часу технологічних робіт та безпеки праці при полегшенні конструкції.

Однак питання розробки кріплення із композитних матеріалів залишаються недостатньо вивченими, що вимагає пошуку нових технологічних рішень у даному напрямі. Відсутність наукових обґрунтувань, раціональних параметрів та конструктивних особливостей кріплення із композитних матеріалів перешкоджає його широкому поширенню.

Тому обґрунтування раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт, розташованих на глибинах понад 1000 метрів, є **актуальним науковим завданням.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка» відповідно до Національного плану дії в галузі енергетики до 2030 року за № 687, затвердженого Міністерством енергетики та вугільної промисловості України в 2018 році, затвердженої постановою Кабінету міністрів України (№ 1205 від 19 вересня 2001 р.), а також планів держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України в 2020 – 2024 роках: тема ГП-501 «Виявлення закономірностей фазових перетворень газогідратів, напружено-деформованого стану гірського масиву і розробка інноваційних геотехнологій» (№ держреєстрації 0119U000249), тема ГП-504 «Наукові та практичні основи

оптимізації розрахунку параметрів інноваційних технологій при видобутку корисних копалин підземним способом» (№ держреєстрації 0120U102077), тема ГП-509 «Наукове та практичне обґрунтування оптимізаційних рішень при впровадженні інноваційних технологій мінімізації ризиків при закритті вугільних шахт» (№ держреєстрації: 0122U001719), а також тема ГП-514 «Розробка геомеханічних моделей гірського масиву та інноваційних технологій комплексного видобутку мінеральних ресурсів вугільних шахт» (№ держреєстрації: 0123U101808), де автор був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. *Мета дослідження полягає в обґрунтуванні раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт, розташованих на глибинах понад 1000 метрів з урахуванням закономірностей зміни напружено-деформованого стану (НДС) гірського масиву.*

Поставлена мета досягається послідовним виконанням наступних *завдань досліджень:*

- аналіз використання композитних матеріалів та їх фізико-механічні характеристики;
- розробка та обґрунтування моделі кріплення із композитних матеріалів для впровадження її в гірничі виробки, лабораторні дослідження композитного кріплення, що надруковано на 3D-принтері;
- обґрунтування просторової геомеханічної моделі навантаження гірського масиву та композитного кріплення виробки за різних гірничо-геологічних умов;
- встановлення закономірностей зміни напружено-деформованого стану композитного кріплення та встановлення взаємовпливу параметрів його елементів;
- розробка методики розрахунку раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів;
- розробка економічної доцільності використання композитного кріплення у гірничих виробках на глибинах понад 1000 метрів.

Ідея роботи полягає у врахуванні закономірностей зміни напружено-деформованого стану порід для обґрунтування раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів.

Об'єктом дослідження є геомеханічні процеси керування НДС шаруватого гірського масиву і кріплення гірничих виробок вугільних шахт інноваційним видом кріплення.

Предмет дослідження – закономірності впливу НДС геомеханічної системи на параметри кріплення гірничих виробок, які закріплені інноваційним видом кріплення та розташовані на глибинах понад 1000 метрів.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що містить у собі аналіз і узагальнення наукових праць та розробок у досліджуваній області, аналітичні й експериментальні методи визначення раціональних параметрів, розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану породного масиву чисельними методами, економіко-математичне моделювання з використанням пакета прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблена модель кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт, яка відрізняється від традиційної моделі металевого кріплення тим, що стояки та верхняк мають круглий профіль із композитного матеріалу, а вузли піддатливості виконано у вигляді циліндра штокоподібної форми, що заповнений пластичним матеріалом, з можливістю переміщення верхняка рами у вертикальній площині та демпфування кріплення.

2. Вперше розроблена просторова геомеханічна модель для дослідження взаємодії композитного кріплення із масивом гірських порід з урахуванням впливу глибини ведення робіт, структури і властивостей гірських порід, положення очисного вибою і параметрів кріплення виробки, що дозволило максимально наблизити модель до реальних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов для підвищення адекватності одержуваних результатів.

3. Встановлено ступінь дії впливу різних гірничо-геологічних умов на композитне кріплення підготовчої виробки. Встановлено, що найбільш

інтенсивний вплив на систему кріплення відбувається при розташуванні кріплення безпосередньо у зоні ведення очисних робіт;

4. Встановлено нові закономірності зв'язку параметрів композитного кріплення гірничої виробки з геомеханічними факторами її підтримки, що відрізняються від відомих, з урахуванням їх взаємовпливу як в domeжних, так і позаomeжних стадіях деформування кожної складової геотехнічної системи.

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

6. Навантаження на композитне кріплення підготовчої виробки, знаходиться в прямо пропорційній степеневій залежності від параметра H/R і обернено пропорційно перерізу композитного кріплення. Це забезпечує вибір параметрів системи композитного кріплення зі зниженою матеріаломісткістю без погіршення стійкості виробки.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректною постановкою й розв'язанням задач із використанням положень механіки гірських порід, будівельної механіки, порівнянням аналізів з нормативними документами, проведенням обчислювальних експериментів на науково-обґрунтованих моделях методом скінченних елементів (МСЕ) і порівнянням з аналітично-розрахунковими методами з урахуванням емпіричних залежностей, отриманих експериментальним шляхом і підтверджених науковими роботами багатьох авторів, де розбіжність складає 10 – 12%.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей зміни розподілу навантаження на композитне кріплення гірничих виробок, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблена «Методика визначення раціональних параметрів композитного кріплення підготовчих виробок на глибинах понад 1000 метрів»;

2. Обґрунтовано раціональні параметри кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів.

Реалізація результатів роботи.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у вигляді: «Методики визначення раціональних параметрів композитного кріплення підготовчих виробок на глибинах понад 1000 метрів».

Особистий внесок здобувача. Полягає у формулюванні мети і завдань, об'єкта і предмета досліджень, ідеї роботи і наукових положень, аналізу сучасного стану конструкцій кріплення, розробки моделей композитного кріплення, розробки геомеханічної моделі, аналізу напружено-деформованого стану масиву, обґрунтування раціональних параметрів кріплення та встановлення нових закономірностей.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях і форумах: IV Всеукраїнська інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених (2021); XI, XII Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (Дніпро, 2021 – 2022); «Українська школа гірничої інженерії» (Бердянськ, 2020 – 2021, Східниця, 2023); V та VI International scientific and technical conference «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resourcesat» (Petroșani, Romania, 2022 – 2023); «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» ІГТМ НАН України (Дніпро, 2022); VII Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2022); Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія» (Житомир, 2022).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 24 наукові праці, у тому числі 4 статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України,

3 статті у виданнях, що індексовані у наукометричній базі даних Scopus, 14 публікацій у матеріалах закордонних і всеукраїнських конференцій та 3 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, списку літературних джерел (215 джерел) та 3 додатків. Робота містить 147 сторінок основного тексту, 38 рисунків і 7 таблиць, загальний обсяг – 158 сторінок.

Автор висловлює слова щирої вдячності науковому керівнику, завідувачу кафедри ГЮ, доктору технічних наук, професору, Заслуженому діячу науки і техніки України, Лауреату державної премії України в галузі науки і техніки Бондаренку Володимирі Іллічу за допомогу в організації та проведенні досліджень, а також у захисті роботи; доктору технічних наук, професору Ковалевській Ірині Анатоліївні, доктору технічних наук, професору Симановичу Геннадію Анатолійовичу за наукові консультації; начальнику НДЧ, кандидату технічних наук, доценту Гайдаю Олександрю Анатолійовичу за допомогу в проведенні досліджень; науковому співробітнику Маловій Ользі Кузьмівні, аспіранту Цівкі Євгенію Сергійовичу та іншим співробітникам кафедри гірничої інженерії та освіти за співпрацю й усесторонню підтримку.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Сучасний стан гірничодобувної промисловості. Аналіз використання композитних матеріалів та їх фізико-механічні властивості.

За час існування вугільної промисловості, періодів підйому та спаду, інтенсифікації та рецесії вуглевидобутку вугільна галузь була і є стрижнем економіки України.

У ХХІ столітті вугледобувна галузь все ще залишається однією з найважливіших промислових галузей у світі, навіть незважаючи на системну кризу через фактор декарбонізації [1] – [3]. В даний період часу значення вугілля знижується [4], [5], в основному через його негативний вплив на навколишнє середовище та переходу на альтернативні джерела енергії. Однак використання вугільної продукції в енергетичному секторі в кілька разів дешевше за природний газ [6], що може дозволити вуглевидобувним компаніям збільшувати видобуток у періоди зростання цін на нафту і веде до підвищення собівартості на вугілля.

Незважаючи на сучасні тенденції максимального витіснення вуглеводнів від використання в енергетиці, обсяги видобутку вугілля в світі у довгостроковій перспективі виростуть на 20 % до 2040 року, тобто майже до 10 млрд т.

За даними Всесвітньої вугільної асоціації (World Coal Association – WCA), щорічно у світі видобувається близько 8 млрд т вугілля [7], [8]. А за даними International Energy Agency [9], загальносвітові запаси вугілля становлять 861 млрд тонн. У надрах України зосереджено 33,9 млрд т вугілля (4% світових запасів). Досить вагому роль у видобутку кам'яного вугілля нашої держави відіграє ШУ «Покровське», яке видає на гора понад 5 млн т на рік [10].

У сучасній міжнародній економіці паливно-енергетичний комплекс займає винятково важливе місце. Сукупна чиста частка енергетичної продукції у структурі світового ВВП нині в середньому оцінюється в 10 – 12 % або приблизно в 1,8 тис. дол. на рік у розрахунку на душу населення. Темпи зростання споживання різної енергії вже понад 30 років практично повністю співпадають із показниками

приросту світового ВВП. У зв'язку з цим забезпечення енергетичної безпеки є основним стратегічним напрямом діяльності уряду будь-якої країни світу.

Довгострокові економічні показники свідчать, що світ готовий повністю відмовитися від «вугільної» економіки. Деякі країни відмовляються від використання енергетичного вугілля, тому продаж та виробництво в майбутньому знизяться, але світовий попит [11] залишиться стабільним (рис. 1.1). Наприклад, поточна частка вугілля у світовому виробництві енергії становить приблизно 40%, що свідчить про досить високий попит на даний енергоресурс.

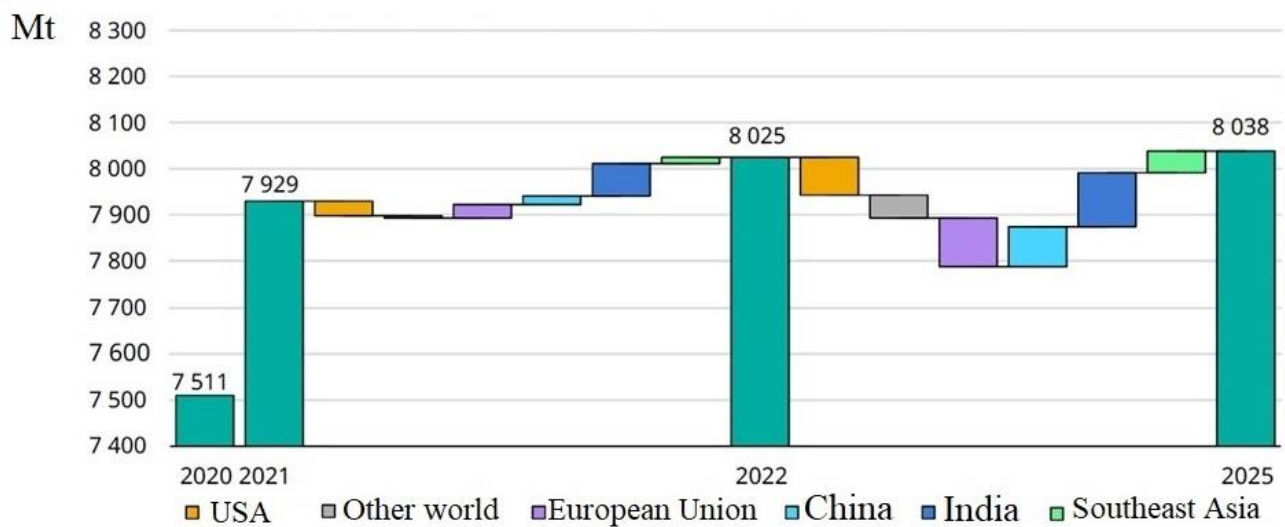


Рисунок 1.1 – Динаміка та прогноз видобутку кам'яного вугілля в світі у період 2010 – 2025 рр.

Стабільний попит на вугільну продукцію забезпечується високим споживанням на енергетичних підприємствах світу. За оцінками експертів, запасів вугілля у світі, за поточного рівня споживання, вистачить приблизно на 230 років (природного газу – на 60 років, нафти – на 40 років), що говорить про перспективність вугілля як енергетичного ресурсу.

У сучасних умовах впливу тенденцій декарбонізації [12] – [16] значна увага все ж таки приділяється видобутку корисних копалин, особливо в умовах погіршення гірничо-геологічних умов [17] – [20], що відповідає науковим потребам світової економіки.

Аналізуючи тенденції розвитку вугільної промисловості України [21], [22] слід зазначити досить складні умови видобутку, які при тому постійно ускладнюються, що є серйозною проблемою при відпрацюванні вугільних родовищ. Саме при збільшенні глибини розробки погіршуються гірничо-геологічні умови та підвищується потреба забезпечення стійкості гірничих виробок. В Україні середня глибина розробки вугільних родовищ наближається до 600 метрів, 60,8 % шахт працюють на глибині понад 500 метрів і 5 % – понад 1000 метрів. Збільшення глибини розробки за останні 30 років у середньому по Україні становило 505 метрів, або 16,8 метрів на рік.

Підвищення продуктивності праці при розробці вугільних родовищ України нерозривно пов'язано із забезпеченням необхідної стійкості гірничих виробок, адже в даний час трудомісткість підтримання виїмкових штреків нерідко перевищує 100 чол./змін на 1000 т видобутого вугілля [23], [24], що пов'язано з досить високою вагою металевих кріпильних матеріалів; при цьому так само витрачаються значні матеріальні ресурси. Тим не менш, лише відносно невелика кількість виїмкових штреків придатна до повторного використання.

Отже, вдосконалення технологічних процесів та застосування нових енергозберігаючих матеріалів є основними завданнями науково-технічного прогресу не тільки у гірничій промисловості, а й в інших галузях. Застосування нових інноваційних матеріалів та технологій при спорудженні гірничих виробок сприяє також підвищенню продуктивності праці.

Аналіз досліджень металевих матеріалів [25] – [27], показав, що зі збільшенням глибини проведення виробки потребується зміна спецпрофілю СВП, змінюється і його питома вага, за рахунок чого збільшується трудомісткість робіт, що виконуються, темпи проведення виробок зменшуються, а також величина конструктивної піддатливості стає невеликою, що обумовлюється незадовільним станом [28] гірничих виробок.

Аналізуючи дослідження [29] – [31], в світі вже давно обґрунтовують використання композитних матеріалів. А в роботі [32] проаналізовано використання композитів у гірничій промисловості та їх перспективи. На даний

момент часу композитні матеріали використовують у автомобілебудуванні, будівництві, інженерії, електроніці та ін (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Діаграма використання композитних матеріалів у різних галузях

Висока корозійна стійкість, здатність до сприйняття ударних навантажень, відмінна якість поверхні зумовили широке застосування композиційних матеріалів практично у всіх галузях промисловості [33]. Чільне місце займають ці матеріали у виробництві деталей для автомобільного та міського транспорту. З них виготовляють корпуси легкових автомобілів, автобусів, деталі внутрішнього інтер'єру, кабіни вантажівок, баки для пального, цистерни для перевезення рідких та сипких вантажів, корпуси та деталі внутрішнього оздоблення трамваїв та автобусів.

З цього можна зробити висновок, що композити піддаються великим напруженням та витримують їх [34] – [36].

Останніми роками світовий ринок композитних матеріалів динамічно розвивається [37] та в 2021 році оцінювався більш ніж в 99 мільярдів доларів при фізичній вартості 12 мільйонів тонн [38], [39].

Структура ринку композитів у різних країнах та прогноз його зміни до 2024 року наведено на рис. 1.3.

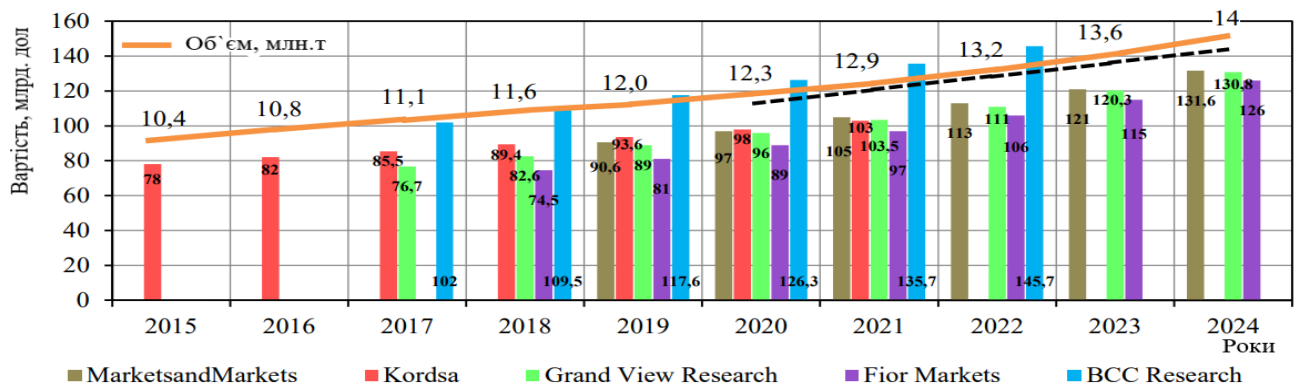


Рисунок 1.3 – Оцінка та прогноз світового ринку композитних матеріалів у період з 2015 по 2024 рік

Вуглепластики все частіше використовуються в транспортній техніці (28%), будівництві (19%), електроніці (16%), трубах і резервуарах (15%) – цифри можуть відрізнятися залежно від регіону та країни.

Перевагами композитних матеріалів є висока питома міцність, висока жорсткість та більш висока зносостійкість. Недоліки цих матеріалів наступні: висока вартість, анізотропія властивостей, підвищена наукоємність виробництва та необхідність спеціального дорогого обладнання, а також сировини.

Будівельна та автомобільна промисловість найбільше постраждали від спалаху Covid-19. Очікується, що їх швидке відновлення зростанню всього ринку композитів в довгостроковій перспективі [37].

У полімерних матрицях термопласти є ідеальними матеріалами для використання з екологічної точки зору, проте висока в'язкість розплаву і вартість сировини є основними обмеженнями для їх великомасштабного застосування.

Виробництво зростає, але не так швидко, як у США, Європі чи Азії. В результаті світове споживання композитів на душу населення коливається від 4 кг до 10 кг (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Споживання вуглепластиків на душу населення за країнами

Країна	Споживання на душу, кг
США	7,1
Японія	5,8
Німеччина	9,1
Австрія	4,0
Франція	3,9
Англія	2,3
Іспанія та Португалія	3,1
Скандинавські країни	4,4
Італія	4,7
Греція	3,2
Туреччина	3,4

Очікується, що загальний річний темп зростання становитиме від 4% до 7,7%, а обсяг ринку сягне 10,3 – 131,6 мільярдів доларів і приблизно 13 – 14 мільйонів тонн у 2024 році.

Країни Азії займають найбільшу частку ринку композитів, завдяки економічному розвитку транспорту, будівництва, вітроенергетики, виробництва труб та резервуарів, що стимулює високий попит.

Ринок Північної Америки становить 3,1 мільйонів тонн, що складає 26% світового ринку в натуральному значенні і 30% у вартісному вираженні. На ринок Південної Америки припадає 2% світового ринку або 300 тисяч тонн [37].

Європейський ринок становить близько 20% світового ринку за обсягом і вартістю. Ринок Африки і Близького Сходу обсягом 400 тисяч тонн як за обсягом, так і за вартістю становить 4% світового ринку [40], [41].

Для повного розуміння ринку композитів розглянемо рушійні та стримуючі фактори. Високі темпи зростання ринку композитів залежать від широкого спектру його властивостей, що виходять за рамки традиційних матеріалів, а також

варіативності методів створення виробів, від моделювання їх структури, властивостей і форми до вибору технології виробництва.

У 2021 р. на країни Азії припало 48% світового ринку в натуральному значенні і 43% у вартісному, тоді як тільки на китайський ринок припадало 28% світового ринку в натуральному значенні або 3,4 мільйонів тонн (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Структура ринку композитів за країнами в період 2021 р.

Країна	Натуральне і вартісне значення, млн.т/%	Натуральне і вартісне значення, млрд.дол./%
Північна Америка	3,1/26	27,9/30
Європа	2,4/20	19,5/21
Китай	3,4/28	23,3/25
Азія (без Китаю)	2,4/20	16,7/18
Африка та Близький Схід	0,4/4	3,7/4
Південна Америка	0,3/2	1,9/2
Сума	12,0/100	≈93/100

Основний вплив на цілісність реалізації механічних властивостей композитів при проектуванні виробів надає армуючий наповнювач, який вибирають з урахуванням очікуваного виду навантаження і напрямку його дії. Завдяки поєднанню високої міцності, хімічної та термічної стійкості, електропровідності та малої щільності вуглецеві волокна знаходять широке застосування, у тому числі у високонавантажених елементах конструкцій [42], [43].

Наприклад, різні композитні матеріали вимагають різних підходів. Це визначається вимогами до характеристик продукту, регламентами та ціновими порогами. Наприклад, матеріали, витрати і процеси в аерокосмічній промисловості сильно відрізняються від тих, які використовуються в автомобільній промисловості. Саме вони забезпечують такий широкий спектр клеїв, армуючих елементів, процесів механічної обробки та оздоблення.

Без їх застосування неможливе створення сучасних конкурентоспроможних виробів з більшою ваговою ефективністю при забезпеченні необхідного рівня пружно-міцнісних властивостей. При цьому вибір компонентів і технології

виробництва полягає в максимальному урахуванні можливих зовнішніх впливів на матеріали (фізичних, механічних, експлуатаційних) при проектуванні виробів.

Вуглепластики є високоміцними і розраховані на робочу температуру до 120 – 150 °С, також вони повинні забезпечувати збереження показників пружно-міцнісних властивостей при дії підвищених температур експлуатації.

Високотемпературні пластики забезпечують високу стабільність і зберігають механічні властивості при підвищених робочих температурах. Зараз їхня частка на світовому ринку пластмас становить близько 1%. Однак в останні роки в цій сфері спостерігається позитивна динаміка розвитку [44].

Вартість виробництва залежить від вибору сировини – основних (армуючих наповнювачів, компонентів полімерного зв'язуючого) і допоміжних матеріалів, технологічного обладнання, технологічного обладнання. Використання технології препрега є кращим варіантом для виготовлення відповідних структурних компонентів, забезпечуючи стабільність властивостей матеріалу, гнучкість в орієнтації волокон, низьку пористість і простоту виготовлення деталей складної форми.

Кількість продукту відіграє велику роль у кінцевій вартості. На діаграмі, що на рис. 2 представлені пропорції складових собівартості виробництва композитів залежно від їх обсягу.

Вартість зв'язуючих, використовуваних для виробництва варіюється. Таким чином, якщо вартість (ціна 2022 р.) ціаноефірного клею для виготовлення з робочою температурою до 200°C перевищує 40 фунтів стерлінгів/кг, то вартість бісмалеїмідного клею-реагенту (до 230 – 250 °) понад 50 фунтів стерлінгів/кг.

Слід зазначити, що для отримання високотемпературних композитів з робочими температурами (320-400°C) необхідні відповідні високотеплотворні витратні матеріали: вакуумні та ізоляційні мембрани, дренажні матеріали, ущільнювальні джгути, стрічки, матеріали для обладнання [45].

Основними виробниками таких допоміжних матеріалів є компанії: Stevik (Франція), Diatex (Франція), Solvay (США), Airtech Advanced Materials Group

(США, Великобританія, Китай, Люксембург) та інші компанії, які коштують за одиницю від 30\$.

Передбачається, що порівняно недорогі у виробництві композити мають мало перспектив на високі експлуатаційні характеристики. Для багатьох областей техніки бажані високі властивості матеріалів, але це не головний критерій їх придатності. Більшість цивільних композитів відносяться до категорії ціна/якість (рис.1.4), і існує ще дуже великий ринок, який ще належить освоїти. Основним способом здешевлення композитних виробів є розробка високопродуктивних технологій виготовлення.

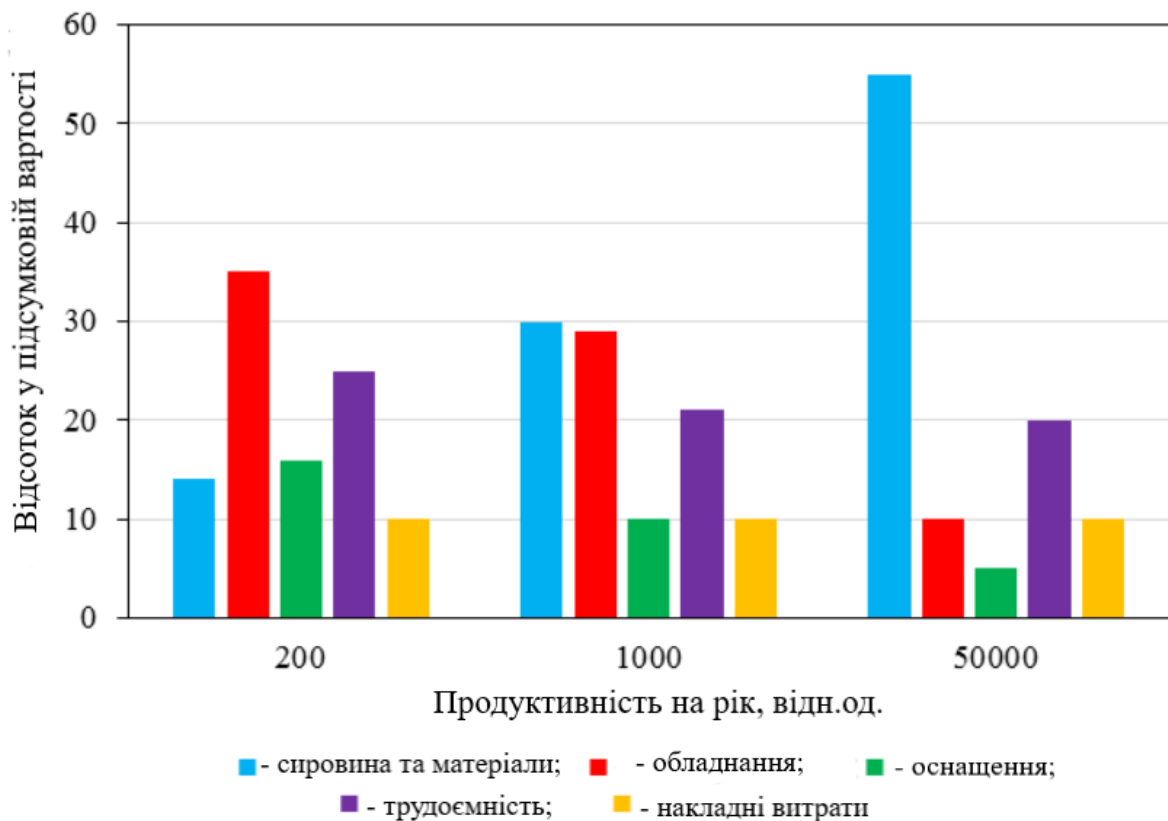


Рисунок 1.4 – Співвідношення складових вартості композитних матеріалів залежно від обсягів виробництва

Широке застосування знайшли композиційні матеріали в авіаційній та ракетно-космічній техніці [46], де використовуються такі їх властивості, як висока питома міцність та стійкість до дії високих температур, стійкість до вібраційних

навантажень, мала питома вага. З цих матеріалів виготовляються корпусні деталі та деталі внутрішнього інтер'єру.

Дуже широко композиційні матеріали застосовують у галузі суднобудування [47], [48]. Унікальні властивості композиційних матеріалів дозволяють виготовляти високоміцні, легкі корпуси катерів, яхт, шлюпок. З композиційних матеріалів також виготовляються рятувальні шлюпки для танкерів, що перевозять нафтопродукти. Такі шлюпки здатні винести екіпаж судна із зони нафти, що розлилася, у разі аварії. Це можливо досягти завдяки унікальним властивостям матеріалів, їх високої теплоізоляції та вогнестійкості.

У дослідженні [49] встановлені фізико-механічні властивості алюмоматричних композитів (табл. 1.3), а в роботі [50], порівняно фізико-механічні властивості композитів на основі вуглепластичних волокон та сталі (табл. 1.4).

Таблиця 1.3 – Фізико-механічні властивості алюмоматричних композитів

Фізико-механічні властивості	Al ₂ O ₃ -Al	Al-TiB ₂	Al-TiC
Мікротвердість, ГПа	44,6	44,6	44
Модуль пружності, ГПа	82,4	96	96
Міцність на розтяг, МПа	145	145	145
Границя текучості, МПа	107	90	142

Таблиця 1.4 – Порівняльні фізико-механічні властивості вуглепластику та сталі

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

З даних, які наведені у таблицях 1.3 – 1.4 можна зробити висновок, що вуглепластик буде в 5 разів легшим за сталь та алюміній, але при тому має не гірші

характеристики. При збільшенні частоти деформування в діапазоні, відповідному частоті коливань більшості конструкцій, модулі пружності вуглепластику значно зменшуються.

Високий прорив композитні матеріали зробили у галузі мостобудування [51], [52]. Використання склопластику відкриває перспективний шлях будівництва мостів із нових матеріалів. Побудований міст завдовжки 40 метрів, протягнутий упоперек однієї з найбільш завантажених залізниць у Данії [53]. Міст був спеціально розроблений для створення залізничних переходів. Ключовою умовою створення мосту, було те, що він повинен був бути встановлений у найкоротші терміни. У той самий час спорудження мало відповідати певним практичним і естетичним критеріям. Міст складався з трьох компонентів, які були встановлені на опори з болтами.

У роботах [54] – [61] показано, що властивості композитів залежать від: швидкості кристалізації, температурного градієнту, кристалографічної орієнтації, хімічного складу, досконалості структури.

В оборонній промисловості [62] композиційні матеріали зіграли значної ролі у стратегії та напрямі нових розробок. Так, захисні каски, бронежилети, що традиційно виготовляються у всіх країнах багато років з металу, нині також виготовляють з композиційних матеріалів. Швидкісні судна, транспортні кораблі, літаки невидимки, все це створено завдяки використанню композиційних матеріалів та постійному пошуку нових матеріалів і технологій. Аналіз цін на 1 кг вуглепластиків 2022 року показує, що для оборонної промисловості вона має найвищу додану вартість (понад 100 \$/кг).

Механічні властивості композиційних матеріалів залежать від фізико-механічних властивостей фазових складових та дефектів їх кристалічної будови. В композиційних матеріалах із волокнистою будовою фази зміцнення дефекти кристалічної структури накопичуються переважно в матричній фазі та межах розподілу між фазовими складовими.

Композитні матеріали мають високу міцність і жароміцність, в той же час вони малопластичні. Водночас волокна в цих матеріалах зменшують швидкість

поширення тріщин, що зароджуються в матриці і практично повністю зникає раптове крихке руйнування. Даний матеріал є основним елементом всіх природних і техногенних споруд. Він матеріалізує структурну концепцію [63] – [66].

Але однією з основних проблем застосування вуглепластику [67], [68] є його досить висока собівартість. Проаналізувавши світову тенденцію ринку композитів [69], [70], побудовано залежність, яка показує, що приблизно через 5 – 10 років вартість матеріалу зрівняється з металом (рис. 1.5).

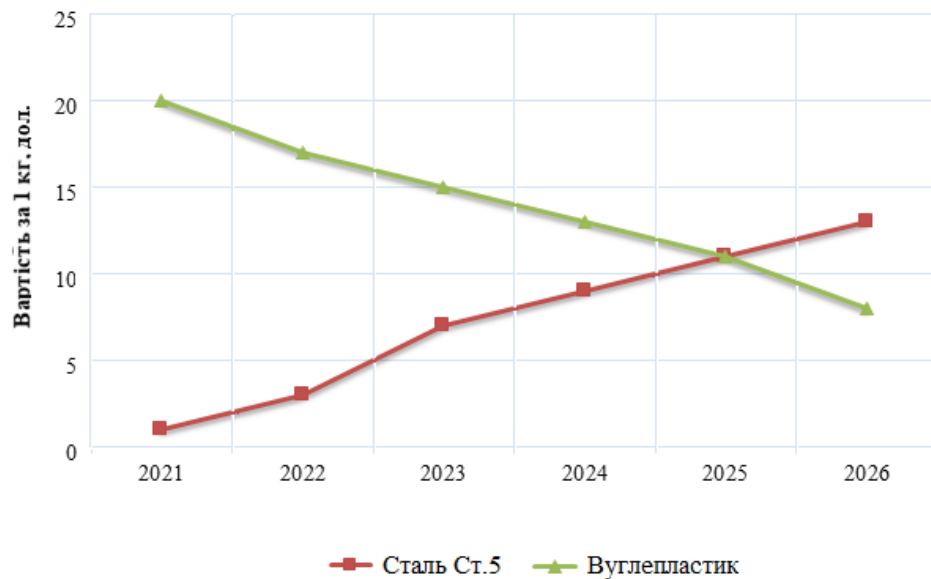


Рисунок 1.5 – Динаміка та прогноз зміни вартості сталі та вуглепластику на найближчі роки

Єдиним шляхом до зниження собівартості вуглепластику є вдосконалення процесу автоматизації виготовлення вуглеволокна, що призведе до здешевлення матеріалу та допоможе бути конкурентоспроможним на ринку інноваційних та металевих матеріалів.

1.2 Передумови використання композитних матеріалів у елементах кріплення гірничих виробок

Підвищення зацікавленості до проблем кріплення і підтримки підготовчих виробок вугільних шахт пов'язано зі збільшенням вимог до міцності та надійності матеріалів, а також до конструкцій кріплення у важких гірничо-геологічних

умовах, особливо на надглибоких горизонтах, де мають місце прояви підвищеного нерівномірного гірського тиску.

Забезпечення стійкості гірничих виробок комбінованими способами кріплення набуває великого поширення за рахунок нових інноваційних технологій [71] – [73]. Для умов надглибоких горизонтів шахт ($H > 1000$ м) дослідження [74] – [76] спрямовані на вдосконалення процесу кріплення гірничих виробок, показали, що наявні недоліки традиційних способів можливо зменшити і в деяких випадках виключити за рахунок використання сучасних технологій і матеріалів.

З середини ХХ ст. в усіх вугледобувних країнах світу отримали широке поширення рамні піддатливі кріплення, які зарекомендували себе як надійні матеріали для закріплення підготовчих виробок вугільних шахт.

Етапи застосування металевого кріплення в різноманітних комбінаціях [77] наведені на рис. 1.6.

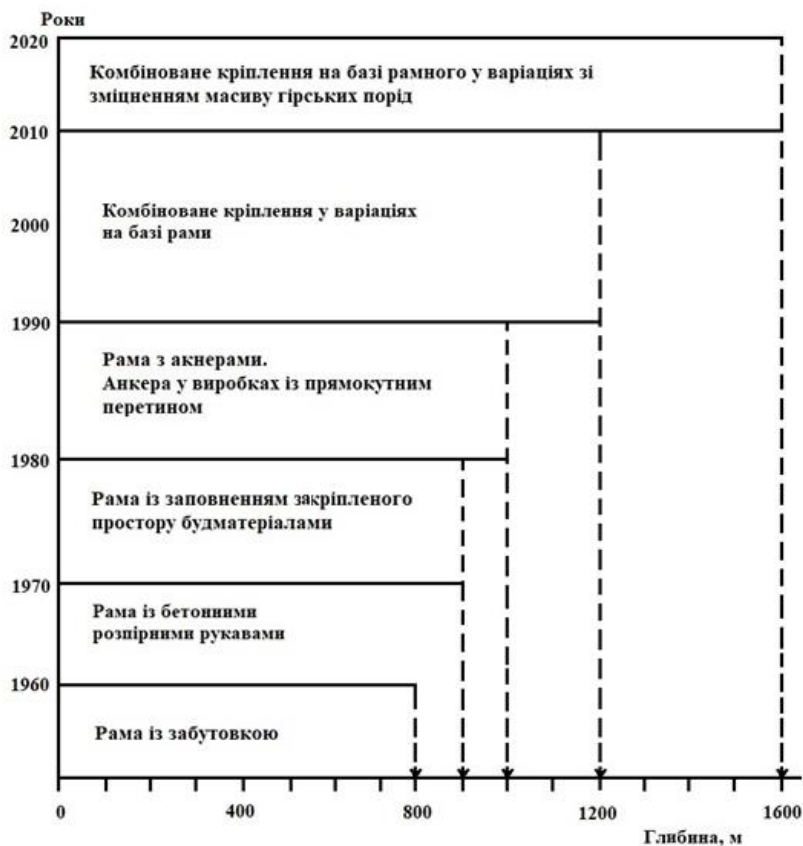


Рисунок 1.6 – Етапи застосування кріплення для підготовчих виробок вугільних шахт [77]

Рамні металеві кріплення почали широко використовуватись ще у XIX ст. після промислового освоєння металопрокату [78] – [80]. Проте перші кріплення не пристосовувались до важких гірничо-геологічних умов і в результаті пластичних деформацій кріплення руйнувалося. Тому для запобігання ситуацій із численими руйнуваннями конструкцій кріплення, на вугільних шахтах почали вводити нові шарніри, тобто вузли піддатливості, які дозволили знизити нерівномірність розподілу напружень.

Ускладнення умов відпрацювання вугільних пластів, як правило, пояснюють збільшенням глибини ведення гірничих робіт. Але під терміном «збільшення глибини ведення робіт» мається на увазі не тільки зниження рівня виконання робіт щодо земної поверхні, але і зумовлені ним геомеханічні, тектонічні і газодинамічні явища.

Виходячи із проаналізованих досліджень [81] – [85], зі збільшенням глибини розробки вугільних пластів на шахтах України з 500 м до 1000 м зміщення порід у підготовчих виробках зростають майже у 3 рази, а навантаження на кріплення збільшується більш ніж у 2 рази, тим не менш, арочне піддатливе кріплення забезпечує несучу здатність. Однак, при збільшенні глибини розробки з 1000 м і більше, металеве кріплення вже не в повному обсязі може забезпечити надійність виробок, що обумовлюється незадовільним їх станом, та у майбутньому зумовлює перекріплення гірничих виробок, що будуть використовуватись повторно.

На великих глибинах розробки родовищ спостерігається збільшення площини перерізу гірничих вибок, крок встановлення і маси кріплення. Збільшується площа перерізу виробок з 11,2 м² до 13,8 – 17,7 м², а подекуди на надглибоких горизонтах – до 22 – 25 м², що пов'язано, в першу чергу, з економічними вимогами інтенсифікації вуглевидобутку (навантаженням на очисний вибій), а також з технологічними – для забезпечення вентиляційного, газового та температурного режимів експлуатації. У сукупності, це значно відобразилось на негативному збільшенні витрат металопрокату при кріпленні гірничих виробок.

Це свідчить про масштабну невідповідність арочних типів кріплення гірничо-геологічним умовам, що ускладнилися, експлуатації, характеру інтенсивності прояву гірського тиску. Параметри кріплень, що застосовуються, не враховують особливостей геодинамічного впливу очисних робіт, зміни напружено-деформованого стану системи «кріплення – масив» у різні періоди експлуатації, що не дозволяє максимально використовувати несучу здатність породного масиву, забезпечити безпеку й знизити витрати на проведення й підтримку гірничих виробок.

На даний час, для підготовчих виробок, найбільш використовуваним є арочне піддатливе кріплення із спецпрофілю СВП 27 та СВП 33 (рис.1.7).

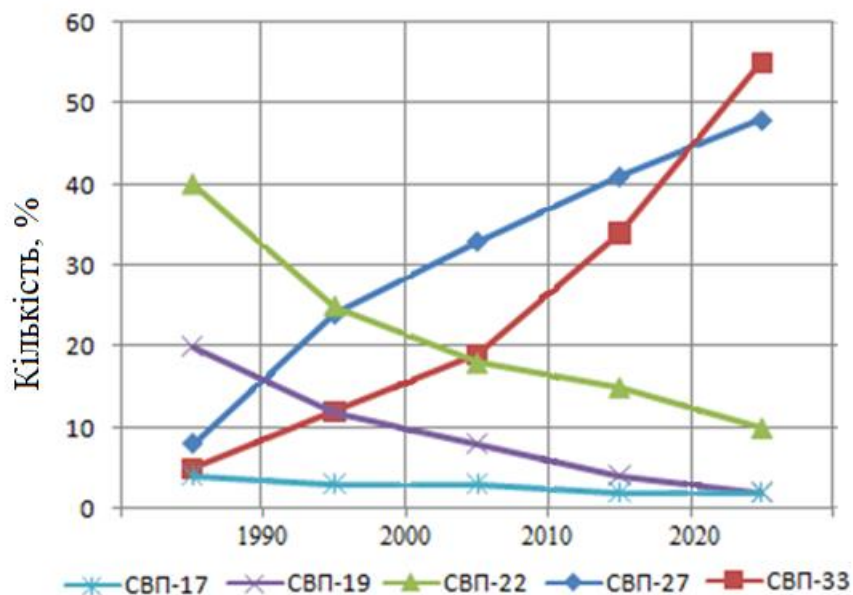


Рисунок 1.7 – Використання спецпрофілей СВП на шахтах України в період 1990-2020

Важливі дослідження з вивчення взаємодії кріплення із масивом гірських порід у різний час були проведені І.А. Ковалевською, Г.А. Симановичем, О.В. Колоколовим, О.В. Савостьяновим, Ю.М. Ліbermanом, В.С., І.Л. Черняком та ін.

В свою чергу, суттєвий вклад у вдосконалення конструкцій кріплення, а також в обґрунтування їх раціональних параметрів внесли В.І. Бондаренко, О.М. Шашенко, Ю.М. Халимендик, Б.М. Усаченко, В.Я. Кириченко та ін.

Виходячи з вищенаведеного варто дослідити роботи, що присвячені конструкціям кріплення виробленого простору арочними рамами та анкерами, а також з вивчення взаємодії кріплення з гірським масивом (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Дослідження, що присвячені конструкціям кріплення виробленого простору арочними рамами та анкерами, а також з вивчення взаємодії кріплення з гірським масивом

Науковці	Рік	Наукова новизна
Бондаренко В.І. та ін. [86], [87]	2023	Обґрунтовано арочне кріплення із композитних матеріалів (вуглепластиків) для гірничих виробок вугільних шахт
Круковський О.П. та ін [88]	2021	Визначено взаємодію анкерного кріплення з гірським масивом при зміцненні слабких порід за допомогою анкерів, а також модифікацію технології анкерного кріплення в умовах підвищення інтенсивності видобутку вугілля
Фомичов В.В. та ін [89]	2020	Визначено оптимальні параметри для проєктування повторно використаної виробки
Райва С., Любосік З., Плонька М. [90]	2019	Обґрунтовано безпеку кріплення та ведення лав з обрушенням попереду очисного вибою
Шашенко О.М., Прокудін А.З., Смирнов А.В. [91]	2017	Обґрунтовано геомеханічні аспекти вибору параметрів комбінованих кріплень капітальних виробок
Баришніков А.С. [92]	2016	Обґрунтовано закономірності деформування системи «кріплення-масив» у слабких породах у зоні впливу очисних робіт
Кириченко В.Я. [93]	2012	Розроблено наукові основи підвищення стійкості виробок високоресурсним кріпленням в геодинамічних зонах очисної виїмки
Пономаренко П.І. [94]	1991	Розроблено та застосовано патрони постійного опору, які здатні протидіяти навантаженню до 180 – 250 кН за рахунок витікання парафіну через отвори
Усаченко, Б.М. та ін [95]	1983	Обґрунтовано спосіб зведення анкерного кріплення

Із даних, що наведені у таблиці 1.5, можна зробити висновок, що наразі є неухильна тенденція до створення та впровадження нових засобів кріплення у гірничі виробки задля покращення праці шахтарів та зменшення витрат на кріплення та спорудження виробок. Це підтверджує актуальність даного дослідження.

Кардинальним вирішенням даної проблеми в зазначеній ситуації буде розробка нового інноваційного виду кріплення, при тому що, необхідність створення нових засобів кріплення гірничих виробок з істотним збільшенням стабільності параметрів, а також робочих характеристик диктується об'єктивно великими вимогами до кріплення та складністю гірничо-геологічних умов.

У роботі для підвищення стійкості гірничих виробок було прийнято рішення використовувати сучасні композитні матеріали замість традиційних металевих. Основною причиною вибору композиційних матеріалів для компонентів є економія ваги відносно жорсткості та міцності (рис.1.8).

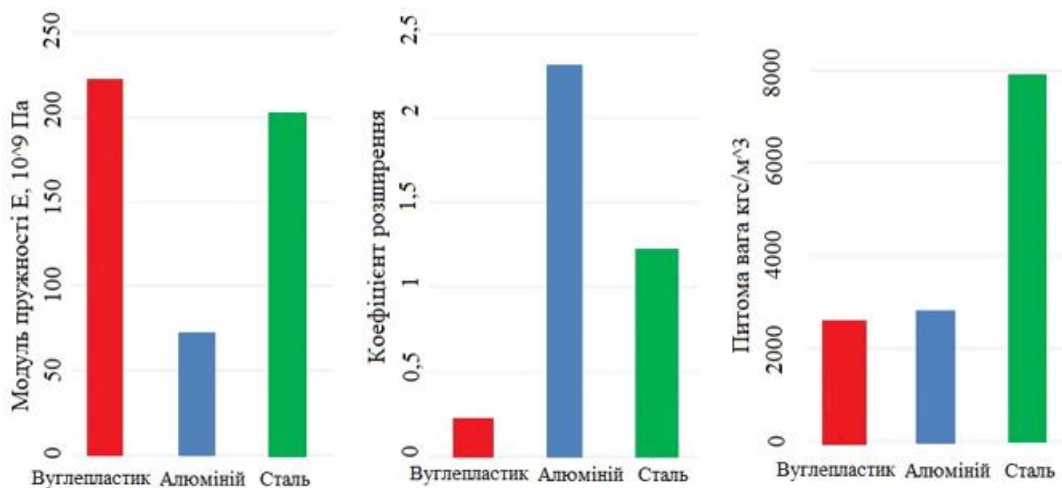


Рисунок 1.8 – Порівняння властивостей композитних матеріалів з алюмінієм та сталлю

Аналізуючи фізико-механічні властивості кріпильних матеріалів, можна зробити висновок, що композитні матеріали мають яскраво виражені переваги та тільки незначні недоліки. В дослідженнях [96], [97], обґрунтовувалась можливість

використання вуглепластику як кріпильного матеріалу, а головною його якістю є висока міцність при вкрай високому модулі пружності та низькій щільності та повзучості. Міцність на розтяг цього композитного матеріалу складає 1400 МПа, як і у сталі, яку використовують при кріпленні виробок. Густина вуглепластику складає 1500 кг/м³, в той же час як густина металу становить 7500 кг/м³.

З викладеного вище можна зробити висновок, що даний інноваційний матеріал буде в 5 разів легшим за сталь. Наприклад, армований вуглецевим волокном композит може бути міцнішим, ніж сталь, маючи лише одну п'яту ваги. Алюміній набагато ближчий за вагою до вуглеволокнистого композиту, хоча все ще дещо важчий, але композит може мати подвійний модуль і міцність до семи разів.

Цей вид композитного матеріалу має високу теплостійкість і тривалу стійкість до механічних напружень. Дані властивості роблять вуглепластики в промисловому виробництві більш затребуваними ніж склопластики та інші пластмасові матеріали.

Полегшення конструкції кріплення із композитних матеріалів також впливає на зменшення трудомісткості в процесі послідовного кріплення. При зменшенні ваги конструкції в 5 разів, послідовно переноситься і графік роботи зміни, що сприяє зниженню витрат часу на монтаж та демонтаж, а також безпеці праці шахтарів.

У результаті аналізу ступеня вивченості з розробки кріплення із композитних матеріалів можна відзначити, що цілеспрямовано такі дослідження не проводились. Найчастіше подібні наукові дослідження зустрічаються в рамках робіт, пов'язаних з розробкою нових видів і способів кріплення гірничих виробок, найчастіше – з ресурсозберігаючими технологіями. Подібні роботи виконувались у різний час із застосуванням актуальних наукових підходів.

У зв'язку з недостатнім ступенем вивченості проблеми та відсутністю вирішення аналогічних задач для конкретних гірничо-геологічних умов виникає необхідність продовжити дослідження щодо визначення раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт з

використанням сучасних методів розрахунку напружено-деформованого стану в композитного кріплення.

1.3 Аналіз особливостей методу комп'ютерного моделювання геомеханічних систем

Вирішення різних інженерних задач при освоєнні підземного простору передбачає попереднє дослідження та обґрунтування прийнятих рішень. Розгляд таких задач у аналітичній постановці передбачає використання розрахункових схем. Їх ускладнення з метою врахування впливу очисних робіт, інших технологічних факторів, наявності області зруйнованих порід навколо очисних чи підготовчих виробок, структурних особливостей породного масиву різко ускладнює рішення, використання простих аналітичних залежностей стає неможливим навіть у припущенні пружного деформування породного середовища.

Перші спроби використання обчислювальних потужностей для проведення експериментів відомі з часів початку розвитку комп'ютерних технологій [98]. Тим не менш, тривалий час якість одержуваних результатів значно поступалася результатам, отриманим математичним або лабораторним шляхом. Однак на даний момент часу переважна більшість результатів, отриманих на потужних комп'ютерних системах з використанням скінченно-різницевих чисельних методів показують прийнятну точність рішення.

На сучасному етапі розвитку комп'ютерних систем обчислювального експерименту великої складності стає цілком доступним способом розв'язання різних прикладних задач. Обчислювальний експеримент являє собою метод досліджень складних проблем, який ґрунтується на побудові та аналізі за допомогою обчислювальної техніки математичних моделей досліджуваного об'єкта. На відміну від аналітичних методів вирішення, чисельні методи дозволяють використовувати спеціально розроблене програмне забезпечення задля розв'язання великого кола задач [99] – [101].

Основу більшості сучасних обчислювальних експериментів становлять різницеві чисельні методи [102], [103]. Історія розвитку цих методів налічує понад

70 років. За цей час було накопичено значний досвід використання різних алгоритмів та підходів до вирішення інженерних задач. Відбувся процес модернізації самих методів.

Найбільш точні рішення поставленого завдання можна отримати, коли розрахункова схема або метод дозволяють врахувати досліджувані фактори. Широкі можливості відкривають чисельні методи розв'язання задач, запозичені з механіки твердого тіла. Найбільш ефективним є метод скінченних елементів (МСЕ).

В основі МСЕ лежать варіаційні принципи та методи будівельної механіки. Використання цих методів для чисельних розрахунків дозволяє створити зручну методіку наближеного розрахунку різних конструкцій. Це особливо важливо в аналітичних розрахунках, де отримання точного рішення пов'язане з розв'язанням складних диференціальних рівнянь [104].

Це чисельний сітковий метод, який оснований на поданні області, напружено-деформований стан якої потрібно визначити у вигляді сукупності плоских або просторових елементів різних конструкцій. Особливістю цього методу є ясне фізичне трактування розв'язуваних задач. Можливість визначення фізико-механічних властивостей кожного окремого елемента дозволяє враховувати неоднорідність властивостей області, що деформується, що ідеально поєднується з необхідністю моделювати шаруватий гірський масив. Технологія просторового моделювання дозволяє створювати елементи різної складності для максимальної відповідності моделі реальним умовам. Великі можливості зміни граничних умов дозволяють максимально наблизити модель до необхідних параметрів.

Зенкевич О. у своїх роботах [105] – [107] виклав основи методології розв'язання великої кількості задач математичної фізики. Для вирішення фізично нелінійних задач запропоновано три варіанти методу прирощень: змінної жорсткості, початкових напружень та початкових деформацій. Використання кожного з методів для розв'язання конкретної задачі пов'язане з особливостями схеми навантаження, властивостями матеріалів та граничними умовами.

У дослідженнях [108], [109] автори робили дослідження з врахування

неоднорідності фізико-механічних показників порід гірського масиву. Наведено методу інтегрування математичних моделей порід у розрахункову схему методу скінченних елементів. Найцікавішим є визначення НДС гірського масиву з урахуванням повної діаграми «напруження-деформації» складових його порід. Автором запропоновано методу пошуку рішення за допомогою методу фіктивних зусиль, яка добре узгоджується з уявленнями про рівновагу суцільного середовища у надмірному стані матеріалу.

У роботі [110] розглядається великий діапазон особливостей, які властиві гірському масиву, в контексті математичного опису для використання з уже існуючим математичним апаратом методом скінченних елементів. Це одна з фундаментальних праць у сфері застосування МСЕ при розв'язанні задач геомеханіки. На основі зміненого та узагальненого закону Гука авторами будується матриця жорсткості окремого елемента, після чого наводиться рішення для системи плоских трикутних елементів.

За допомогою МСЕ Валашик Ю. в роботі [111] провів аналіз поведінки порід покрівлі очисної виробки в однорідному шаруватому масиві. Результати були отримані для розв'язання плоскої задачі у пружній постановці, але не було досліджено шаруватий масив та пружна постановка задачі.

У дослідженнях закордонних вчених [112] – [115] показано можливість використання чисельних методів моделювання для оптимізації передачі навантаження між анкером та породними шарами. Отримані результати свідчать, що стандартний арматурний анкер, який зазвичай використовується в чисельному моделюванні для підтримки підземних виробок, не може бути використаний для оптимізації можливості передачі навантаження. Потрібно побудувати детальну модель структури анкера, яка повністю навантажена, і порівняти з іншими типами, щоб знайти оптимальну структуру з максимальними можливостями передачі навантаження між анкером та гірськими породами.

Комп'ютерне моделювання геомеханічних ситуацій у підготовчих виробках знайшло застосування на шахті «Добропільська» – при розробці заходів щодо проведення та підтримки виробок поблизу геологічних порушень. На шахтах

«Білозерська» та «Новодонецька» – при розробці заходів щодо забезпечення тривалої стійкості протяжних виробок, а також для вибору та обґрунтування заходів щодо забезпечення тривалої стійкості одного з дренажних квершлагів на ШУ «Покровське», схильного до вивалів, значних деформацій кріплення і сильного здимання порід підшоши [116].

В останнє десятиріччя доступність необхідних обчислювальних потужностей та розвиток спеціалізованих програмних комплексів дозволило зробити доступним використання МСЕ для проведення великих обчислювальних експериментів з визначення НДС гірського масиву з урахуванням неоднорідності та шаруватості, а також з можливістю задавати фізико-механічні властивості матеріалів, ідентичні реальним. За останні 20 років досягнення розвитку даного підходу до вирішення задач геомеханіки були реалізовані в роботах багатьох наукових колективів провідних вузів та науково-дослідних інститутів [117] – [123].

Однак, незважаючи на достатню універсальність методу, до його недоліків можна віднести проведення розрахунків компонентів НДС у пружній постановці, яка згодом уточнюється за пружно-пластичним алгоритмом, що враховує ефект знеміцнення гірського масиву. Використання подібного симбіозу аналітичних методів та чисельного моделювання дозволяє вирішувати широкий спектр задач, проте при цьому відбувається спрощення моделі, що не сприяє досягненню максимальної відповідності моделі до реальним умовам.

Колектив авторів кафедри будівництва, геотехніки та геомеханіки НТУ «Дніпровська політехніка» у роботах [124] – [128], спираючись на досвід використання аналітичних методів розрахунку НДС гірського масиву, перейшов на застосування комплексного підходу до оцінки стану виробок з використанням чисельного комп'ютерного моделювання. Застосування такого підходу дозволяє прогнозувати стан виробок на кожній з ділянок, у межах яких масив має структурні та текстурні особливості. Комплексна методика оцінки стійкості протяжних виробок на основі комп'ютерних моделей застосовується у будь-яких гірничо-геологічних умовах для будь-яких виробок як у вугільних шахтах, так і у рудних.

Значний внесок у розвиток підходів до вирішення науково-практичних задач

за допомогою розрахунку НДС гірського масиву, використовуючи обчислювальний експеримент на основі МСЕ, зробив колектив кафедри гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка» [129] – [135].

Фомичовим В.В. у дослідженнях [136] – [138] була обґрунтована просторова геомеханічна модель зсуву навколо виїмкової виробки шаруватого масиву слабких порід з урахуванням скінченно-елементної побудови реальних геометричних параметрів рамного кріплення, затяжки та закріплення простору з відповідними умовами їхнього контакту. Розроблено новий алгоритм розрахунку НДС системи «шаруватий масив – кріплення виробки», який одночасно враховує змінні механічні характеристики шаруватого масиву слабких порід як у дограничному, так і пограничному станах.

У роботах Бондаренка В.І., Симановича Г.А., Ковалевської І.А., Снігура В.Г. та ін. [139] – [145] реалізується підхід до розв'язання задач за допомогою аналітичних методів, математичного та чисельного моделювання, а також шахтних експериментів. Ефективне застосування відомих і традиційних методів визначення НДС доповнюється точними кількісними показниками, що одержуються під час комп'ютерного моделювання. Цей підхід відмінно зарекомендував себе під час вирішення проблем підтримки підготовчих та виїмкових виробок, визначення раціональних параметрів схем анкерного та рамного кріплення, розробки рамно-анкерного кріплення з гнучкими зв'язками між елементами та ін. Слід зазначити, що найбільш значущим досягненням авторів у цих наукових роботах є побудова моделі масиву гірських порід, що відповідає реальним умовам врахування шаруватості та фізико-механічних властивостей кожного окремого шару, а також моделювання рамного кріплення КШПУ з спецпрофілем СВІ. Це дозволило отримати адекватні результати, а також відкриває можливості використання даного підходу для моделювання різних видів кріплень за будь-яких гірничогеологічних умов, при цьому зберігатиметься максимальна деталізація без необхідності усереднювати будь-які характеристики моделі.

У зв'язку з пластичністю композитних матеріалів та їх властивостям виникає можливість роздрукування кріплення із вуглепластику на 3D-принтері та

проведенні лабораторних досліджень на гідравлічному пресі. Виходячи з цього, постає необхідність продовжити дослідження з використанням сучасних методів 3D-друку.

1.4 Аналіз особливостей технології 3D-друку

Перші спроби використання 3D-принтерів для роздрукування моделей відомі з часів кінця XX сторіччя [146], [147]. Але саме в останнє десятиліття технології 3D-друку отримали широке поширення [148], [149].

У наукових роботах [150] – [153] широко досліджено процес тривимірного друку, який називають Rapid Prototyping. Таким чином, 3D-принтинг – це метод, який дозволяє з математичної моделі, що розробляється в спеціальній CAD-системі, отримати пошарово створений фізичний об'єкт. Технології 3D-друку знаходять широке застосування у багатьох галузях, а саме: в медицині, машинобудуванні, приладобудуванні, в енергетиці, автомобілебудуванні, легкій промисловості та ін. [154] – [157].

Так, у дослідженнях [158], [159] проведено аналіз сучасного стану легкої промисловості та перспективи її розвитку за допомогою новітніх технологій. Розглянуто області застосування технології 3D-друку у різних галузях промисловості та наведено характерні напрямки її застосування в легкій промисловості, зокрема під час виготовлення одягу, взуття та деталей в галузевому машинобудуванні.

У будівництві [160], [161] широко поширений метод створення будинків за допомогою 3D-принтерів, а провідні вчені з університету Південної Каліфорнії створили систему 3D-друку для роботи з великогабаритними об'єктами. Система працює за принципом будівельного крана, який зводить стіни із шарів бетону. Такий 3D-принтер може звести двоповерховий будинок лише за 20 годин. Робітникам залишиться лише встановити вікна, двері та провести внутрішнє оздоблення приміщення.

Технології 3D-друку в медицині офіційно використали ще у 1999 році, коли співробітники американського Інституту регенеративної медицини імплантували

людині орган, зроблений із застосуванням комп'ютерної томографії та 3D-принтера. Зараз 3D-друк у медицині досить широко застосовується [162], [163] за рахунок різноманіття напрямків та можливостей. Серед них виділяють створення імплантатів, друк кісток, моделювання внутрішніх органів людини, створення медичних інструментів для лікарів.

3D-друк у медицині дозволяє з високою точністю моделювати та створювати стоматологічні імплантати, протези, прототипи органів. Також 3D-принтинг допомагає вже працюючим фахівцям та медикам ефективніше вчитися та підвищувати кваліфікацію, практикуватися та складати точні плани хірургічних операцій. З появою нових, все більш досконалих пристроїв для друку та розширення списку матеріалів адитивні технології в медицині розвиваються дедалі швидше. Найбільш активно 3D-друк в медицині застосовується у США.

У мостобудуванні технології 3D-принтингу також знайшли своє застосування. Роздруковані на 3D-принтерах мости зараз активно експлуатуються у Нідерландах, Китаї та США [164].

У машинобудуванні 3D-друк створює умови, що дозволяють вирішувати різні завдання ефективно, швидко і якісно. Серед цих завдань можна назвати такі як: розробка прототипів та виготовлення нових компонентів та агрегатів (концепт-моделі, тестові зразки), створення більш сучасних систем та їх елементів, а також виробництво та ремонт старих деталей. 3D-обладнання на практиці показало свою ефективність та можливості з виробництва більш якісних та менш дорогих за собівартістю виробів [165].

В енергетиці технології 3D-друку здійснили неабиякий прорив. Американські вчені створили та роздрукували прототип активної зони ядерного реактора. Також варто зазначити, що 3D-друк активно використовують також у відновлюваній енергетиці, і що сонячні панелі, виготовлені на 3D-принтері, на 20% ефективніші за стандартні. Нові матеріали та технології ще більше підвищують ефективність пристроїв.

На сучасному етапі методів 3D-друку досить багато і для них характерні такі фази:

1. Формування віртуальної моделі на комп'ютері.
2. Експорт 3D-моделі у формат принтера.
3. Генерація G-коду.
4. Налаштування принтера та власне друк.
5. Фінальна обробка фізичної моделі.

Отже, на першому етапі 3D-друку потрібно за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення створити тривимірну модель на комп'ютері.

Далі відбувається експорт цієї віртуальної моделі у формат STL, який спеціалізований для 3D-друку. Перш ніж розпочати експорт, потрібно вказати деталізацію моделі та деякі інші параметри.

Генерація G-коду необхідна для того, щоб STL-файл, що містить інформацію про майбутній об'єкт, обробився програмою-слайсером. Вона трансформує інформацію про об'єкт безпосередньо на код, зрозумілий 3D-принтеру. В іншому випадку пристрій 3D-друку просто не зрозуміє, що від нього потрібно. Для генерування коду використовуються також спеціальні програми та утиліти. Вони вказують, у якій послідовності наносити матеріал, розбиваючи модель на найтонші платівки по горизонталі. Тож друкуюча головка розумітиме, якою траєкторією їй рухатися.

Опісля відбувається друк. У процесі 3D-друку головка принтеру переміщається заданою траєкторією і випускає робочий полімер. Залежно від складності об'єкта, моделі принтера та інших факторів процес друку може займати від декількох годин до декількох днів.

Фінальна обробка об'єкта є відшліфуванням виступів, усунення підтримуючих елементів і т.д. На виході має з'явитися абсолютно гладка кольорова або монохромна модель. Якщо всі етапи виконуються правильно, відповідно до всіх технологічних вимог, то в результаті вийде якісна модель, яка відповідає всім вимогам.

1.5 Висновки. Мета, ідея, методи та основні задачі досліджень

У результаті аналізу сучасного стану гірничодобувної галузі України, перспектив застосування композитних матеріалів у елементах кріплення гірничих виробок, вивченості питань застосування інноваційних матеріалів для вугледобувної галузі сформульовано такі висновки:

1. На глибинах розробки понад 1000 метрів суттєво збільшується гірський тиск, що потребує зміни спецпрофілю СВП, змінюється і його питома вага, за рахунок чого збільшується трудоємність робіт, що виконуються, темпи проведення виробок зменшуються, а також величина конструктивної піддатливості стає невеликою, що обумовлюється незадовільним станом гірничих виробок.

2. Суттєво зростає і питома металомісткість спецпрофілей СВП, яка становить на даний період часу 1000 – 1200 кг/пог.м. Також, щорічно, середня довжина ремонтів виробок сягає 43 – 57%, а таких, що повністю перекріплюються – 12 – 25% від обсягу підтримуваних.

3. Встановлено тенденцію збільшення цін на металеві матеріали за останні 15 років і тренд розвитку на 10 років вперед, із чого видно, що ціна на метал збільшилась на 30 %, а ціна на композитні матеріали знижується за цей же проміжок часу на 15 %. Простежується тенденція, що у 2028 – 2030 рр. вартість металу та композитних матеріалів буде однаковою, а враховуючи, що композитні матеріали в 5 разів легше металу, то зменшиться трудомісткість робіт, що виконуються.

4. Виконано порівняння та встановлено, що фізико-механічні властивості композитних матеріалів, таких як: модуль Юнга, щільність, міцність при розтягуванні, питома міцність, питомий модуль, межа міцності при вигині та межа міцності при стисненні.

5. Однією із суттєвих переваг є те, що кріплення з композитних матеріалів можна роздрукувати за допомогою сучасних технологій друку на 3D-принтері.

Виходячи з вищенаведеного сформульовано мету і завдання досліджень.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт,

розташованих на глибинах понад 1000 метрів з урахуванням закономірностей зміни напружено-деформованого стану гірського масиву.

Поставлена мета досягається послідовним виконанням наступних *завдань досліджень*:

1. Аналіз використання композитних матеріалів та їх фізико-механічні характеристики.
2. Розробка та обґрунтування моделі кріплення із композитних матеріалів для впровадження її в гірничі виробки, лабораторні дослідження композитного кріплення, що надруковано на 3D-принтері;
3. Обґрунтування просторової геомеханічної моделі навантаження гірського масиву та композитного кріплення виробки за різних гірничо-геологічних умов;
4. Встановлення закономірностей зміни напружено-деформованого стану (НДС) композитного кріплення та встановлення взаємовпливу параметрів його елементів;
5. Розробка методики розрахунку раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів;
6. Розробка економічної доцільності використання композитного кріплення у гірничих виробках на глибинах понад 1000 метрів.

Об'єктом дослідження є геомеханічні процеси керування НДС шаруватого гірського масиву і кріплення гірничих виробок вугільних шахт інноваційним видом кріплення.

Предмет дослідження – закономірності впливу НДС геомеханічної системи на параметри кріплення гірничих виробок, які закріплені інноваційним видом кріплення та розташовані на глибинах понад 1000 метрів.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що містить у собі аналіз і узагальнення наукових праць та розробок у досліджуваній області, аналітичні й експериментальні методи визначення раціональних параметрів, розрахунок і аналіз напружено-

деформованого стану породного масиву чисельними методами, економіко-математичне моделювання з використанням пакета прикладних програм.

Вирішення поставлених завдань базується на основі *ідеї роботи* – врахуванні закономірностей зміни напружено-деформованого стану порід для обґрунтування раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів.

Для більш наочного уявлення про сутність і взаємозв'язок розв'язуваних завдань розроблено алгоритм їх комплексної реалізації, зображений структурно-логічною схемою, яка наведена на рис. 1.9.

Основні результати першого розділу опубліковано в наукових працях [32], [49], [86], [87].



Рисунок 1.9 – Структурно-логічна схема проведення досліджень

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА КРІПЛЕННЯ ІЗ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

2.1 Розробка моделей кріплення із композитних матеріалів

Сучасний стан гірничодобувної галузі, як у нашій країні, так і за кордоном характеризується тенденцією до поступового збільшення глибини гірничих робіт, що збільшує собівартість видобутку та негативно впливає на безпеку цих робіт.

Поняття «велика» та «мала» глибина H відносні. Так, глибина розробки 500 м в умовах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» буде вважатися «великою», а та ж глибина в 500 м в умовах ШУ «Покровське» буде «малою», залежно від значення критерію локального нормованого критерію руйнування (ЛНКР).

На відносно «малих» глибинах гірських тиск не залежить від глибини H та міцності порід на стискання σ_c , зате досить помітно впливає розмір виробки та міцність на розтяг σ_p . Режим роботи кріплення (піддатливий або жорсткий) тут буде несуттєвим, оскільки відпір кріплення не впливає на зміщення порід.

Тоді як на «великих» глибинах розробки гірський тиск значно залежить від глибини H і міцності порід на стискання σ_c , а розмір виробки та міцність на розтяг σ_p несуттєві. Особливо важливо, що в цих умовах відпір кріплення багато в чому залежить від зсуву порід, що вимагає застосування піддатливих, а не жорстких конструкцій кріплення.

Слід зазначити, що термін «велика глибина» не має чітко встановлених меж. Для його визначення розглядається рівень напруженого стану гірського масиву залежно не тільки від регіону, а й від конкретних умов експлуатації виробки. Цей технічний термін має на увазі таку глибину, нижче якої поведінка породного масиву кардинально змінюється, а забезпечення експлуатаційного стану виробок вимагає проведення спеціальних заходів.

Зі збільшенням глибини робіт прояв гірського тиску не тільки збільшується, а й з'являються раптові обвалення бокових порід, гірські удари, підвищене

газовиділення. У зв'язку з цим все більша увага придіється охороні підготовчих виробок.

Зі збільшенням глибини розробки вугільних пластів на ШУ «Покровське» гірничо-геологічні умови проведення та підтримки гірничих виробок значно погіршуються. Їх будівництво та експлуатацію супроводжують численні прояви складних гідрогеологічних, геомеханічних, геодинамічних та газодинамічних явищ.

Підвищення зацікавленості до проблем кріплення і підтримки підготовчих виробок вугільних шахт пов'язано зі збільшенням вимог до міцності та надійності матеріалів та конструкцій кріплення у важких гірничо-геологічних умовах, особливо на надглибоких горизонтах, де мають місце прояви підвищеного нерівномірного гірського тиску.

Необхідність створення нових засобів кріплення гірничих виробок зі значним збільшенням стабільності параметрів, а також робочих характеристик, диктується об'єктивно великими вимогами до кріплення та складними гірничо-геологічними умовами.

Процес розробки інноваційного виду кріплення виробленого простору вельми важка задача, яка спрямована не тільки на запобігання деформації масиву гірських порід, а й на боротьбу з негативними явищами: водоприпливами, здиманням порід підосви та ін. При цьому, кінцева ефективність визначається не тільки надійністю, але і витратами на трудомісткість виконуваних робіт [166]. Виділимо кілька факторів, які значно ускладнюють процес розробки кріплення:

- по-перше, неухильна тенденція до ускладнення гірничо-геологічних умов розробки;
- по-друге, постійно зростаючі матеріальні та трудові витрати на кріплення виробок;
- по-третє, необхідність посилення вимог безпечного ведення підземних робіт.

На великих глибинах розробки родовищ спостерігається збільшення площини перерізу гірничих виробок, крок встановлення і маси кріплення.

Збільшується площа перерізу виробок з $11,2 \text{ м}^2$ до $13,8 - 17,7 \text{ м}^2$, а подекуди на надглибоких горизонтах – до $22 - 25 \text{ м}^2$, що пов'язано, в першу чергу, з економічними вимогами інтенсифікації вуглевидобутку (навантаженням на очисний вибій), а також з технологічними – для забезпечення вентиляційного, газового та температурного режимів експлуатації. У сукупності, це відобразилось на негативному збільшенні витрат металопрокату при кріпленні гірничих виробок.

В основу першої розробки (рис. 2.1) поставлено задачу вдосконалення арочного кріплення, в якому, введенням нових конструктивних елементів та їх взаємозв'язку, досягається можливість демпфування за рахунок зміни взаємодії верхняку та стояків рами при полегшенні конструкції та зменшенні напружень навколо контуру кріплення, особливо в складних гірничо-геологічних умовах. За рахунок такого технічного рішення зменшується трудомісткість робіт, що виконуються з прискоренням часу технологічних робіт, а також безпеки праці шахтарів.

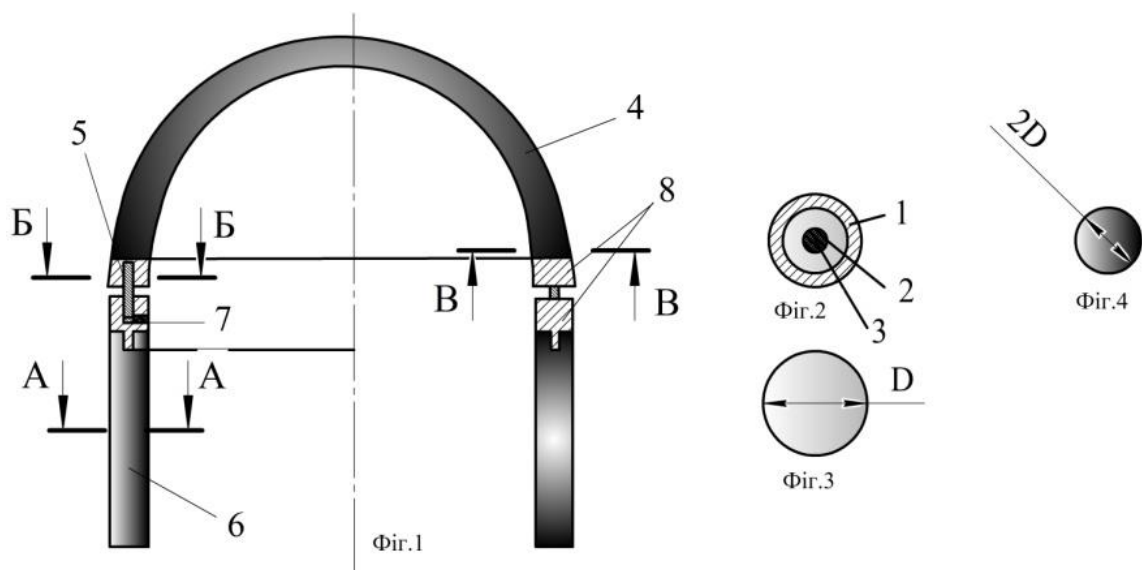


Рисунок 2.1 – Модель арочного піддатливого кріплення із вуглепластика [167]:

- 1 – метал; 2 – вуглепластик; 3 – пластичний матеріал; 4 – верхняк;
- 5 – металевий штокоподібний поршень; 6 – стояк; 7 – дроссельний отвір;
- 8 – вузол піддатливості

Розробка конструкції кріплення із композитних матеріалів включає в себе верхняк з'єднаний вузлами піддатливості зі стійками однакового профілю, вузли піддатливості виконані у вигляді циліндру, який заповнений пластичним матеріалом, штокоподібної форми з можливістю переміщення верхняку рами у вертикальній площині, а також демпфування кріплення.

Піддатливість конструкції починає відбуватися в складних гірничо-геологічних умовах. Верхняк рами з вмонтованим металевим штоком починає просідати, після чого пластичний матеріал починає текти і виходити через дросельний отвір. Арочне кріплення починає працювати у піддатливому режимі в умовах досить великих напружень та є можливість витікання пластичного матеріалу через дросельний отвір, коли конструкція починає демпфувати, а металевий шток опускається уздовж стояка рами. Це супроводжується більш рівномірним розподілом напружень за контуром усього кріплення, що разом з фактором змінного профілю сприяє більш рівномірному напруженню навколо контуру кріплення.

Таким чином, перша модель кріплення із композитних матеріалів дозволить збільшити темпи проведення гірничих виробок, зменшить трудомісткість робіт, що виконуються та підвищить безпеку праці шахтарів з прискоренням роботи зміни.

Проблема забезпечення стійкості гірничих виробок на вугільних шахтах є однією з найактуальніших в гірничому виробництві, так як від їх експлуатаційного стану залежить ефективність та безпечність проведення гірничих робіт.

Суттєвим кроком для вирішення важливої задачі кріплення виробленого простору, а також ресурсозбереження, зменшення питомої ваги конструкцій та зміцнення породного масиву є розробка другої моделі кріплення із вуглепластику на основі біоніки.

Розроблена модель (рис. 2.2) арочного піддатливого кріплення із вуглепластику змінного перерізу, завдяки якому досягається можливість більш нерівномірного розподілу гірського тиску по контуру кріплення. Це досягається тим, що у розробленій конструкції верхняк та стояки рами із вузлами піддатливості виконані круглим перетином змінного перерізу із вуглепластику, при чому кожен

вузол піддатливості – у вигляді циліндру, заповненого пластичним матеріалом з можливістю демпфування кріплення при взаємодії з гірським масивом.

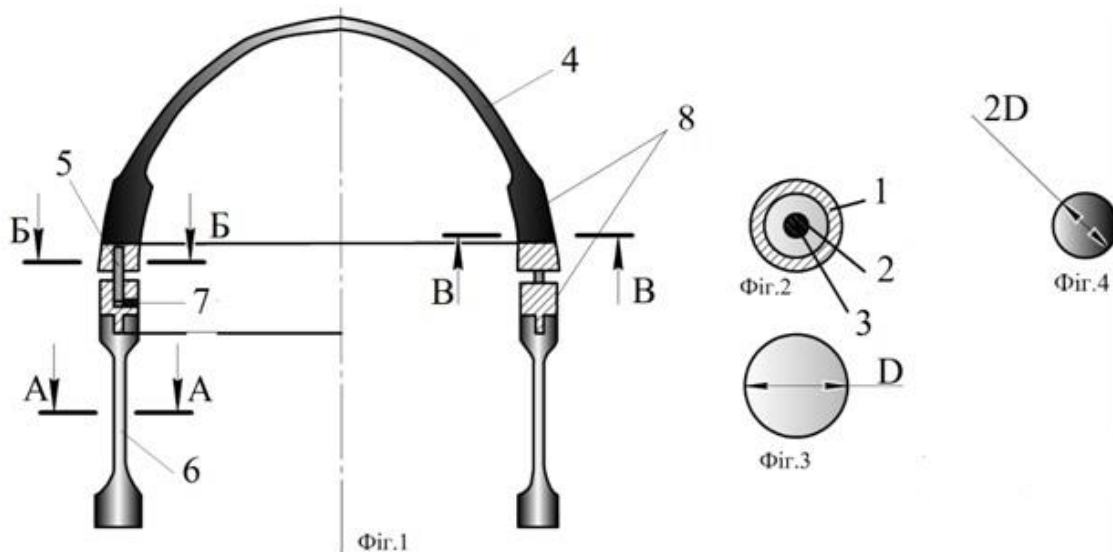


Рисунок 2.2 – Модель арочного піддатливого кріплення змінного профілю із вуглепластику [168]:

1 – метал; 2 – вуглепластик; 3 – пластичний матеріал; 4 – верхняк змінного профілю; 5 – металевий штокоподібний поршень; 6 – стояк змінного профілю; 7 – дросельний отвір; 8 – вузол піддатливості

Кріплення здатне забезпечити стійкість гірничих виробок шляхом більш нерівномірного розподілу напружень навколо контуру кріплення, а також підвищити несучу здатність конструкції за рахунок змінного перерізу при значному полегшенні спецпрофілю, причому зменшується трудомісткість робіт, що виконуються та підвищується безпека праці шахтарів.

Піддатливість цієї конструкції починає відбуватись під час виникнення навколо гірничої виробки зони непружних деформацій. Тиск порід з боків сприймається стояками змінного перерізу. Тиск порід з боку покрівлі сприймається верхняком змінного перерізу. 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 демпфування та піддатливості конструкції.

Сутність кріплення полягає у новому пружно-піддатливому елементі – патроні постійного спротиву. Патрон являє собою циліндр з поршнем (рис.2.3). Під дією навантажень парафін з циліндру починає витікати через дросельний отвір, а верхняк рами починає просідати, завдяки чому досягається піддатливість конструкції. Досягається необхідна геомеханічна рівновага системи "кріплення-масив", яка забезпечується силами опору вузлів піддатливості, тобто підвищеним робочим опором, що реалізується на основі підвищення несучої здатності конструкції композитного кріплення.

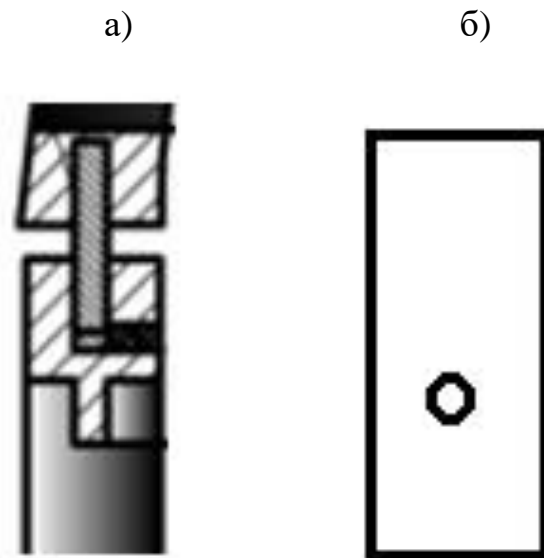


Рисунок 2.3 – Патрон постійного спротиву (а) та його поперечний переріз (б)

2.2 Методика проведення обчислювального експерименту з обґрунтування взаємодії композитного кріплення з гірським масивом

Актуальність використання обчислювального експерименту для визначення НДС вуглевмісного гірського масиву та кріпильної системи підготовчої виробки було доведено у першому розділі на підставі проведеного аналізу сучасних уявлень про методи вирішення аналогічних завдань. Внаслідок стрімкого розвитку обчислювальної техніки протягом чверті останнього сторіччя, а також

застосування методу скінченних елементів, який дозволяє звести завдання до системи лінійних рівнянь рівноваги шляхом мінімізації потенційної енергії, проведення обчислювальних експериментів для вирішення прикладних задач геомеханіки набула широкого поширення.

Задачі, які пов'язані з моделюванням геомеханічних процесів навколо як очисних, так і підготовчих гірничих виробок, основані на методах розв'язання диференціальних математичних рівнянь. Ці методи дозволяють при високій трудомісткості виконуваних операцій отримати досить високу точність одержуваних результатів.

На сучасному етапі розвитку гірничої науки і комп'ютерних технологій найбільшу зацікавленість становлять собою теоретичні дослідження із застосуванням математичних моделей геомеханічних процесів, що протікають в масиві гірських порід.

Враховуючи специфіку диференціальних рівнянь, які описують напружено-деформований стан шаруватого масиву гірських порід навколо виробок, до методу їх вирішення пред'являються такі вимоги [169]:

1. Можливість повної автоматизації процесу розрахунку напружень і деформацій у масиві гірських порід. Це пов'язано з тим, що при розгляді підготовчої виробки необхідно виконувати математичні операції з великим об'ємом числових даних.

2. Точність розрахунку повинна бути достатня для вирішення практичних задач з механіки гірських порід.

3. Можливість вирішення об'ємних завдань.

4. Можливість знаходження рішень для гірничих виробок і виробленого простору, що мають складну геометричну форму, як в плані, так і в розрізі.

5. Наявність ясного фізичного трактування процесів.

Найкраще цим вимогам відповідає метод скінченних елементів (МСЕ). Основна ідея цього методу полягає в тому, що будь-яку неперервну величину, таку як деформація, тиск і переміщення, можна апроксимувати за допомогою дискретної моделі, яка будується на безлічі неперервних функцій, визначених на

кінцевому числі елементів. Непрервні функції визначаються за допомогою значень неперервної величини в кінцевому числі точок у розглянутій області. У загальному випадку безперервна величина заздалегідь невідома, і потрібно визначити значення цієї величини в деяких внутрішніх точках області. Однак дискретну модель дуже легко побудувати, якщо спочатку припустити, що числові значення цієї величини в кожній внутрішній точці області відомі.

Після перетворення геометричної моделі в модель скінченних елементів комп'ютер може просто і точно аналізувати поведінку моделі, використовуючи математичні рівняння для опису кожного елемента, враховуючи взаємозв'язок суміжних елементів і відповідні властивості елементів. Похибка у скінченно-елементному аналізі виникає через відмінності між реальним розподілом напружень і розподілом напружень в межах скінченних елементів. Оскільки між напруженим і деформованим станами існує взаємно однозначний зв'язок, описаний фізичними рівняннями, то для оцінки міцності конструкції досить знати тільки напружений або тільки деформований стан конструкції.

У даний час МСЕ є методом комп'ютерного моделювання, який найбільше застосовується у вугледобувній галузі та добре інтегрований з додатками системи автоматизованого проектування і виробництва. Він дозволяє розв'язувати інженерні задачі геомеханіки, виконувати структурний аналіз (статичний/динамічний, лінійний/нелінійний) поставлених задач [170], [171].

Серед величезної кількості комп'ютерних програм, що дозволяють розв'язувати задачі МСЕ, можна перерахувати такі продукти: ANSYS, SolidWorks, Phase-2, PLAXIS, ELCUT, COMSOL, 3D MAX, MODEL, FEMM, Elmer, LS-DYNA, Algor, Nastran, Abaqus, Cosmos/M та ін. У кожній програмі є свої переваги і недоліки при розрахунку конкретної задачі.

Для МСЕ характерні особливості, які слід враховувати при виборі програмного розрахунку. Такими особливостями є великі обсяги вихідних даних, проміжних і остаточних результатів розрахунку, великі обсяги поточних документів. Тому розрахунок за МСЕ складається з трьох основних етапів:

1. Розробка розрахункової скінченно-елементної схеми і підготовка вихідних даних.

2. Перевірка самого розрахунку.

3. Обробка результатів розрахунку.

Для вибору програмного продукту буде порівнюватись декілька комп'ютерних комплексів. Для вибору програми підбираються необхідні критерії, за якими буде обиратися програмний продукт. Для цього будується порівняльна таблиця 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз можливостей програм для моделювання виробничих процесів

Враховувані фактори	Phase-2	SolidWorks	ANSYS	3D MAX
Статистичні навантаження	+	+	+	+
Товща гірських порід, яка вміщує вугільний пласт	+	+	+	–
Шаруватість масиву	+	+	+	–
Просторове моделювання	–	+	+	+
Врахування геометричної нелінійності	–	+	+	+
Ізотропія деформаційних та міцнісних властивостей гірських порід	+	+	+	–
Силові параметри кріплення виробок	+	+	+	–
Доступність продукту за економічним показником	–	+	+	–

Аналіз програмних продуктів САПР показав, що для розв'язання задач з моделювання геомеханічних процесів та розрахунку навантаження в масиві гірських порід, а також у кріпленні гірничих виробок слід обрати серед програм SolidWorks та Ansys Mechanical. Враховуючи роботи [172] – [174] з обґрунтування параметрів кріплення виробок та стійкість масиву гірських порід, а також враховуючи широке застосування та наявність програмної документації, та доступної літератури з описом програмного продукту та її елементів, а також

враховуючи задачі, які виконують ці програми: SolidWorks – пружна, Ansys – пружно-пластична, розрахунок НДС у пружно-пластичній постановці (побудова сітки скінченних елементів та статичний розрахунок) будемо робити за допомогою програми Ansys Mechanical.

Програмний продукт Ansys Mechanical володіє дуже широкими можливостями для розв'язання подібних задач, адже має у якості як механічну, так і математичну основу методу скінченних елементів і володіє розширеними обчислювальними можливостями. Комплекс дозволяє вирішувати широке коло інженерних завдань, у тому числі і за визначенням напружено-деформованого стану конструкцій.

Для вирішення поставленого завдання оптимальним є використання статичного аналізу, який використовується для визначення напружень та деформацій за умов статичного навантаження конструкцій. Статичний аналіз може бути лінійним чи нелінійним. У процесі нелінійного статичного аналізу можна імітувати пластичну та надпластичну поведінку матеріалів, визначати жорсткість навантаження, задавати великі деформації та напруження, враховувати контактні поверхні, аналізувати повзучість.

Проведення обчислювального експерименту передбачає цілий комплекс досліджень по збору даних, їх обробці, підготовці та проведенню розрахунку та аналізу отриманих результатів. Таким чином, розв'язання задачі із застосуванням МСЕ необхідно поділити на кілька основних етапів [175].

Етап №1. Постановка задачі. На основі проведеного аналізу сучасних уявлень про проблеми підтримки підготовчих виробок визначена необхідність проведення досліджень за допомогою обчислювального експерименту для обґрунтування раціональних параметрів композитного кріплення.

Етап №2. Обґрунтування та створення геометричної моделі. Аналітичними методами встановлено оптимальну форму та розміри моделі шаруватого гірського масиву. Змодельовано конструкції композитного кріплення відповідно до розроблених моделей та даних паспорта кріплення штреку.

Етап №3. Обґрунтування фізико-механічних властивостей матеріалів.

Відповідно до гірничо-геологічних умов відпрацювання 1 північної лави блоку № 10 ШУ «Покровське», а також геологічного прогнозу, заснованого на даних геологорозвідувальних свердловин № 3650 та № 3751, для дренажного вентиляційного штреку задано всі необхідні фізико-механічні властивості порід для проведення максимально адекватного розрахунку.

Етап №4. Додавання граничних умов. На цьому етапі відбувається визначення та додавання навантажень та обмежень, що відповідають реальним умовам, вибір типу аналізу на основі умов навантаження та реакції системи.

Етап №5. Побудова сітки скінченних елементів. Розбивається кожний окремих елемент моделі на скінченні елементи, пов'язані між собою у вузлах. Вибирається оптимальний тип та розмір сітки кожного елемента для досягнення максимально високої точності результатів експерименту.

Етап №6. Проведення автоматичного розрахунку системи рівнянь. При запуску розрахунку програма звертається за інформацією про модель та навантаження до бази даних та виконує обчислення. Результати записуються в спеціальний файл та в бази даних. У разі виникнення збоїв та помилок проводиться аналіз та усунення проблеми, після чого розрахунок запускається знову.

Етап №7. Аналіз одержаних результатів. Для аналізу результатів розрахунку напружено-деформованого стану використовуються епюри інтенсивності σ , горизонтальних σ_x та вертикальних напружень, які дозволяють оцінити якісну та кількісну картину розподілу напружень у гірському масиві.

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

Проведення лабораторного експерименту на гідравлічному пресі включає наступний комплекс дій щодо створення та дослідження кріплення із композитних матеріалів.

1. Створення моделі кріплення для її друку. У програмному продукті Solid Works на основі критеріїв подібності було створено модель кріплення, яка менша за реальну модель у 20 разів.

2. Друкування 3D-моделі. На цьому етапі за допомогою 3D-технологій друкується модель кріплення. Матеріалом виготовлення є нитка з вуглепластику.

3. Проведення лабораторного експерименту. Надруковане кріплення навантажується на гідравлічному пресі Topin 20T (рис.2.4). Вибираються оптимальні навантаження для досягнення високої точності результатів експерименту.

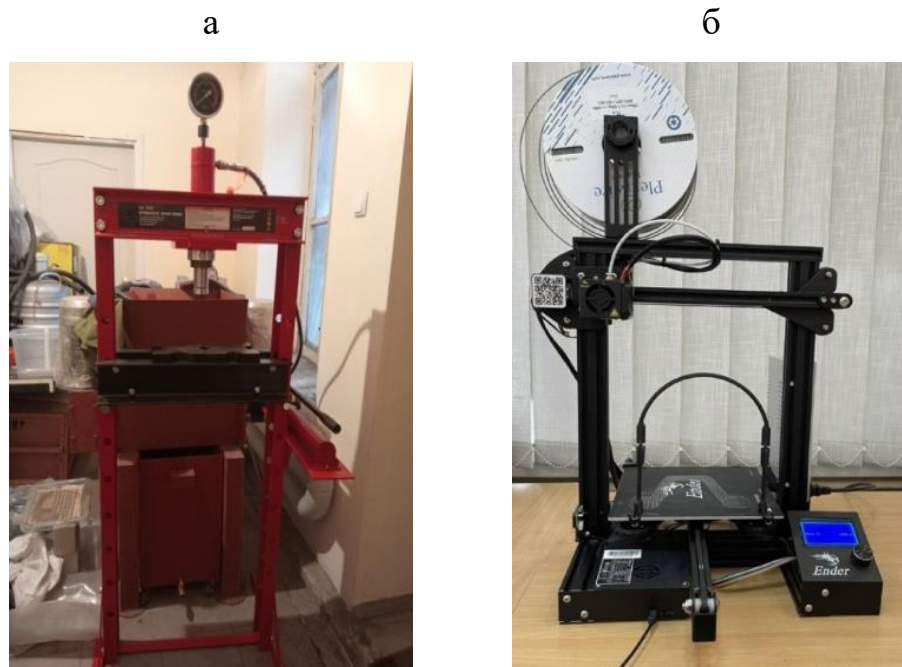


Рисунок 2.4 – Гідравлічний прес Topin 20 Т (а) та 3D-принтер (б) для проведення лабораторного експерименту

2.3 Обґрунтування параметрів геомеханічної моделі вуглевмісного масиву при композитному кріпленні

Кожен із перерахованих етапів спрямований на розробку моделі підготовчої виробки, наприклад, конвеєрного штреку блока № 10 ШУ «Покровське» при відпрацюванні 2 північної лави пласта d_4 . Це необхідно для дослідження впливу

взаємодії композитного кріплення із масивом гірських порід для відпрацювання технології геомеханічного моделювання. Геологічний розріз наведено на рис.2.5.

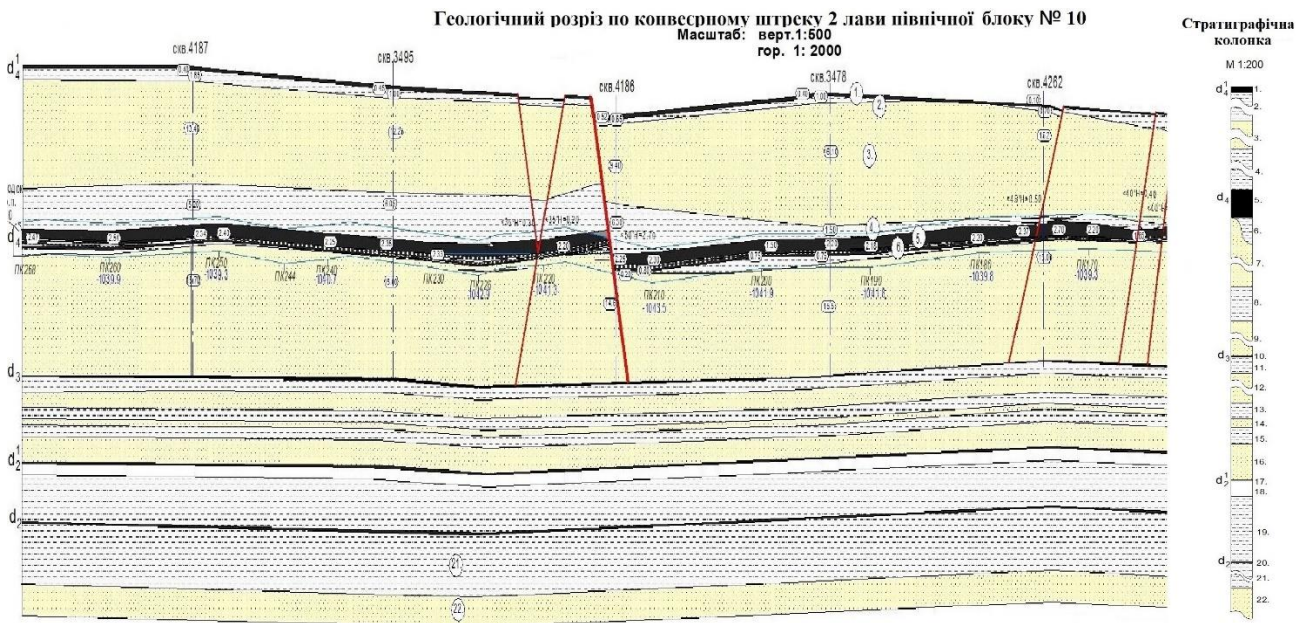


Рисунок 2.5 – Геологічний розріз по конвеєрному штреку 2 лави північного блоку № 10

У результаті розрахункова модель складається з 13 породних шарів і складає: падіння/підняття – 55 м, по висоті – 49,3 м та протяжності виробок – 20 м, кут падіння пласта – 4 градуси.

Кожен шар моделювався як окрема деталь необхідного розміру з відповідними механічними характеристиками. Відповідно до геологічного прогнозу, що базується на даних геологорозвідувальних свердловин № 3495 та № 4186, для конвеєрного штреку. Задані всі необхідні фізико-механічні властивості порід (табл. 2.2) задля максимально адекватного розрахунку.

На відстані 15 м від лівого краю моделі та глибині 23 м розташований конвеєрний штрек, переріз якого моделювався арочної форми під кріплення КШПУ-20,3. Для його підтримки використовувалося рамне кріплення спецпрофілю СВП-33, а також композитне кріплення (рис.2.1 – 2.2). Змодельовано реальний поперечний переріз спецпрофілю СВП-33 та композитного кріплення, а вузли піддатливості були замінені імітатором зі збереженням режиму

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

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні властивості порід

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

За необхідності, залежно від кроку розрахунку, змінювалося встановлюване кріплення. В результаті було проведено три етапи розрахунку при встановленні композитного кріплення, а також рамного металевого кріплення.

Спецпрофіль СВП виготовляється зі сталі Ст.5 з механічними характеристиками: розрахункова межа текучості $\sigma_T = 270$ МПа, модуль пружності $E^p = 21 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu^p = 0,3$. Ці характеристики прийняті до

розрахунку при моделюванні повної діаграми деформування. Відображення повної діаграми деформування дозволяє врахувати пластичні деформації у рамі такі, як і у шахтних умовах.

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

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

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

Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона імітатора вузла піддатливості для композитного кріплення прийнято як для парафінопатронів згідно роботи [94] ($E^p = 12,5 \cdot 10^3$, $\mu^p = 0,3$), аби пружні деформаційні характеристики були постійними по всьому контуру рами.

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

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

Композитне кріплення моделювалося згідно розмірів рамного згідно з паспортом кріплення конвеєрного штреку (Рис.2.6).

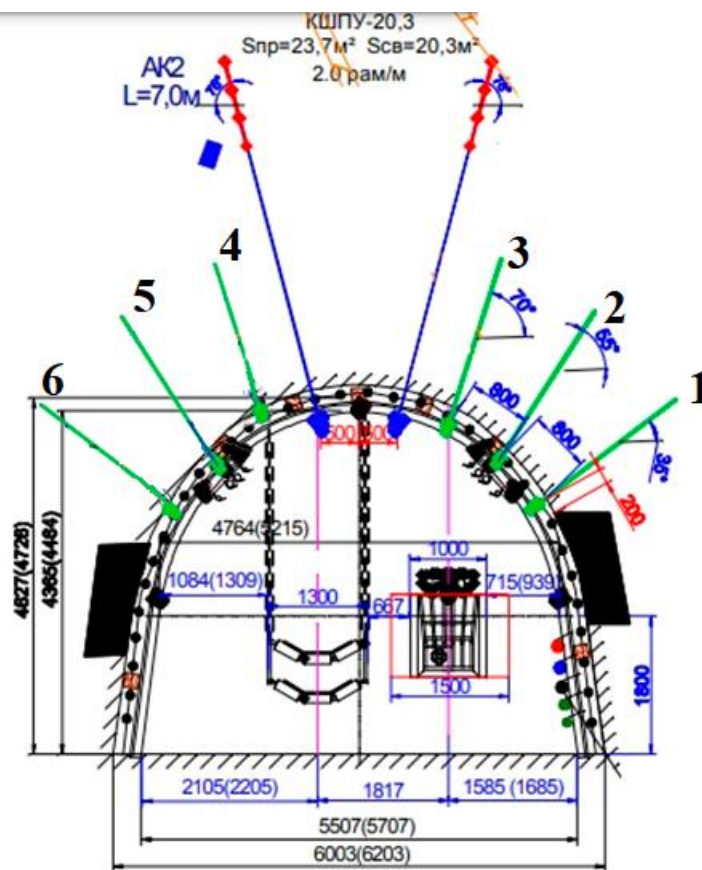


Рисунок 2.6 – Паспорт кріплення конвеєрного штреку

Граничні умови. Верхня горизонтальна площина моделі має позначку 1100 м, що за середньозваженої об'ємної ваги порід $\gamma = 25$ кН/м³ формує вертикальне навантаження на верхній границі моделі $\sigma_y = \gamma H = 27,5$ МПа. Приймаємо в

розрахунках $\sigma_y = 28$ МПа. Нижня границя моделі має жорстку опору та слугує площиною початку відрахунку вертикальної координати Y . По бокових площинах моделі введено умову плоскої деформації, що відповідає реальному механізму деформування масиву та широко використовується в механіці підземних споруд [176] – [178]. Відповідно до цієї умови в непорушеному масиві діють горизонтальні стискаючі напруження

$$\sigma_x = \lambda \gamma H = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H, \quad (2.1)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона розглянутого породного шару або вугільного пласта.

При поміщенні в базу даних відомостей про механічні характеристики вуглевмісної товщі (у тому числі і величини μ) відбувається автоматичне моделювання впливу горизонтальних напружень σ_x на бокових границях моделі. Точка відрахування за координатою X збігається з вертикальною віссю гірничої виробки.

Вимір товщини моделі за координатою Z збігається з поздовжньою віссю гірничої виробки і становить 2 м для побудови двох комплектів рамних кріплень з кроком установки 1 м. Кріплення встановлені з відступом 0,5 м від краю моделі вертикальної осі для симетрії моделі за координатою Z . Умови плоскої деформації вводяться також за площинами, що обмежують товщину моделі, де діють стискаючі напруження непорушеного масиву

$$\sigma_z = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H \quad (2.2)$$

Початок відрахування за координатою Z поміщено в середину моделі (за її товщиною) на відстані 1,0 м від бічної граничної площини.

Крім компонент поля напружень у моделі аналізується також величина наведених напружень σ (або інтенсивність напружень як інтегральний параметр НДС, що використовується в розрахунках міцності). За загальноприйнятим для гірських порід законом Кулона-Мора [179], [180].

$$\sigma = \sigma_1 - \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} \sigma_2, \quad (2.3)$$

де σ_1 і σ_2 – максимальні та мінімальні головні напруження за елементарним об'ємом;

φ – кут внутрішнього тертя породи.

Побудова сітки скінченних елементів. Відповідно до концепції використання МСЕ [181] вся модель конструкції поділяється на безліч скінченних елементів, з'єднаних між собою у вершинах (вузлах). Достовірність розрахунків залежить від багатьох факторів, у тому числі від кількості скінченних елементів, що вимагає максимального зменшення розміру кожного окремого елемента. Є кілька типових форм скінченних елементів, у яких поле зсувів визначається за зсувами вузлів з допомогою деяких інтерполяційних функцій. Створення скінченно-елементної моделі відбувається на стадії передпроцесорної підготовки, бо автоматична побудова сітки не гарантує появи помилок. Генератори довільної сітки мають широкий набір внутрішніх та зовнішніх опцій управління якістю сітки. Так, наприклад, реалізовано алгоритм розумного вибору розмірів скінченного елемента, що дозволяє будувати сітку елементів з урахуванням кривизни поверхні моделі та найкращого відображення її реальної геометрії. Для більш простих областей моделі зазвичай застосовуються шестигранні елементи, а інших – тетраедні [182].

Очевидно, що чим менший лінійний розмір скінченного елемента, тим більша кількість елементів у моделі, при цьому час обчислень експоненційно зростає, а помилки зменшуються. Однак похибки зменшуються не до нуля, так як зі збільшенням числа елементів накопичуються похибки округлення в ЕОМ. Необхідно співвідносити розміри елементів з передбачуваними градієнтами деформацій або напружень для вибору оптимального типу та розмірів скінченних елементів.

Проведення розрахунків. Після визначення всіх необхідних умов та побудови якісної скінченно-елементної моделі за допомогою команди SOLVE процесор рішення виконує прикладання навантажень та граничних умов, а потім визначає відклик розрахункової моделі. Навантаження та результати рішення записуються процесором рішення до бази даних. У разі виникнення збоїв та помилок

проводиться аналіз та усунення проблеми, після чого розрахунок запускається знову.

Аналіз результатів. Програма ANSYS має найширші можливості щодо подання отриманих результатів, що дозволяє знімати максимальну кількість даних із кожного розрахунку. Дані, які отримані на основі результатів рішення за їх постпроцесорної обробки, записуються постпроцесором. Використовуючи постпроцесор, отримують доступ до результатів рішення та оцінки поведінки розрахункової моделі і навіть проводять додаткові обчислення. Відомості, внесені одним із процесорів, доступні, за необхідності, і для інших процесорів.

Для аналізу результатів розрахунку напружено-деформованого стану використовуються епюри інтенсивності σ , горизонтальних σ_x та вертикальних σ_y напружень, які дозволяють оцінити якісну та кількісну картину розподілу напружень у гірському масиві та кріпленні.

2.4 Аналіз НДС гірського масиву та кріпильної системи штреку

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

У кожній моделі вибирається найбільш підходящий для неї діапазон значень, що модифікує та вибирає найбільш відповідне відображення напруженого стану гірського масиву.

Насамперед оцінено поле розподілу вертикальних напружень σ_y в гірському масиві (рис 2.7).

В безпосередній покрівлі виробки утворюється зона розвантаження, що своєю формою нагадує звід природної рівноваги по проф. М.М. Протод'яконову. Ця зона має розміри висотою приблизно 1 метр, та завширшки приблизно 2 метри. В підощві виробки також розташовується зона розвантаження, яка більша, ніж у покрівлі виробки. Зона розвантаження у підощві виробки має розміри висотою 1 метр, а завширшки – 4 метри.



Рисунок 2.7 – Розподіл вертикальних напружень σ_y в гірському масиві для умов розрахункового експерименту

Розтягуючі напруження σ_y діють до 2 МПа та формують зону нестійких порід у формі зворотного склепіння природної рівноваги майже по всій потужності безпосередньої підшви.

У боках виробки формується зона з підвищеними стискаючими напруженнями σ_y . Розміри цієї зони досить великі і мають наступні значення: висота зони становить 3 метри, ширина зони - до 1 метру. Максимум σ_y досягає до -28 МПа біля стійки рами і має локальний характер.

За результатами досліджень видно, що в бокових породах виробки діють напруження стиснення в межах $\sigma_x = -3 - 0,5$ МПа. Переглядаючи верхній і нижній шари вугільного пласта із співвідношенням коефіцієнту Пуассона 0,21, можна також зробити висновок, що в бокових породах діють стискаючі напруження.

Аналізуючи безпосередню покрівлю виробки, представлену алевролітом, можна спостерігати напруження розтягнення. У центральній частині напруження розтягнення діють в межах від 2,0 до 3,5 МПа. Руйнування безпосередньої покрівлі виробки може статися в районі, який має приблизні розміри шириною 2,1 метри і висотою близько 1 метра.

Наступною аналізованою компонентою є горизонтальні напруження σ_x в гірському масиві. Результати досліджень показані на рис. 2.8.

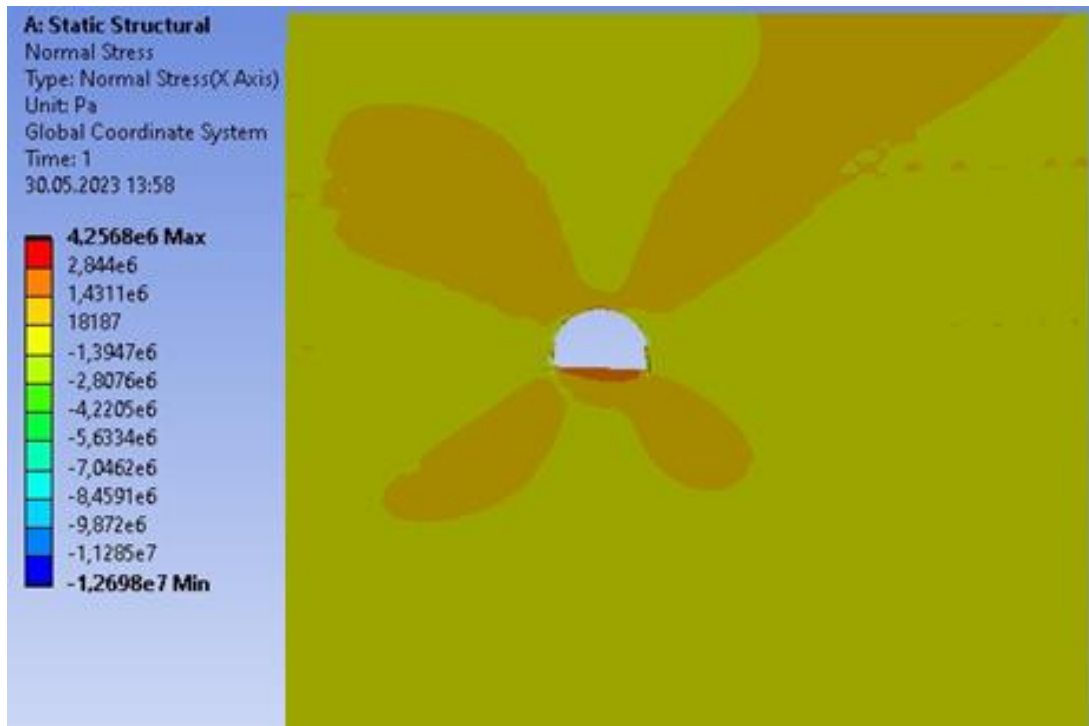


Рисунок 2.8 – Розподіл горизонтальних напружень σ_x в гірському масиві для умов розрахункового експерименту

Враховуючи всю площу покрівлі, там діють напруження розтягування від +1 до + 3,5 МПа. Дивлячись на підшву виробки, зона розтягнення має меншу ширину, ніж ширина виробки, і становить приблизно 3 метри та глибину 1,5 метри. Напруження розтягнення в цій області знаходяться в межах від 2,5 до 4 МПа. Також виникає зона розвантаження в нижній частині виробки з урахуванням коефіцієнта руйнування та обводненості вугільного пласта. У правому куті виробки проглядаються сильніші розтягуючі навантаження, ніж у лівому, і ця частина правого кута має розміри близько 3 метрів завширшки та 2 метри вглибину. Також у підшві виробки є зони розвантаження з обох сторін. Ця площа має близько 5 метрів у ширину та 3 метри у глибину з діапазоном напружень напруги від +1 до +2 МПа. Завдяки напруженням розтягання в підшві виробки передбачається підняття порід.

Зона двох розтяжних напружень виникає над вугільним пластом розмірами шириною 4 метри і висотою 4 метри, а також зона шириною 5 метрів і глибиною 3 метри нижче вугільного пласта. Що стосується того, що бокові породи мають високий ступінь руйнування та водонасичення, а вугільний пласт має високу міцність, то відповідно до дії стискаючих напружень руйнування не відбувається.

Наступною аналізованою компонентною є інтенсивність приведених напружень σ для гірського масиву (рис. 2.9).

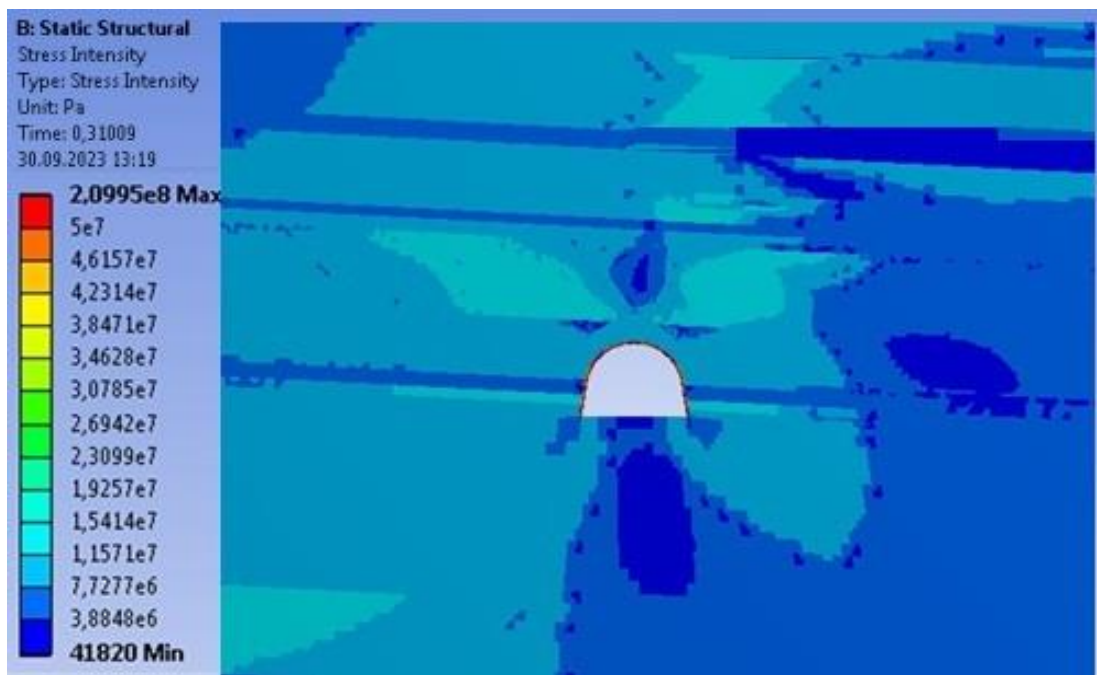


Рисунок 2.9 – Епюра приведених напружень σ в гірському масиві для умов розрахункового експерименту

Зона опорного тиску характеризується невеликою асиметрією розподілу в ліву сторону. Зони розвантаження торкаються перших шарів основної покрівлі та підосви з рівнем діючих напружень $\sigma = 1 - 3$ МПа. У боках виробки концентрація приведених напружень $\sigma = 14 - 17$ МПа та має дуже обмежене поширення до 0,4 м, а ширина дії $\sigma = 10 - 13$ МПа не перевищує 1,9 м у верхній частині безпосередньої підосви. Наведені дані вказують на слабкий вплив опорної зони тиску в початковий період його впливу, що цілком узгоджується з експериментальними

дослідженнями щодо вимірювання переміщень породного контуру виїмкової виробки.

Наступною аналізованою компонентою є інтенсивність приведених напружень σ для кожного з видів кріплення окремо.

Першим аналізувався базовий вид металевого кріплення із спецпрофілю СВП 33, епюра інтенсивності напружень σ якого зображена на рис. 2.10.

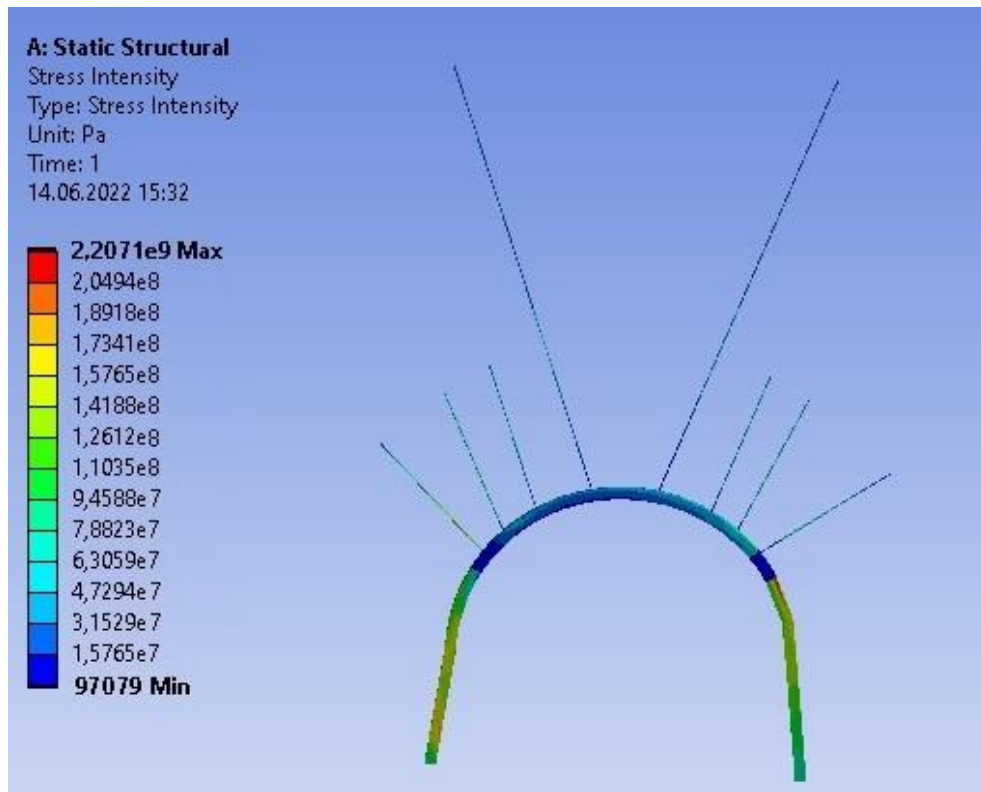


Рисунок 2.10 – Епюра приведених напружень σ при кріпленні штреку металевим кріпленням спецпрофілю СВП 33

Верхняк рами перебуває у розвантаженому стані за рахунок дії анкерів, діючі напруження $\sigma = 35 - 80$ МПа, що у кілька разів менше за розрахункову межу текучості сталі рамного кріплення ($\sigma_T = 270$ МПа). У криволінійній частині стояків рами спостерігається поступове зростання σ до значень $130 - 200$ МПа, що вже становить $50 - 75\%$ від межі плинності σ_T .

У прямолінійній частині стояків рами розподіл σ досить стабільний в межах зазначеної величини, а ближче до опори стояків, починаючи з висоти $0,8 - 0,9$ м

виникають локальні області з концентрацією $\sigma = 200 - 250$ МПа, величина якої вже близька до значення σ_T . Розташування зон концентрації вказує на знакозмінний вигин стояків спочатку в порожнину виробки (на висоті 0,3 – 0,5 м від підосви виробки), а нижче (в опорі стояків – у бік масиву). Анкери, як видно з епюри, досить недонавантажені, на що вказує інтервал діючих напружень $\sigma = 15 - 70$ МПа за їх довжиною.

Друге дослідження було виконано для композитного кріплення постійного перерізу. Епюра інтенсивності σ зображена на Рис. 2.11.

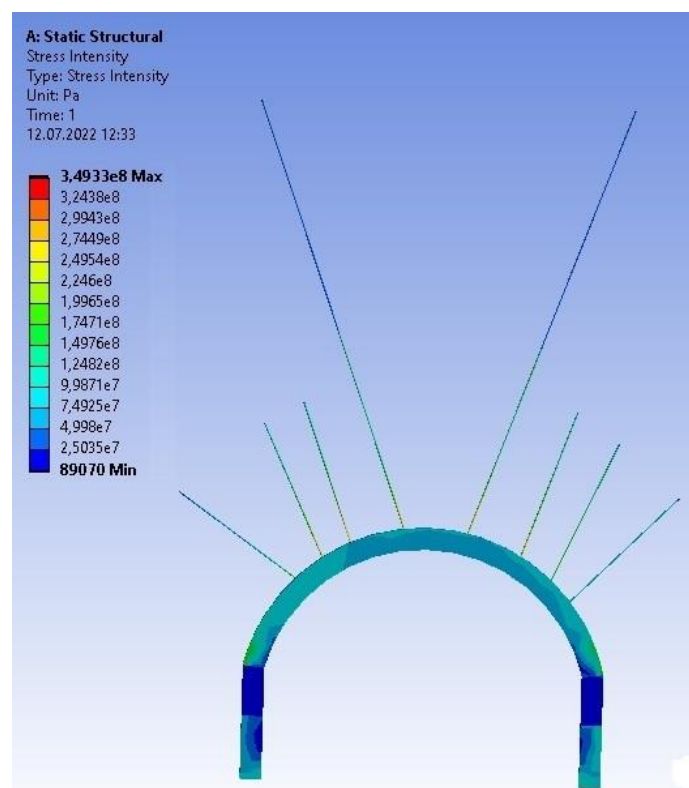


Рисунок 2.11 – Епюра приведених напружень σ при кріпленні штреку композитним кріпленням постійного перерізу з вуглепластику

Як бачимо з епюри, то картина розподілу напружень у композитному кріпленні значно інша. Це викликано як за рахунок зміни матеріалу, так і за рахунок нового вузлу піддатливості. Верхняк кріплення перебуває у досить стійкому стані, оскільки діючі напруження $\sigma = 75 - 100$ МПа.

У стояках композитного кріплення спостерігається поступове зростання σ до значень 75 – 130 МПа, що менше, ніж у базовому металевому кріпленні.

Вузли піддатливості, які з'єднують верхняк зі стояками, розвантажені, де діють напруження 15 – 35 МПа. Розташування зон концентрації також вказує на знакозмінний вигин стояків спочатку в порожнину виробки (на висоті 0,2 – 0,3 м від підшви виробки), а нижче – у бік масиву. Анкери досить недонавантажені, в яких інтервал діючих напружень $\sigma = 15 - 50$ МПа за їх довжиною.

Третє дослідження виконано для композитного кріплення змінного перерізу. Епюра інтенсивності σ зображена на рис. 2.12.

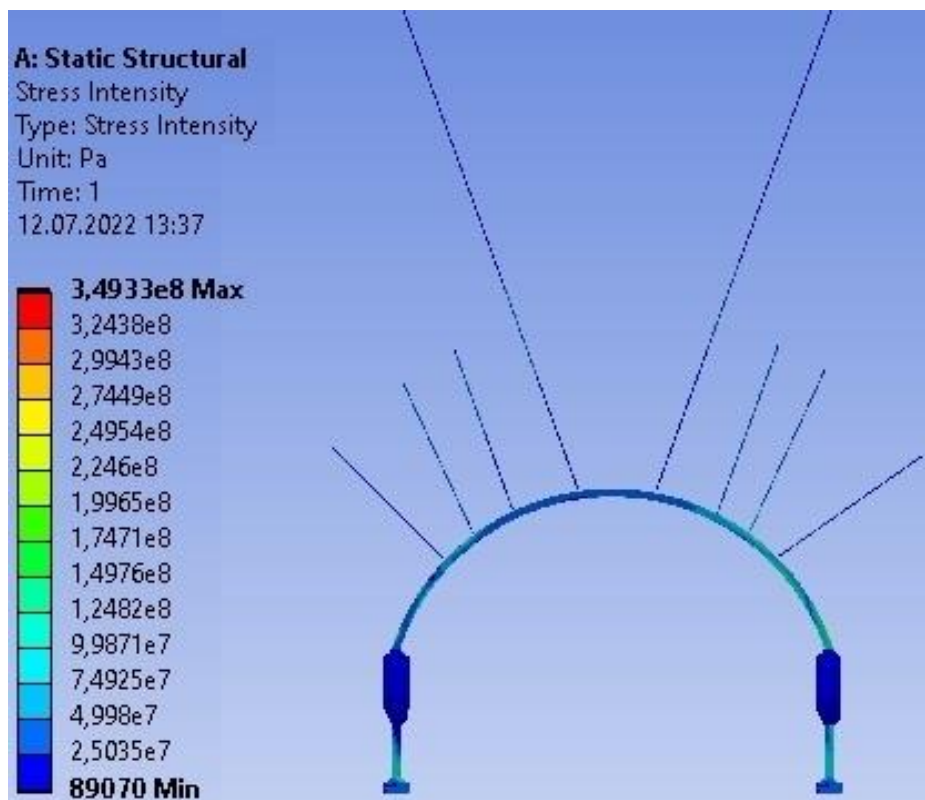


Рисунок 2.12 – Епюра приведених напружень σ при кріпленні штреку композитним кріпленням змінного перерізу з вуглепластику

У композитному кріпленні змінного перерізу картина розподілу напружень така. Верхняк кріплення розвантажений, діючі напруження $\sigma = 80 - 110$ МПа, що менше за розрахункову межу плинності, але трохи більше, ніж у кріпленні постійного перерізу.

У стояках композитного кріплення змінного перерізу також спостерігається

поступове зростання σ до значень 100 – 150 МПа, що менше, ніж у базовому металевому кріпленні, але більше, ніж у іншому варіанті композитного кріплення. Але варто зазначити, що підп'ятники, які збільшені, значно розвантажені, де діють напруження 30 – 60 МПа. Вузли піддатливості, які з'єднують верхняк зі стояками розвантажені, де діють напруження 20 – 40 МПа. Розташування зон концентрації також вказує на знакозмінний вигин стояків спочатку в порожнину виробки (на висоті 0,2 – 0,3 м від підшви виробки), а нижче – у бік масиву. Анкери досить недонавантажені, в яких інтервал діючих напружень $\sigma = 20 – 60$ МПа за їх довжиною.

На даному етапі можна відзначити високу концентрацію напружень у стояках рами (від 250 МПа та вище). У верхняку рами інтенсивність розподілу напружень знижується.

Одержані результати дозволяють встановити залежності σ_{\max} від виду встановлюваного кріплення у стояках та верхняку (рис. 2.13).

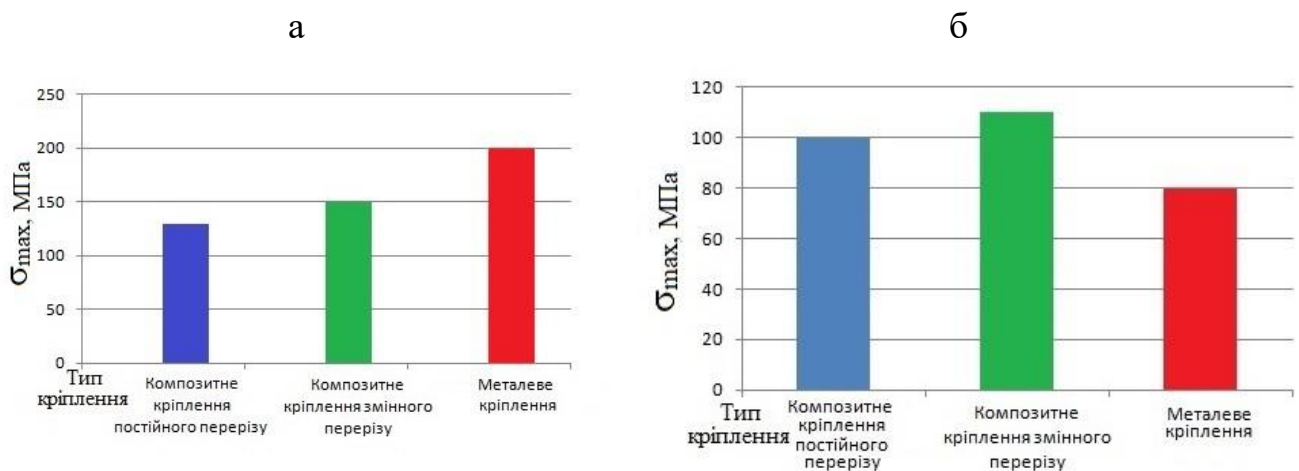


Рисунок 2.13 – Залежність зміни σ_{\max} у стояках (а) та верхняку (б) від типу встановлюваного кріплення

Слід зазначити, що у дослідженнях [183] – [185] максимально допустимими напруженнями вважалися $\sigma = 100 – 150$ МПа, що загалом відповідає типовим гірничо-геологічним умовам та існуючому розвитку засобів кріплення гірничих виробок. За цих умов, конструкція буде витримувати, мало деформуватися, працювати у піддатливому режимі, а гірнича виробка буде виконувати свої

експлуатаційні функції. Причому на великих глибинах ($H > 1000$ м) інтенсивність напружень може зростати до $\sigma = 200\text{-}250$ МПа, а більше – буде недоцільним.

Отримані результати не суперечать численним геомеханічним дослідженням у даній області [186] – [189]. Це підтверджує відповідність моделей реальним умовам проведення гірничих виробок у вугільних шахтах.

2.5 Лабораторні дослідження на стиснення кріплення із композитних матеріалів

На основі попередніх досліджень постала наступна актуальна наукова задача – дослідження на одноосне стиснення кріплення із композитних матеріалів в лабораторних умовах.

Теоретичну задачу стійкості матеріалів на стиснення в лабораторних умовах вперше була вирішена Ейлером, який визначив критичні сили та напруження, що призводять до втрати стійкості зразку. Ці дослідження показали, що для жорстких не пустотілих зразків критичним напруженням є границя плинності сталі $\sigma_T = 270$ МПа.

Досліджувана модель менша за реальну у 20 разів. Матеріалом виготовлення є нитка з вуглепластику. Надруковане кріплення навантажується на гідравлічному пресі Topin 20T. Вибираються оптимальні навантаження для досягнення високої точності результатів експерименту.

Таким чином, критичні напруження для композитних зразків повинні бути рівні границі плинності сталі $\sigma_{зр} = \sigma_T \approx 270$ МПа. Лабораторні дослідження мали дати відповідь, як поведе себе композитний зразок та композитне кріплення у разі виникнення критичних напружень, який характер позамежного деформування, і який тип втрати стійкості при цьому спостерігатиметься.

В лабораторних умовах окремо досліджувалося кріплення із вуглепластику (рис. 2.14-а) та композитний зразок (рис. 2.14-б). Під дією стиснення стояки рами починають деформуватися, але загалом композитне кріплення витримує, причому, стояки і верхняк деформуються так само, як і в комп'ютерному моделюванні.

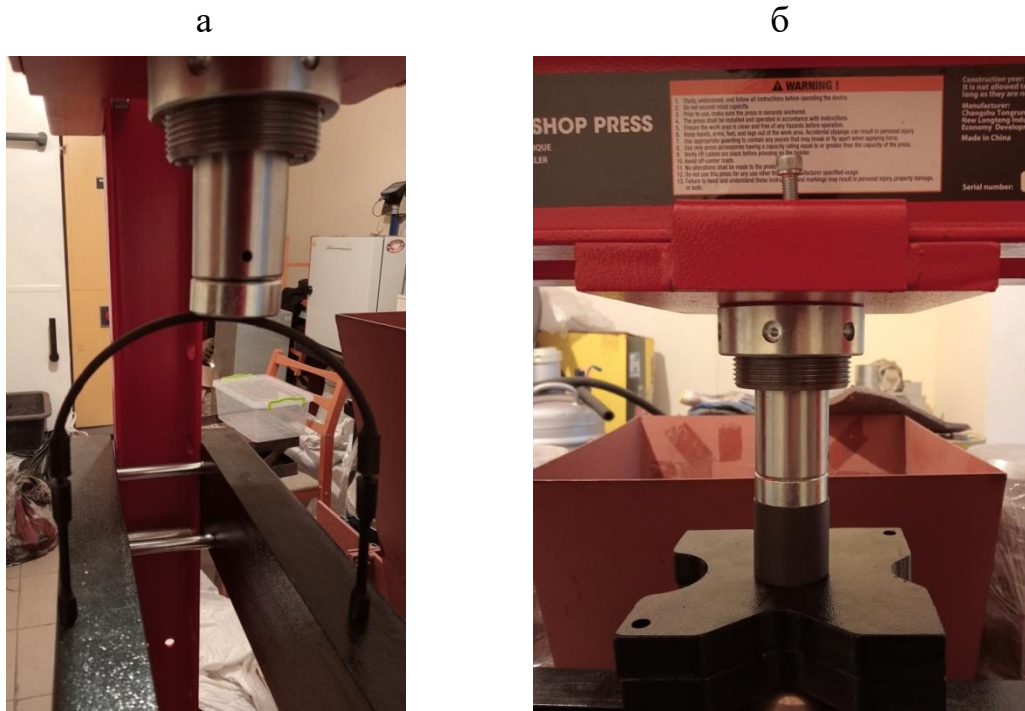


Рисунок 2.14 – Дослідження на гідравлічному пресі кріплення із вуглепластику (а) та композитного зразку (б)

У всіх випадках спостерігалася втрата загальної стійкості, оскільки відносна товщина зразків була достатньою для запобігання їх локального деформування. Цим можна пояснити відсутність місцевої втрати стійкості у всіх експериментах цієї серії. Дослідження композитного зразку показує, що матеріал витримує навантаження, які еквівалентні навантаженням на металеве кріплення.

Максимальні напруження, виходячи з максимального навантаження на композитне кріплення F_{max} :

$$\sigma_{зр} = \frac{F_{max}}{A}, \quad (2.4)$$

де A – площа композитного кріплення.

Для кріплення постійного перерізу:

$$\sigma_{зр} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{34,8}{2,2445} = 15,50 \text{ кН} = 155 \text{ МПа.}$$

Для кріплення змінного перерізу:

$$\sigma_{зр} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{34,8}{2,1412} = 16,25 \text{ кН} = 162 \text{ МПа.}$$

Як бачимо, за результатами експерименту критичні напруження виявилися майже ідентичними у порівнянні з комп'ютерним експериментом. Це можна

пояснити впливом на стійкість замкнутої форми зразків, що дозволило витримувати напруження, порівняні з межею міцності.

Лабораторні дослідження дозволили зіставити результати з комп'ютерним моделюванням, збіжність яких досить висока і коливається у межах 85 – 90 %.

Проаналізувавши результати першого етапу обчислювального експерименту можна зробити висновок, що концентрація інтенсивності напружень у композитному кріпленні менше ніж у металевому. Це свідчить про відповідність розробляемого виду кріплення для гірничих виробок. Основним недоліком є використання композитного кріплення зі змінним перерізом, адже зменшення стояків призводить до більшого навантаження та меншої несучої здатності, що призводить до незадовільного стану гірничих виробок. Тому у подальшому зміна перерізу композитного кріплення буде відбуватись по всій моделі.

2.6 Висновки за розділом

1. Розроблено моделі кріплення із вуглепластику, які відрізняються від відомих новим вузлом піддатливості та дозволяє досліджувати навантаження по периметру кріплення.

2. Розроблено методику проведення обчислювального експерименту з вивчення взаємодії кріплення із композитних матеріалів з гірським масивом, використання якої дозволить отримати результати вертикальних σ_y , горизонтальних σ_x та приведених напружень σ .

3. Обґрунтовано геомеханічну модель вуглевміщуючого масиву гірських порід, а також кріпильної системи конвейерного штреку блоку № 1 ШУ «Покровське» при відпрацюванні пласта d₄. Відповідно до геологічного прогнозу, що базується на даних геологорозвідувальних свердловин задані всі необхідні фізико-механічні властивості порід та задані граничні умови, побудована скінченно-елементна модель для проведення обчислювального експерименту.

4. Для аналізу результатів розрахунку напружено-деформованого стану гірського масиву та кріпильної системи використані епюри приведених σ , горизонтальних σ_x та вертикальних σ_y напружень, які дозволяють оцінити якісну та

кількісну картину розподілу напружень у системі кріплення. З одержаних результатів можна зробити висновок, що кріплення із композитних матеріалів постійного перерізу доцільніше використовувати у гірничих виробках через менший розподіл напружень по усьому контуру рами. За рахунок пластичності вуглепластиків та застосування 3D-принтерів для виготовлення елементів кріплення рами можна легко змінювати поперечний переріз кожного елементу рами і тим самим досягати рівномірного навантаження на кріплення та заощаджувати пластик.

5. У результаті моделювання встановлено зміну напружень по контуру кріплення із спецпрофілю СВП. Верхняк рами перебуває у розвантаженому стані за рахунок дії анкерів, діючі напруження $\sigma = 35 - 80$ МПа, що у кілька разів менше за розрахункову межу текучості сталі рамного кріплення ($\sigma_T = 270$ МПа). У криволінійній частині стояків рами спостерігається поступове зростання σ до значень $130 - 200$ МПа, що вже становить $50 - 75\%$ від межі текучості σ_T . У прямолінійній частині стояків рами розподіл σ досить стабільний в межах зазначеної величини, а ближче до опори стояків, починаючи з висоти $0,8 - 0,9$ м, виникають локальні області з концентрацією $\sigma = 200 - 250$ МПа, величина якої вже близька до значення σ_T .

6. Встановлено, що картина розподілу напружень у композитному кріпленні значно інша. Це викликано як за рахунок зміни матеріалу, так і за рахунок нового вузлу піддатливості. Верхняк кріплення перебуває у досить стійкому стані, оскільки діють напруження $\sigma = 75 - 100$ МПа, що менше за розрахункову межу текучості. У стояках композитного кріплення спостерігається поступове зростання σ до значень $75 - 130$ МПа, що менше, ніж у базовому металевому кріпленні. У стояках композитного кріплення спостерігається поступове зростання σ до значень $75 - 130$ МПа, що менше, ніж у базовому металевому кріпленні. Вузли піддатливості, які з'єднують верхняк зі стояками розвантажені, де діють напруження $15 - 35$ МПа. Розташування зон концентрації також вказує на знакозмінний вигин стояків спочатку в порожнину виробки (на висоті $0,2 - 0,3$ м

від підошви виробки), а нижче – у бік масиву. Анкери досить недонавантажені, в яких інтервал діючих напружень $\sigma = 15 - 50$ МПа за їх довжиною.

7. За результатами лабораторних досліджень критичні напруження у композитному кріпленні виявилися майже ідентичними у порівнянні з комп'ютерним експериментом та коливаються в межах 150 – 160 МПа, що дозволило зіставити результати з комп'ютерним моделюванням, збіжність яких досить висока і коливається у межах 85 – 90 %.

8. Результати досліджень за матеріалами другого розділу опубліковано у наукових працях [150], [167], [168], [171], [175].

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ НДС ВУГЛЕВІСНОГО МАСИВУ ТА КОМПОЗИТНОГО КРІПЛЕННЯ ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ В УМОВАХ ШУ «ПОКРОВСЬКЕ»

3.1. Вдосконалення геомеханічної моделі за результатами розрахунку її НДС

Для підготовчих виробок вагому роль відіграє опорний тиск від впливу очисних робіт. Дані виробки знаходяться, як правило, в найгірших умовах, потребують значних матеріальних і трудових витрат на ремонтні роботи та забезпечення безпеки ведення очисних робіт як на кінцевих ділянках лав, так і на сполученнях і протяжних ділянках цих виробок, що знаходяться поза зоною і в зоні впливу лави, як попереду, так і позаду неї.

Керуючись загальною методологією досліджень доцільно розвинути методику обчислювального експерименту в плані переходу до нелінійного аналізу та систематизації вихідних геомеханічних параметрів для отримання надійних кількісних закономірностей проявів гірського тиску на композитне кріплення підготовчої виробки.

У лінійному статичному конструкційному аналізі розв'язується матричне рівняння щодо переміщень $\{x\}$:

$$[K]\{x\} = \{F\}, \quad (3.1)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості; $\{x\}$ – переміщення; $\{F\}$ – сила.

Допущення лінійного статичного аналізу:

$[K]$ (жорсткість) є константою: застосовується лінійна пружна модель поведінки матеріалів; використовується теорія малих переміщень; до розрахунку введено деякі нелінійні граничні умови;

$\{F\}$ (додана сила) є статичним навантаженням: не розглядаються сили, що змінюються у часі; також не розглядаються явища інерції (маса, демпфування).

У зв'язку з цим для збільшення ступеня збіжності результатів розрахунку з реальними умовами необхідний перехід до використання нелінійного статичного аналізу. У процесі нелінійного статичного аналізу з'являється можливість імітувати

пластичну та надпластичну поведінку матеріалів, визначати жорсткість навантаження, задавати великі деформації та напруження, враховувати контакти поверхні, аналізувати повзучість.

Основною специфічною особливістю нелінійної поведінки конструкції є зміна її жорсткості під дією навантаження. На рівні фізичної моделі можна говорити про нелінійну залежність зсувів від прикладеної сили. Зміна жорсткості може викликатися трьома основними причинами: зміною стану конструкції, геометричною конфігурацією та характером поведінки матеріалу.

Нелінійна поведінка матеріалів призводить до зміни жорсткості конструкції під дією прикладеного навантаження. Так, нелінійна залежність деформації від напружень для пластичних та наделастичних матеріалів змушує конструкцію по-різному реагувати на зовнішні сили; рівень залишкової деформації визначається величиною прикладених сил та температурним режимом. Нелінійні ефекти, викликані повзучістю та в'язкопластичною (в'язкоеластичною) поведінкою матеріалів, залежать від часу і швидкості навантаження, температурного режиму та величини навантаження.

Найчастіше поведінка матеріалів під дією прикладених сил описується деформаційною кривою, де виділяється кілька характерних точок та ділянок:

- 1) до границі пропорційності деформація підпорядковується лінійному закону;
- 2) до границі пружності величина залишкової деформації дуже мала, і поведінка матеріалу мало відрізняється від лінійного;
- 3) вище границі пружності і до границі плинності відбувається нелінійне деформування;
- 4) збільшення зовнішнього навантаження понад межі текучості і аж до межі міцності призводить до інтенсивного пластичного деформування, що характеризується накопиченням залишкової деформації; цей процес є неконсервативним і піддається нелінійному аналізу. Крім переходу до пружно-пластичної постановки розрахунку необхідно максимально деталізувати геометрію моделі.

Досліджувана геомеханічна система поділена на основні складові (гірський масив, базове кріплення, композитне кріплення та анкери), кожна з яких детально аналізувалась за основними компонентами напружень. Необхідність такого аналізу продиктована значною геометричною та механічною неоднорідністю між елементами системи в цілому та фізичною неоднорідністю самого гірського масиву зокрема. Кожен із перерахованих елементів проаналізовано за трьома основними компонентами, що дає основу для подальшого порівняння розроблених пропозицій, їх достовірної оцінки та обґрунтування рекомендацій з вибору раціональних параметрів композитного кріплення.

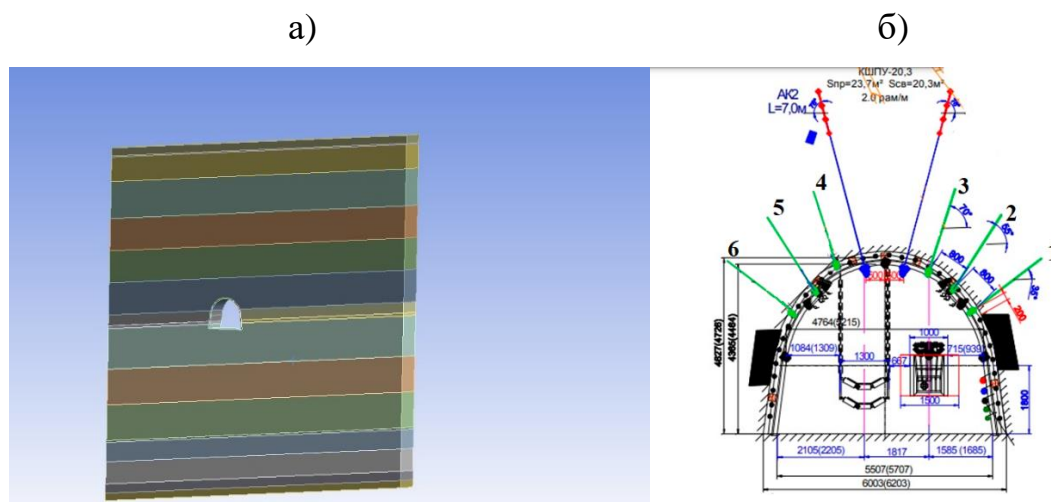


Рисунок 3.1 – Просторова модель розташування конвеєрного штреку блоку № 10 ШУ «Покровське»: а – загальний вигляд моделі; б – паспорт кріплення штреку

Розглянута модель (рис. 3.1) складається з 17 породних шарів, при цьому висота моделі становить 48,2 м. Потужність та фізико-механічні властивості кожного шару повністю відповідають геологічному прогнозу по блоку № 10 ШУ «Покровське».

За умов надглибоких горизонтів на кріплення діє нерівномірне та несиметричне навантаження щодо горизонтальної та вертикальної осей гірничої виробки. Зміна навантаження за контуром виробки може бути плавною або дискретною.

Для підвищення достовірності методів прогнозу й об'єктивності відображення конкретної гірничо-геологічної ситуації відпрацювання вугільного пласта проаналізовано роботи з результатами комп'ютерного моделювання та моделювання на еквівалентних матеріалах, які вказують на розподіл області шаруватого масиву, що інтенсивно деформується, на блоки, розмір яких збільшується в міру віддалення від виробки. Тобто, виникає деяка проміжна структура (між цілісним масивом і зруйнованим середовищем), яка при зсуві має певну стійкість за рахунок зусиль розпору між породними блоками. Дані уявлення одержали назву «гіпотеза блочного руйнування». Її окремі положення розвинені у багатьох роботах, наприклад [190], [191], у частині розподілу порід покрівлі над виробленим простором на зону безладного обвалення та зону шарнірно-блокового зрушення.

Результати тестових розрахунків підтвердили адекватність удосконаленої моделі висунутим вимогам. Цей підхід дозволить отримати повну картину взаємовпливу геомеханічних процесів, що відбуваються на різній глибині і при різному перерізі композитного кріплення, а також оцінити вплив на досліджувану виробку.

Отримана модель буде використана для визначення напружено-деформованого стану породного масиву та систем кріплення у підготовчій виробці. Метою проведення обчислювального експерименту є встановлення закономірностей зміни напружень у композитному кріпленні для внесення ефективних змін до конструкції кріплення.

3.2. Закономірності зміни НДС кріпильної системи штреку при надпрацюванні його лавою

У результаті додаткових досліджень розроблена удосконалена розрахункова модель, яка дозволить отримати максимально адекватні результати досліджень. Для можливості порівняльної оцінки отриманих раніше результатів з результатами нової моделі використано загальний алгоритм проведення обчислювального експерименту [192], [193].

Проведено серію розрахунків у пружно-пластичній постановці з різним перерізом композитного кріплення, починаючи від діаметру стояків та верхняку 330 мм до 390 мм за різних гірничо-геологічних умов. Використовувалася просторова модель вуглевмісного гірського масиву при відпрацюванні 1 північної лави пласта d_4 ШУ «Покровське».

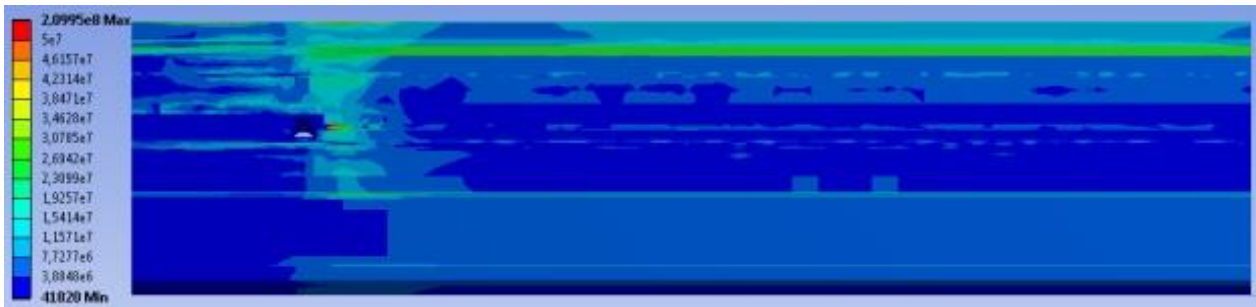
Особливістю використання просторового моделювання є отримання результатів, які можна розглядати в різних площинах і робити зрізи у необхідних місцях моделі для отримання максимально повної картини розподілу напружень у масиві та системі кріплення.

Для представлення результатів обчислювального експерименту вибрано епюри інтенсивності σ , які дадуть повну картину розподілу напружень для цього етапу експерименту.

Першим етапом дослідження була ситуація, коли очисний вибій розташовується над підготовчою виробкою. Для цього етапу використовуються загальні види епюр інтенсивності σ , вертикальних напружень σ_y та горизонтальних σ_x у породному масиві, а для систем кріплення штреку використано епюри інтенсивності σ .

З усіх трьох епюр (рис.3.2) чітко простежується утворення опорної зони тиску в боках виробки з боку залягання відпрацьованого вугільного пласта. Насамперед такий розподіл напружень пов'язаний з тим, що обидва сусідні виїмкові стовпи вже відпрацьовані і сталися порушення цілісності породної товщі, пов'язані зі заміщенням порожнин, що утворилися. Характер розподілу напружень практично повністю симетричний, розміри цих зон досягають 5 м завширшки і до 10 м заввишки. Концентрація напружень згідно епюри інтенсивності σ знаходиться в діапазоні 20 – 30 МПа, згідно з епюрами вертикальних напружень σ_y і горизонтальних σ_x стиснення перевищує 20 МПа. Ця концентрація напружень перевищує модуль пружності для породних шарів алевроліту та аргіліту, що залягають у цій зоні.

а)



б)



в)

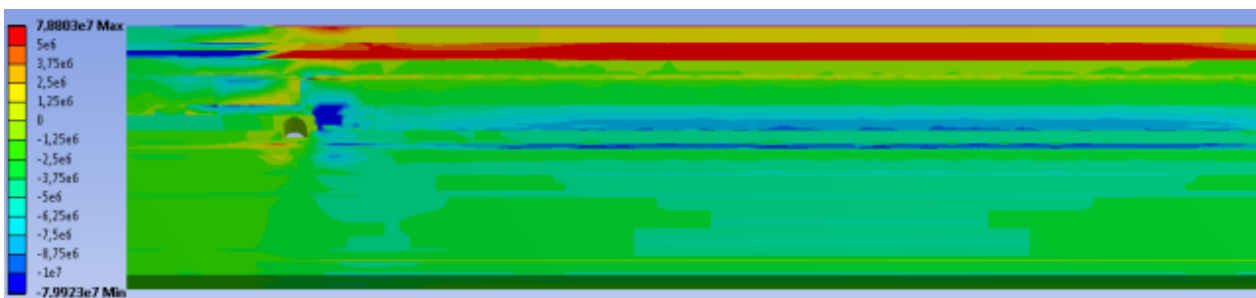


Рисунок 3.2 – Епюри загального виду моделі при розташуванні очисного вибою над дренажним вентиляційним штреком: а – інтенсивність напружень σ ; б – вертикальні напруження σ_y ; в – горизонтальні напруження σ_x

Також, з іншого боку виробки відбувається утворення зони розвантаження, яке показано на епюрі (рис. 3.2, б). Концентрація розтяжних напружень відбувається в діапазоні 0,5 – 2 МПа, які поширюються в покрівлю виробки на відстань 2 – 3 м і займають в ширину не більше 5 – 6 м.

Варто зазначити, що отримані епюри показують цілком характерний розподіл напружень для виїмкових виробок після відпрацювання однієї з лав [194].

У зв'язку зі специфікою пружно-пластичної поведінки матеріалів після переходу з пружного стану в пластичний практично припиняється зростання напружень, але при цьому збільшується приріст деформацій.

Для ретельного аналізу НДС рамного та композитного кріплень використана епюра інтенсивності напружень σ , на яку окремо винесено тільки елементи кріплення без гірського масиву.

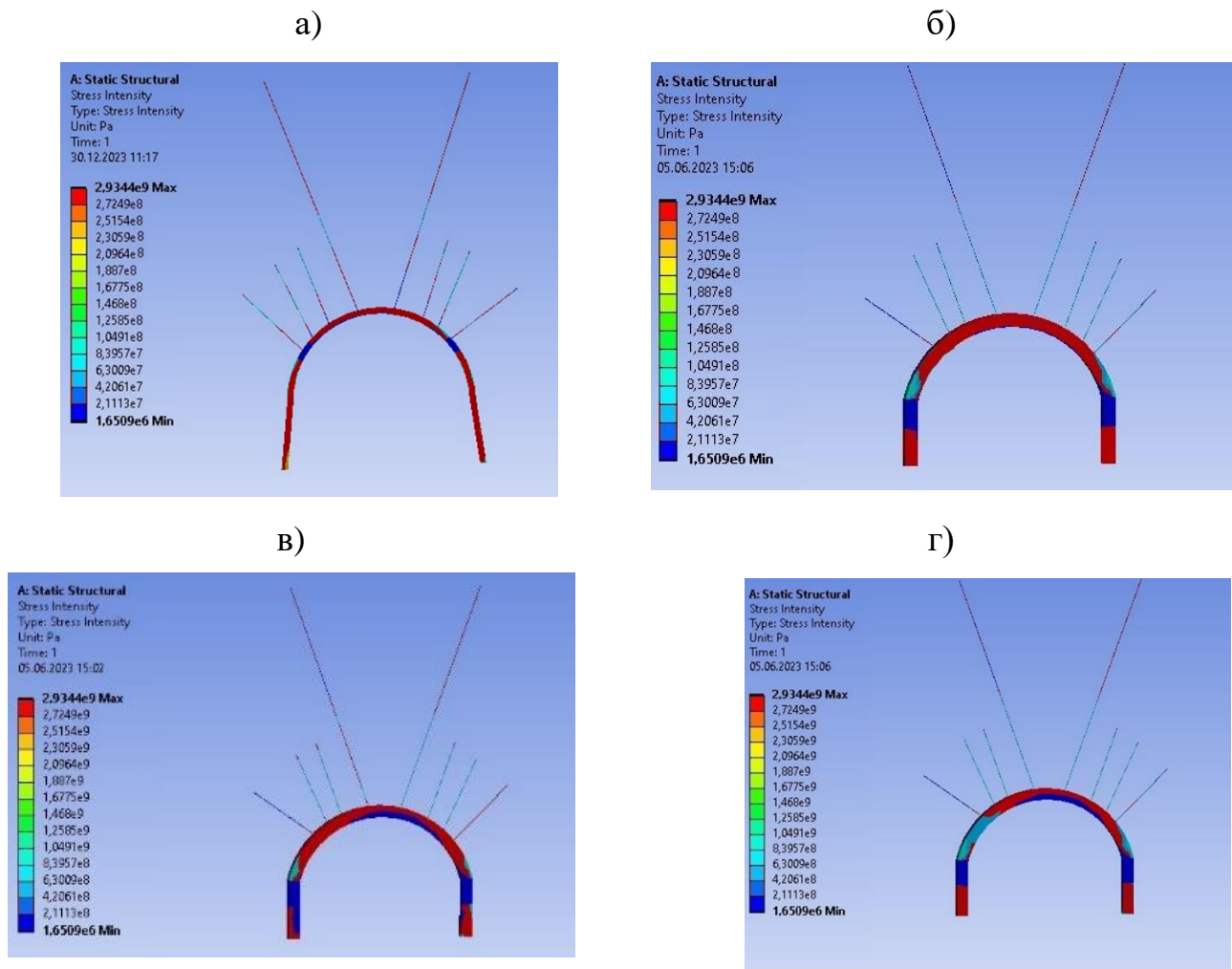


Рисунок 3.3 – Епюра інтенсивності напружень σ при розташуванні очисного вибою над виробкою для кріплення: а – базового металевого; б) композитного кріплення D33; в) композитного кріплення D36; г) композитного кріплення D39

По базовому варіанту рамного кріплення та композитного кріплення перерізом D33 (рис. 3.3,-а – 3.3,-б), яке встановлюється у виробку, в умовах безпосереднього впливу фронтальної зони опорного тиску очисного вибою

піддаються досить високим навантаженням. У результаті 80 – 85% площі стояків і верхняка рами відбувається розподіл напружень, що перевищують 270 МПа. Це є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує межу міцності легованої сталі, яка використовується для виготовлення спецпрофілю СВП.

Анкери, які встановлені у покрівлю виробки, піддаються менш високим напруженням, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до защемлення та можливого зрізу анкерів. У цій ситуації анкер не може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може послабити кріпильний ефект.

Композитне кріплення більшим перерізом (рис. 3.3,-в – 3.3,-г), що встановлене у виробку, в умовах безпосереднього впливу фронтальної зони опорного тиску очисного вибою також піддається досить високим навантаженням. Але площа стояків та верхняка, де відбувається розподіл напружень, які перевищують 270 МПа є меншою, ніж по базовому варіанту металевому кріплення та композитного перерізу D33 та складає 50 – 70 %. В результаті у стояках та верхняка рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють приблизно 240 – 250 МПа.

Анкерне кріплення піддається менш високим напруженням, як і у базовому варіанті кріплення, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до защемлення та можливого зрізу анкерів. У цій ситуації анкер не може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може послабити кріпильний ефект.

Варто зазначити, що отримані епюри показують цілком характерний розподіл приведених напружень для системи кріплення після відпрацювання однієї з лав [195], [196].

Виходячи з одержаних значень встановлено залежності зміни концентрації напружень σ_{\max} при надпрацюванні виробки лавою для різних видів кріплень (рис.3.4).

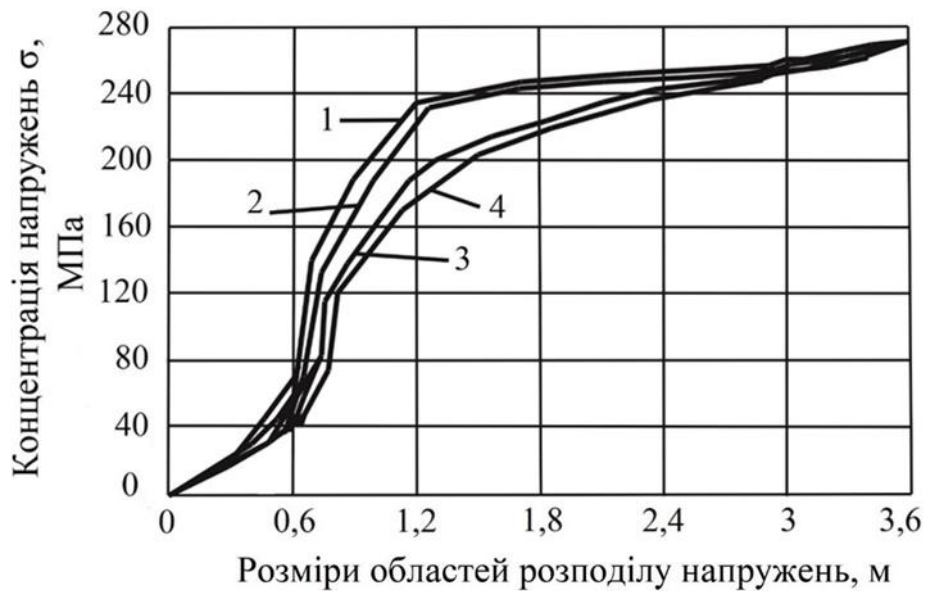


Рисунок 3.4 – Залежність зміни концентрації напружень σ_{\max} при надпрацюванні виробки лавою для кріплення: 1 – базове металеве кріплення, 2 – композитне кріплення D33, 3 – композитне кріплення D36, 4 – композитне кріплення D39

При аналізі отриманого графіка можна побачити, що зі зміною перерізу кріплення області σ_{\max} зменшуються. Область σ_{\max} поширюється на 3,0 м і 2,4 м відповідно, після чого починається рівномірне зниження напружень. Область з максимальними напруженнями утворюється в центральній частині верхняку з невеликим ухилом у ліву сторону. Найбільш висока концентрація напружень спостерігається при встановленні базового металевого кріплення та композитного з перерізом D33.

3.3. Закономірності зміни НДС кріпильної системи штреку в зоні ведення очисних робіт

Наступним етапом дослідження була ситуація, коли виробка знаходиться безпосередньо у зоні впливу очисних робіт. Епюра інтенсивності напружень σ представлена на рис. 3.5.

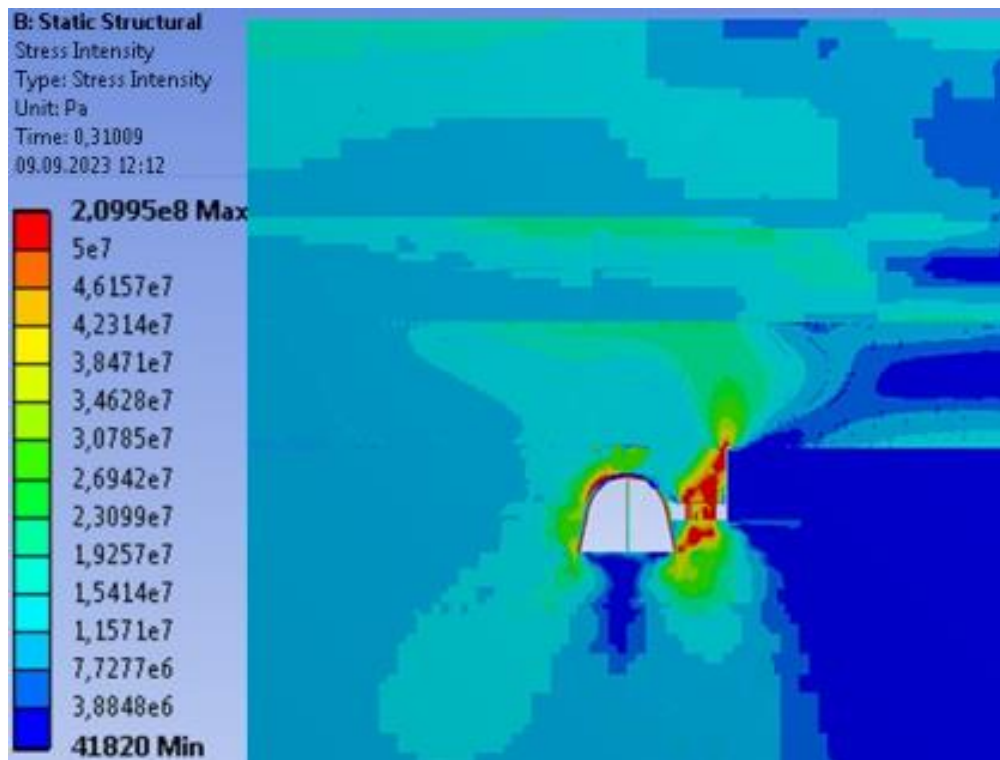


Рисунок 3.5 – Поперечний переріз епюри інтенсивності напружень σ при розташуванні виробки в зоні ведення очисних робіт

З епюри чітко простежується, що у покрівлі виробки утворюється зона розвантаження, яка відрізняється своєю формою та розмірами. По-перше, розвантаження практично не зачіпає породи безпосередньої покрівлі: з боку виробленого простору утворюється локальна область величиною, що відповідає стану прилеглого масиву. У породах над центральною частиною склепіння виникає область з концентрацією напружень рівня 1,6 – 2,0 МПа.

Для ретельного аналізу НДС рамного та композитного кріплень використана епюра інтенсивності напружень σ , на яку окремо винесено тільки елементи кріплення без гірського масиву.

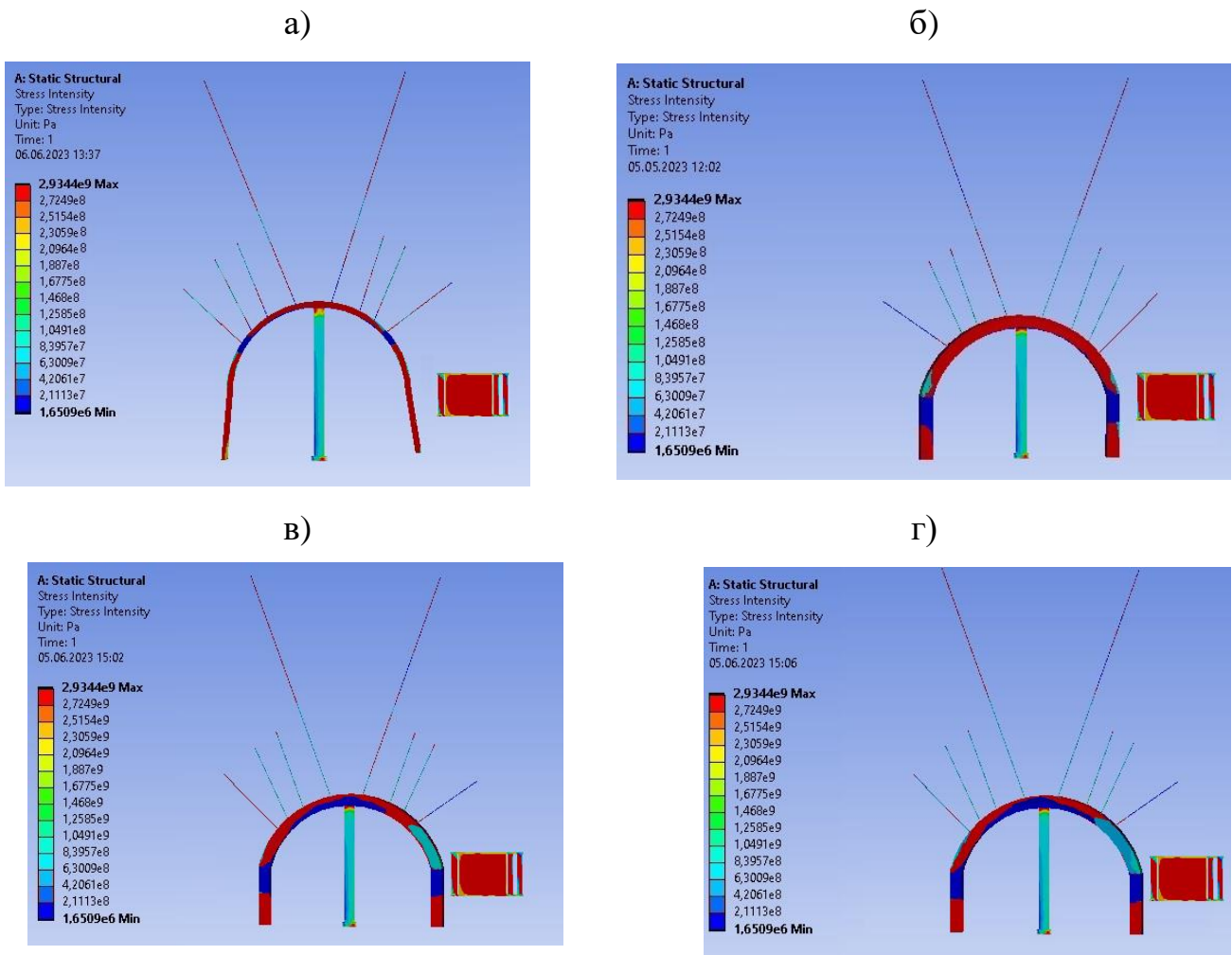


Рисунок 3.6 – Епюра інтенсивності напружень σ до системи кріплення при розташуванні виробки безпосередньо у зоні ведення очисних робіт: а – базового металевого; б – композитного кріплення D33; в – композитного кріплення D36; г – композитного кріплення D39

Рамне кріплення (Рис. 3.6-а) зазнає значних навантажень на обидва стояки, що викликано низкою факторів, включаючи тиск бічних порід, а також прийняттям частини навантаження на верхняк через піддатливі елементи. В цілому, по всій довжині стояків відбувається розподіл напружень, які перевищують модуль пружності, що провокує перехід матеріалу в нелінійний стан. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, що перевищують 270 МПа. Це є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує границю міцності легованої сталі, яка використовується для виготовлення спецпрофілю СВП.

Анкери, які встановлені у покрівлю виробки, піддаються менш високим напруженням, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до защемлення та можливого зрізу анкерів. У цій ситуації анкер не може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може послабити кріпильний ефект.

Композитне кріплення перерізом D33 (рис. 3.6-б), що встановлене у виробку, в умовах безпосереднього впливу очисного вибою також піддається досить високим навантаженням. Але площа стояків та верхняку, де відбувається розподіл напружень, які перевищують 270 МПа, є трохи меншою, ніж за базовим варіантом, але все одно складає приблизно 70 – 80 %. Ця площа також є критичною для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує границю міцності.

Анкерне кріплення піддається менш високим напруженням, як і у базовому варіанті кріплення, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до защемлення та можливого зрізу анкерів. У цій ситуації анкер не може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може послабити кріпильний ефект.

Композитне кріплення з перерізом D36 та D39 (рис. 3.6,-в – 3.6,-г) в умовах безпосереднього впливу очисного вибою піддається вже менш високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють приблизно 230 – 250 МПа.

Дерев'яна стійка кріплення посилення при жорсткому режимі роботи суттєво перевантажена: здебільшого величина інтенсивності напружень σ перевищує розрахунковий опір дерева на стиснення, особливо у верхній частині стійки. Але, в піддатливому режимі роботи стійки прогнозується її стійкий стан при усуненні дії згинального моменту. Це досягається невеликим нахилом дерев'яної стійки (80° – 85° до горизонталі) у бік виробленого простору.

Анкерне кріплення спрацьовує майже на повну можливість, однак у місцях контакту породних шарів між собою відбувається зсув літологічних різниць відносно один одного, що призводить до защемлення та можливого зрізу анкерів.

У цій ситуації анкер не може повноцінно використати всю свою довжину, що в результаті може послабити кріпильний ефект. Що стосується арматури двох канатних анкерів, концентрація напружень поступово збільшується, досягаючи свого максимуму в центральній частині їх довжини, а на самому контурі знову знижуються до 90 – 150 МПа.

Отримані епюри показують цілком характерний розподіл приведених напружень для системи кріплення, що знаходиться під дією безпосереднього впливу очисних робіт [197], [198].

З даних, що наведені на епюрах рис. 3.6, було побудовано графік (рис. 3.7), де для кожного етапу розрахунку показано розміри областей розподілу напружень у різних видах кріплення.



Рисунок 3.7 – Концентрація напружень σ_{\max} при різному виді кріплення відповідно: 1 – базове металеве кріплення, 2 – композитне кріплення D33, 3 – композитне кріплення D36, 4 – композитне кріплення D39

З отриманого графіка можна підтвердити минулий висновок, що зі зміною перерізу кріплення області σ_{\max} зменшуються. Але при встановленні композитного кріплення безпосередньо у зоні ведення очисних робіт область з максимальними напруженнями утворюється в центральній частині верхняку та у лівій стороні кріплення, що зумовлено розташуванням лави з іншої сторони. Область σ_{\max}

поширюється на 3,6 м і 2,8 м відповідно, після чого починається рівномірне зниження напружень. Найбільш висока концентрація напружень спостерігається при встановленні базового металевого кріплення та композитного кріплення D33.

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

Окрім аналізу конкретних випадків проведення підготовчих виробок та впливу на них надпрацювання та безпосередньо очисних робіт на прикладі ШУ «Покровське» було проведено додаткові дослідження для різних глибин та властивостей гірських порід для цих умов.

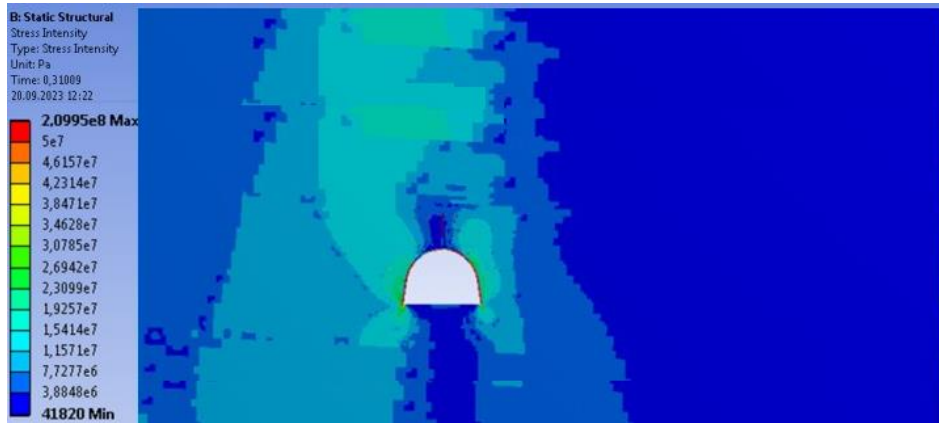
Для визначення раціонального перерізу композитного кріплення проведено низку досліджень [199]. Основна мета полягала у визначенні раціонального перерізу щодо глибини проведення виробки та урахування властивостей гірських порід. У результаті проведено серію обчислювальних експериментів на базі методу скінченних елементів.

За основу взято модель, що використана раніше та яка відповідає умовам проведення виробок в умовах глибоких горизонтів ШУ «Покровське». В результаті було проведено експерименти з різною глибиною розташування виробки.

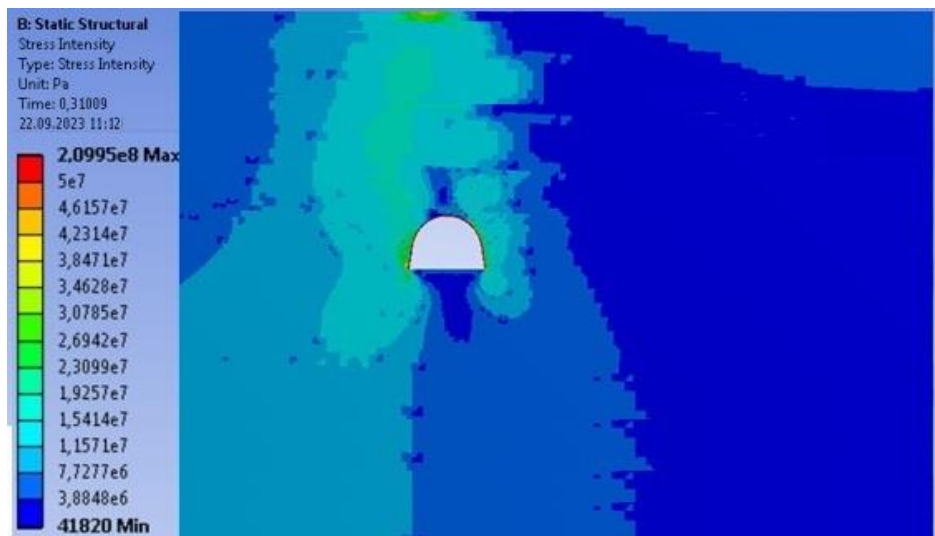
Для детального аналізу напружено-деформованого стану породного масиву на різній глибині проведення виробки використані епюри інтенсивності напружень σ . На рис. 3.8 представлені епюри інтенсивності трьох етапів розрахунку зі збільшенням глибини проведення виробки від 1000 м до 1060 м.

В результаті аналізу епюри інтенсивності напружень σ (рис.3.9) можна відзначити, що загальний характер розподілу напружень, порівняно з попередньою серією розрухунків, залишився тим самим.

a)



б)



в)

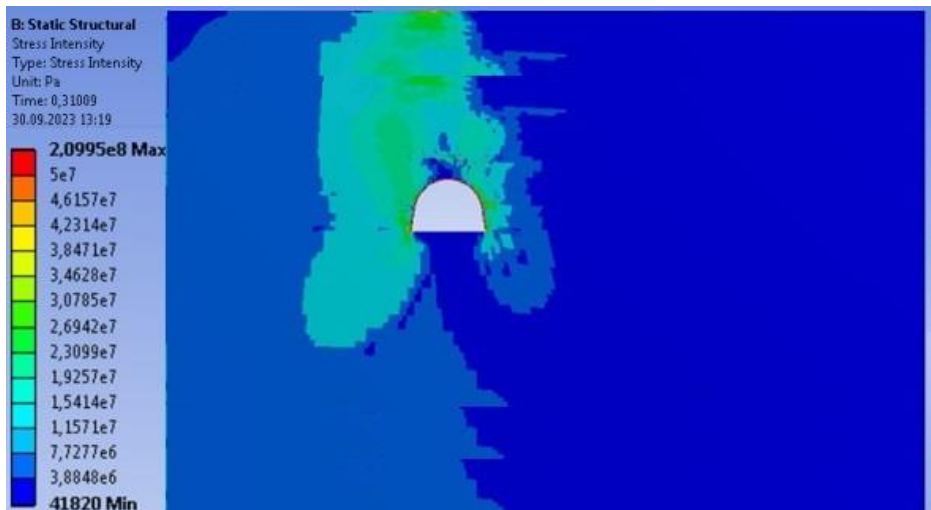


Рисунок 3.8 – Розподіл інтенсивності напружень σ в гірському масиві при глибині проведення виробки: а – 1000 м; б – 1030 м; в – 1060 м

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

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

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

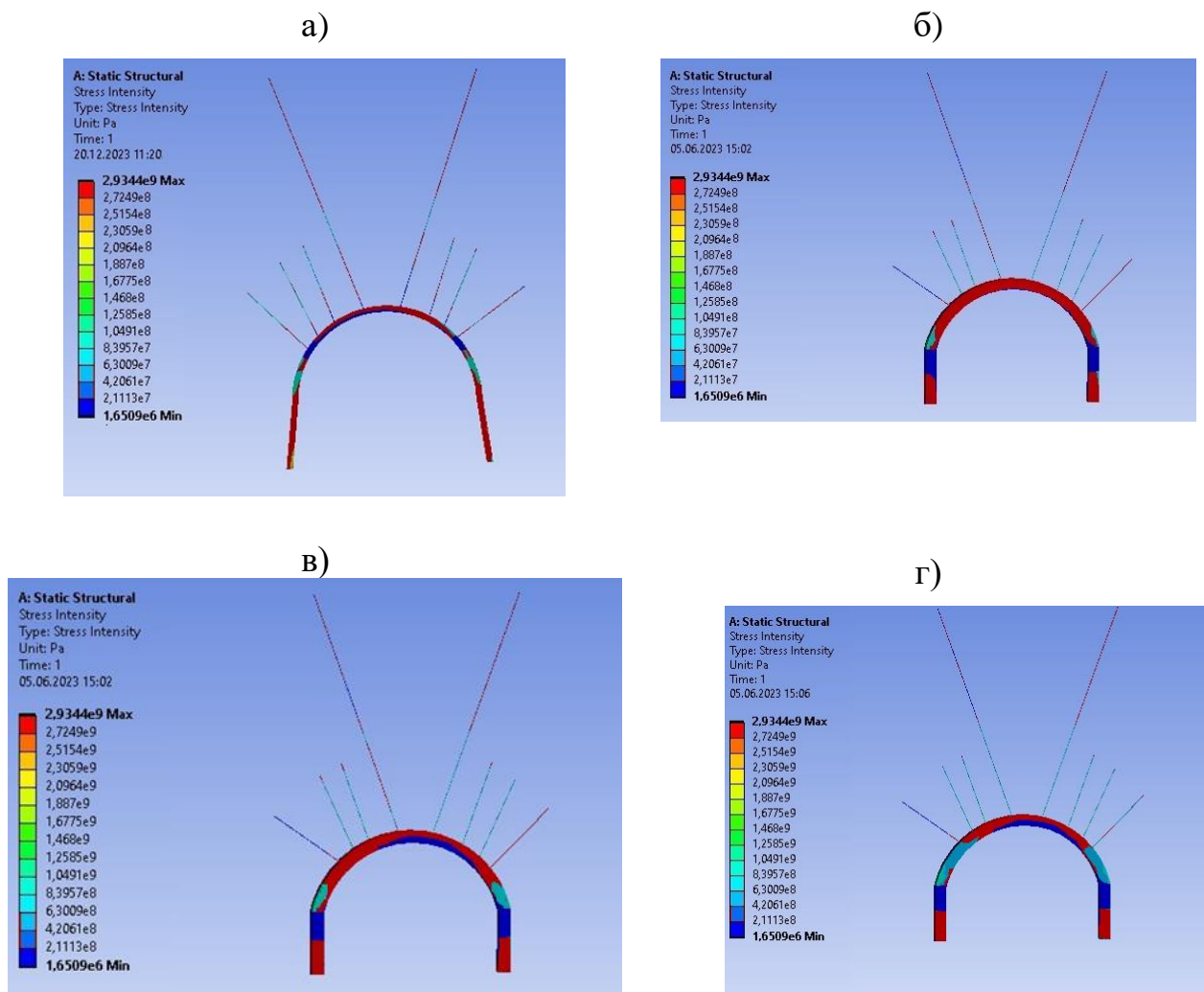


Рисунок 3.9 – Епюра інтенсивності напружень σ для різного виду кріплення при глибині $H=1000$ м: а – базового металевого; б – композитного кріплення D33; в – композитного кріплення D36; г – композитного кріплення D39

З одержаних епюр видно, що базовий варіант металевого кріплення та композитного кріплення з перерізом D33 (рис. 3.9,-а – 3.9,-б) на глибині 1000 м піддається високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють та перевищують 270 МПа, що є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує межу міцності.

Композитне кріплення з перерізом D36 та D39 (рис. 3.10,-в – 3.10,-г), на глибині 1000 м піддається вже менш високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які коливаються у межах 240 – 260 МПа.

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

Наступним етапом розрахунку є глибина проведення виробки 1030 м, епюри інтенсивності напружень σ наведено на рис. 3.10.

З одержаних епюр видно, що базовий варіант металевого кріплення та композитного кріплення з перерізом D33 (рис. 3.10,-а – 3.10,-б) на глибині 1030 м піддається високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють та перевищують 270 МПа, що є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує границю міцності.

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

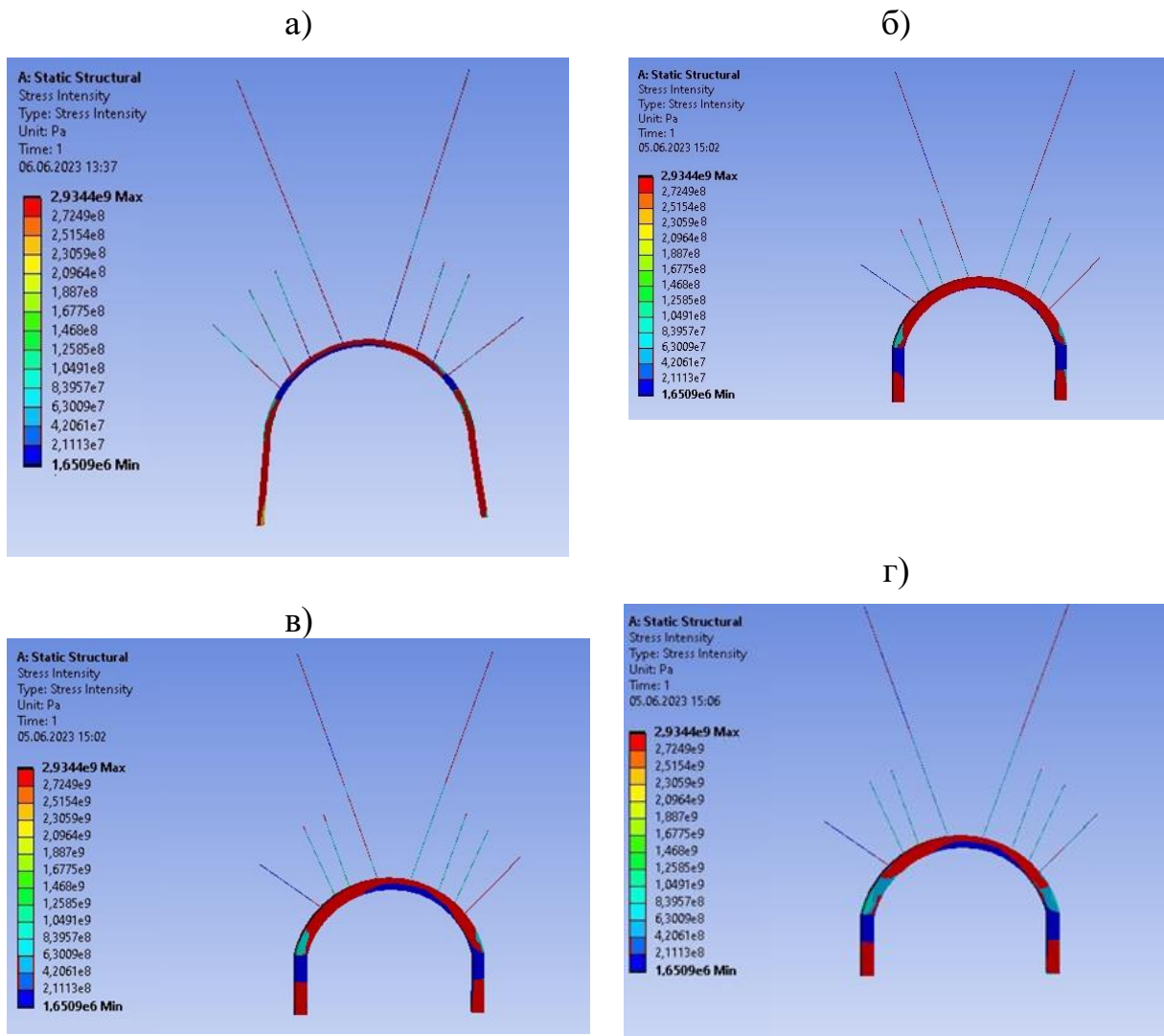


Рисунок 3.10 – Епюра інтенсивності напружень σ для різного виду кріплення при глибині $H=1030$ м: а – базового металевого; б – композитного кріплення D33; в – композитного кріплення D36; г – композитного кріплення D39

Композитне кріплення з перерізом D36 та D39 (рис. 3.10-в – 3.10-г), на глибині 1030 м піддається вже менш високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють приблизно 250-260 МПа.

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

Наступним етапом розрахунку є глибина проведення виробки 1060 м, епюри інтенсивності напружень σ представлені на рис. 3.11.

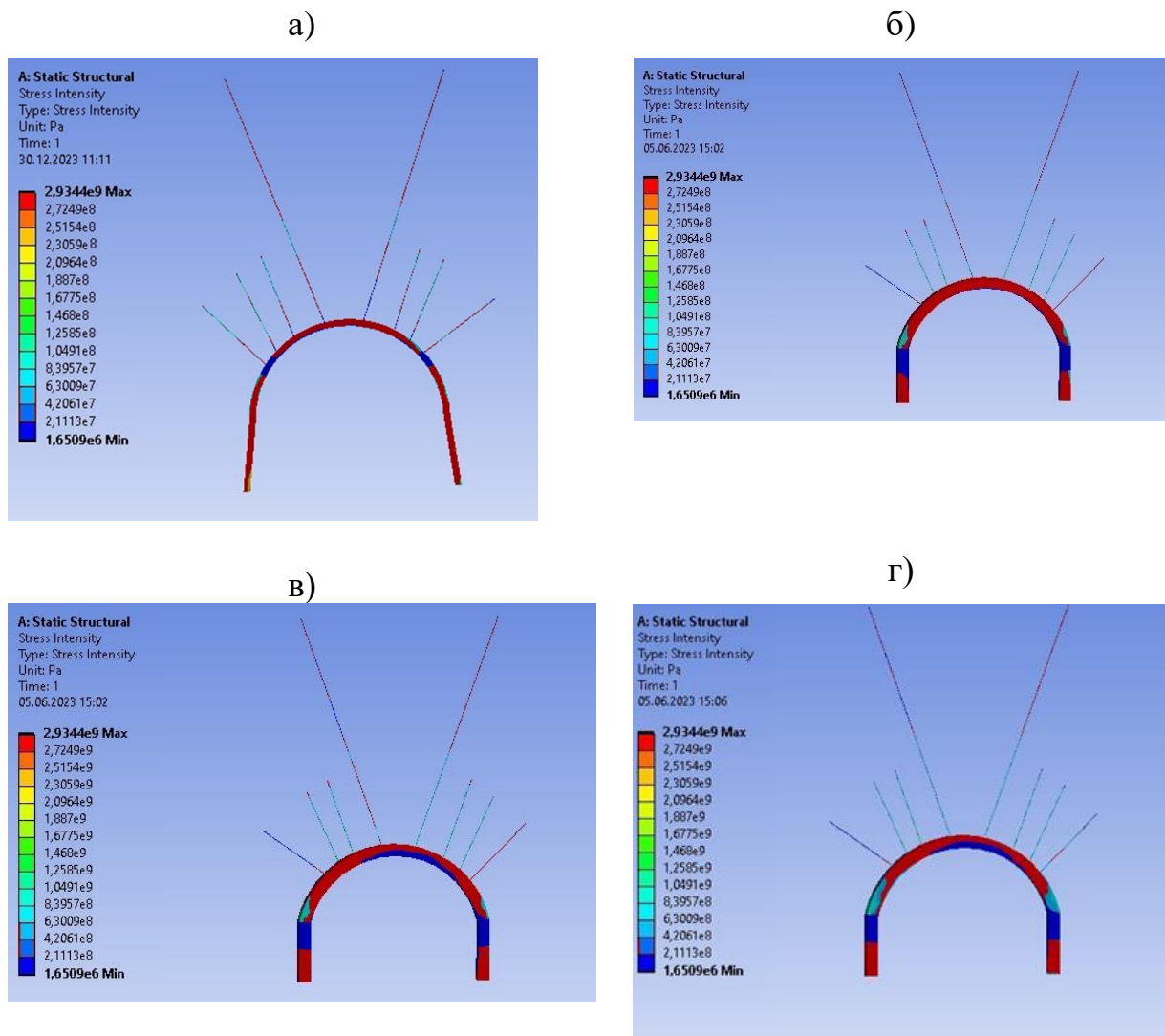


Рисунок 3.11 – Епюра інтенсивності напружень σ для різного виду кріплення при глибині $H=1060$ м: а – базового металевого; б – композитного кріплення D33; в – композитного кріплення D36; г – композитного кріплення D39

Металева та композитна кріплення з перерізом D33 (рис. 3.11,-а – 3.11,-б) на глибині 1060 м зазнає значних навантажень на обидва стояки, що викликано рядом факторів, включаючи тиск бічних порід, а також прийняттям частини навантаження на верхняк через піддатливі елементи. В цілому, по всій довжині стояків відбувається розподіл напружень, що перевищують модуль пружності, що провокує перехід матеріалу в нелінійний стан. В результаті у стояках та верхняку

рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють та перевищують 270 МПа, що є критичним для збереження стійкості виробки, оскільки перевищує границю міцності.

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

Композитне кріплення з перерізом D36 та D39 (рис. 3.11,-в – 3.11,-г), поза на глибині 1060 м піддається вже менш високим навантаженням. В результаті у стояках та верхняку рами відбувається розподіл напружень, які дорівнюють приблизно 240 – 260 МПа.

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

З даних, що представлені на епюрах рис. 3.9 – 3.11, було побудовано графіки (рис. 3.12), де для кожного етапу розрахунку показано розміри областей розподілу напружень у різних видах кріплення.

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

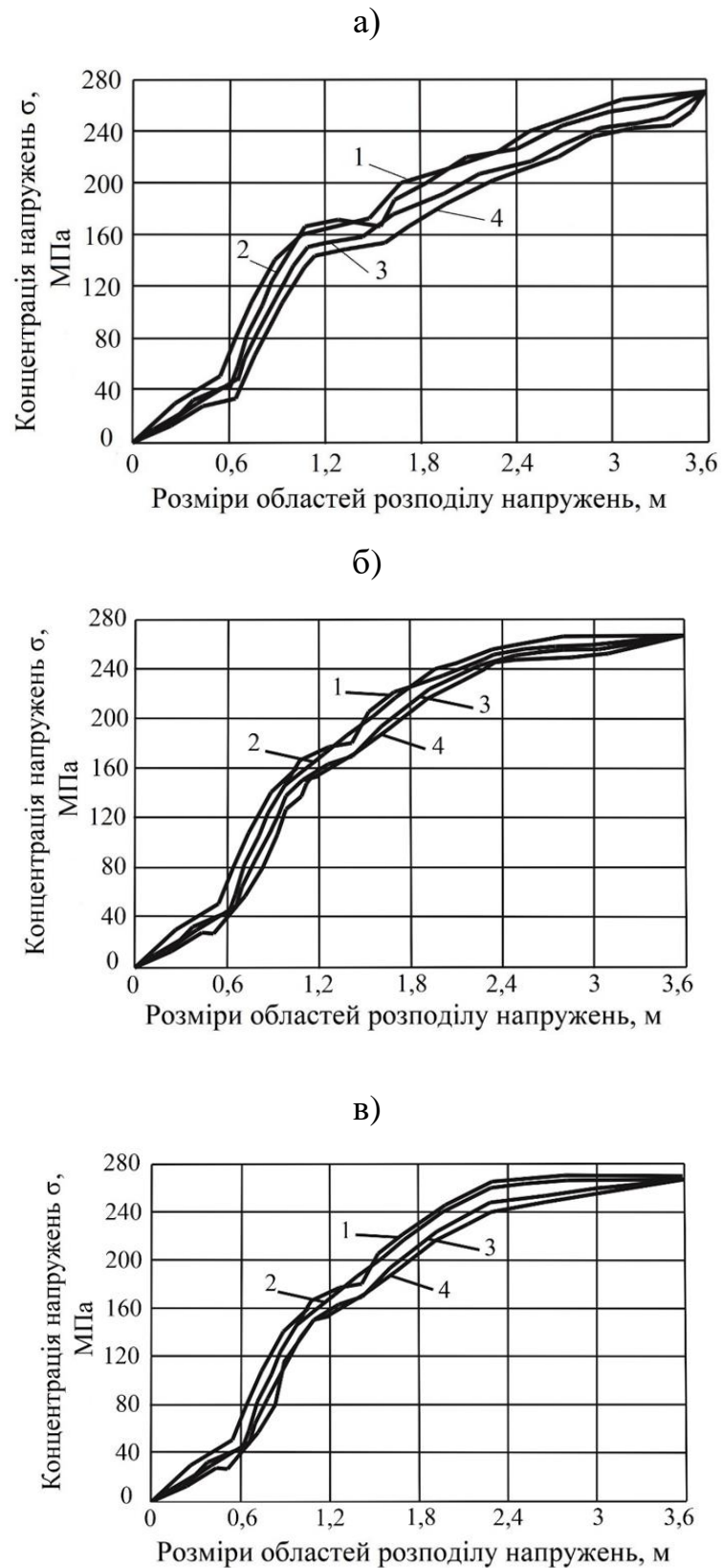


Рисунок 3.12 – Концентрація напружень σ_{\max} при різному виді кріплення відповідно до глибини проведення виробки: а) 1000 м; б) 1030 м; в) 1060 м, де 1 – базове металеве кріплення; 2 – композитне кріплення D33; 3 – композитне кріплення D36; 4 – композитне кріплення D39

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

Для НДС анкерного кріплення враховувалися розміри області максимально допустимих напружень, що досягають межі текучості сталі $\sigma_{\max} = 270$ МПа по кожному анкеру для всіх етапів дослідження. Для цього побудовано гістограму (рис. 3.13), яка відображає розміри даних областей.

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

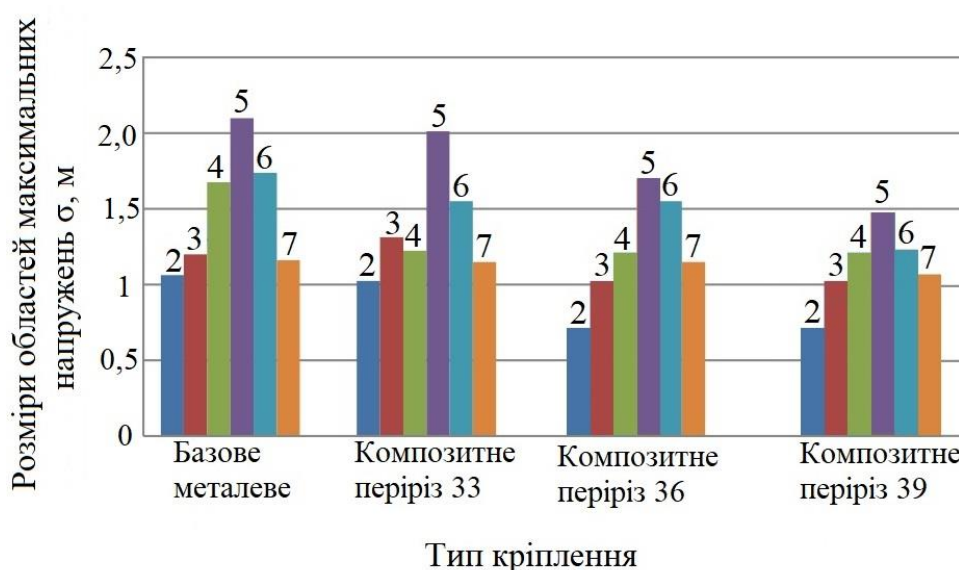


Рисунок 3.13 – Вплив зміни перерізу кріплення на розміри області σ_{\max} в анкерах

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

Окрім аналізу різних глибин проведення виробки було проведено додаткові дослідження для різних властивостей гірських порід на прикладі ШУ «Покровське». За сукупністю результатів проведеного аналізу стану гірського масиву на великих глибинах розробки та композитного кріплення побудовано сім'ю графіків (рис. 3.14), що відображають закономірності впливу геомеханічних факторів на переріз композитного кріплення. Чітко простежується нелінійний прямо пропорційний зв'язок перерізу композитного кріплення з глибиною H проведення виробки та нелінійний обернено пропорційний зв'язок з її середнім розрахунковим опором на стиснення R гірського масиву.

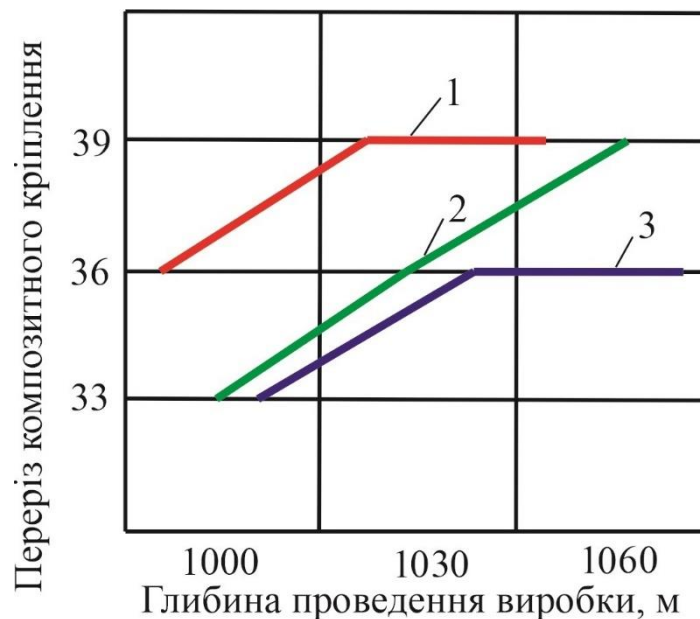


Рисунок 3.14 – Залежність раціонального перерізу композитного кріплення від глибини проведення виробки H при середньому розрахунковому опорі гірського масиву на стискання: 1 – $R = 13,5$ МПа; 2 – $R = 18,0$ МПа; 3 – $R = 25,0$ МПа.

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

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

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

3.6. Висновки до розділу

1. Вдосконалено розрахункову модель вивчення напружено-деформованого стану гірського масиву навколо підготовчої виробки за рахунок переходу від лінійного конструкційного аналізу до нелінійного, що дозволило підвищити достовірність отриманих результатів.

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

3. За сукупністю результатів проведеного аналізу стану гірського масиву на великих глибинах розробки та композитного кріплення побудовано сім'ю графіків,

що відображають закономірності впливу геомеханічних факторів на переріз композитного кріплення. Переріз композитного кріплення змінюється за степеневою залежністю від співвідношення глибини проведення виробки H та середнього розрахункового опору на стиснення R гірських порід. Це дозволяє прогнозувати стійкий стан виробки протягом усього терміну її експлуатації.

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

5. Результати досліджень за матеріалами третього розділу опубліковано у наукових працях [195] – [198].

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПОЗИТНОГО КРІПЛЕННЯ, ЩО ПІДТРИМУЄТЬСЯ У МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ГЛИБИНАХ ПОНАД 1000 МЕТРІВ

4.1. Узагальнення особливостей проявів гірського тиску при кріпленні виробок, які знаходяться на глибинах понад 1000 метрів

Розділ 3 дисертаційної роботи присвячений встановленню закономірностей впливу різних гірничо-геологічних умов на підготовчу виробку, що закріплена композитним кріпленням. Завдання цього розділу – виявити закономірності зв'язку НДС елементів кріпильної системи між собою з головною метою – узагальнення залежності та розробка рекомендацій щодо вибору їх раціональних параметрів для умов надглибоких горизонтів.

У результаті проведеного комплексного дослідження з використанням сучасних обчислювальних технологій встановлено низку особливостей проявів гірського тиску при кріпленні виробок композитним кріпленням за різних гірничо-геологічних умов.

Для досліджень як приклад використовувалися параметри проведення конвеєрного штреку блоку № 10 ШУ «Покровське», при відпрацюванні пласта d_4 . Проведено серії обчислювальних експериментів, що дають змогу простежити характер зміни НДС при зміні перерізу композитного кріплення.

При наближенні очисного вибою до виробки змінюється НДС масиву. Відбувається об'єднання фронтальної зони опорного тиску попереду вибою та в боках виробки. В результаті весь масив, що знаходиться між вугільним пластом та виробкою, піддається дії підвищених напружень.

Дана особливість взаємовпливу виробки та очисного вибою відображається на НДС композитного кріплення. Відбувається поступальне зростання напружень в кріпленні з наближенням вибою до виробки. Розподіл напружень у кріпленні відбувається асиметрично, що цілком закономірно у зв'язку з попаданням під вплив фронтальної зони опорного тиску та дії дерев'яного стояка кріплення посилення.

Максимальним навантаженням композитне кріплення піддається при розташуванні кріплення безпосередньо у зоні ведення очисних робіт, що повністю відповідає принципу розподілу напружень у гірському масиві. Згідно з результатами обчислювальних експериментів встановлено, що стояки композитного кріплення виробки значно навантажені навіть при зменшенні глибини проведення виробки. Це пов'язано з перерозподілом навантаження від верхняку, а також з бічним тиском гірських порід.

У ході досліджень була поставлена задача встановлення раціональних параметрів кріплення із композитних матеріалів. На підставі отриманих залежностей встановлено, що зі зміною перерізу композитного кріплення області σ_{\max} зменшуються, аж до зниження напружень нижче цього рівня. При цьому зниження відбувається майже симетрично. Це пов'язано з перерозподілом НДС у боках виробок, що за різної величини перерізу композитного кріплення дає різну картину напружень.



Рисунок 4.1 – Алгоритм пошуку раціональних параметрів системи композитного кріплення

Під час проведення обчислювальних експериментів вдалося врахувати максимальну кількість негативних факторів, які прямо чи опосередковано впливають на збереження перерізу виробки та роботу композитного кріплення. Отримано та проаналізовано велику кількість даних про стан гірського масиву та системи кріплення. На підставі отриманих результатів розроблено алгоритм пошуку раціональних параметрів системи кріплення для даних умов (рис. 4.1).

4.2. Алгоритм пошуку раціональних параметрів системи кріплення

Тенденції розвитку геомеханічних досліджень [200], [201], які наведені на підтримку виробок, спрямовані на врахування всіх факторів, що впливають на стійкість виробки.

У процесі попередніх досліджень окреслено коло елементів кріпильних та охоронних систем, що найбільш застосовуються при підтримці гірничих виробок, але для підвищення ефективності їх роботи необхідно створювати комплекс рекомендацій щодо вибору параметрів цих елементів у конкретних умовах підтримки виїмкових виробок.

Багато теоретичних робіт і шахтних експериментів [202] – [207] підтвердили, що рамне кріплення не виконує своїх прямих функцій до тих пір, поки контур виробки не почне чинити тиск на раму. В результаті підтримка виробки починається тільки після початку активного процесу зсуву породи у виробку, що знижує ефективність роботи самого кріплення, яке могло б стримати цей процес ще на момент його початку. Цей недолік частково знижується шляхом якості використання дерев'яних стояків кріплення посилення. Тим не менш, це скоріше напівзаходи.

Використання анкерного кріплення в основному спрямоване на виправлення недоліків рамного кріплення та його доповнення. Буріння шпурів безпосередньо в масиві з встановленням в них сталевих арматур, а також використання сталеполімерних матеріалів показало свою ефективність на практиці. Створення за допомогою анкерів так званої «опорної плити» у покрівлі виробки дозволяє частково знизити тиск на рамне кріплення, а також перешкоджає безладному

обваленню порід у виробку. Популярність анкерної технології сприяло появі широкого переліку різних технологій встановлення, використання допоміжних матеріалів, типів та розмірів анкерів.

Для обґрунтування параметрів кріпильної системи було вивчено характер розподілу напружень в основних її елементах, оцінено рівень їхньої навантаженості та ймовірність втрати стійкості. Всі ці позиції певним чином залежать від того чи іншого поєднання кріпильних елементів та закономірності їх взаємовпливу. Насамперед здійснено пошук закономірностей впливу геомеханічних параметрів підтримки виїмкових виробок на НДС їхньої кріпильної системи.

В умовах ШУ «Покровське» оптимальним є використання комбінації двох основних видів кріплення. При цьому відмінно зарекомендувала себе методика, яка дозволяє об'єднати анкерне та рамне кріплення в єдину вантажонесучу систему за допомогою канатних зв'язків [211]. В результаті анкера, що закріплені в масиві, використовуються для підвищення ефекту опору рами від тиску порід, спираючись на властивості міцності гірського масиву. Виходить повністю замкнута структура, яка максимально ефективно підтримує контур виробки.

Не менш важливими факторами, що впливають на роботу кріплення, є крок встановлення рам, переріз композитного кріплення, використання піддатливих елементів, довжина та тип анкерів, а також переріз штоку. Успішне оперування перерахованими факторами, дозволяє суттєво підвищувати ефективність роботи кріплення.

У роботі було здійснено аналіз системи кріплення, яка використовується для конвеєрного штреку блоку № 10 ШУ «Покровське» під час надпрацювання, при безпосередньому веденні очисних робіт та поза зоною ведення. За результатами серії обчислювальних експериментів проведено аналіз НДС системи кріплення, яка використовувалась та запропонованої системи композитного кріплення різного перерізу. Встановлено недоліки роботи даної системи, на підставі яких і буде здійснено пошук раціональних параметрів для умов цієї виробки.

Метою даного дослідження є визначення параметрів композитного кріплення, які максимально ефективно беруть участь у підтримці виробки. Таким

чином, необхідно на підставі проведеного аналізу НДС гірського масиву та системи композитного кріплення встановити елементи, які максимально навантажені, та розглянути можливість посилення цих ділянок, а також розглянути доцільність використання елементів, що навантажені мінімально.

Першим основним елементом кріпильної системи є рамне кріплення. Для виключення впливу на НДС рами інших елементів кріпильної системи їх параметри фіксувалися, а змінювалися лише геомеханічні умови підтримки: глибина розміщення виробки, структура та механічні властивості гірського масиву.

Кожна зміна у системі кріплення проходила перевірку шляхом проведення обчислювального експерименту, за результатами якого можна було дати відповідну оцінку ефективності його роботи. Залежно від результату розрахунок повторювався з урахуванням поправок або відбувався перехід до розгляду наступного елемента у разі позитивного результату.

Для пошуку раціональних параметрів встановлення композитного кріплення було розроблено кілька видів його перерізу та перерізу штоку, який входить у дроссельний отвір (рис. 4.2). Під час розробки схем враховувалися як результати розрахунку НДС кріпильної системи, так і особливості експлуатації виробки.

За даними розрахунку НДС для даних видів було проведено порівняльний аналіз, за результатами якого встановлено, що найбільш ефективним є використання схеми на рис. 4.2, є. Використання перерізу кріплення 390 мм та перерізу штока 150 мм, а також комбінації сталеполімерних та канатних анкерів дозволяє більш ефективно підтримувати породи основної покрівлі та зниження впливу на верхняк рами. З'явилася можливість зменшити навантаження на композитне кріплення, збільшивши переріз штоку.

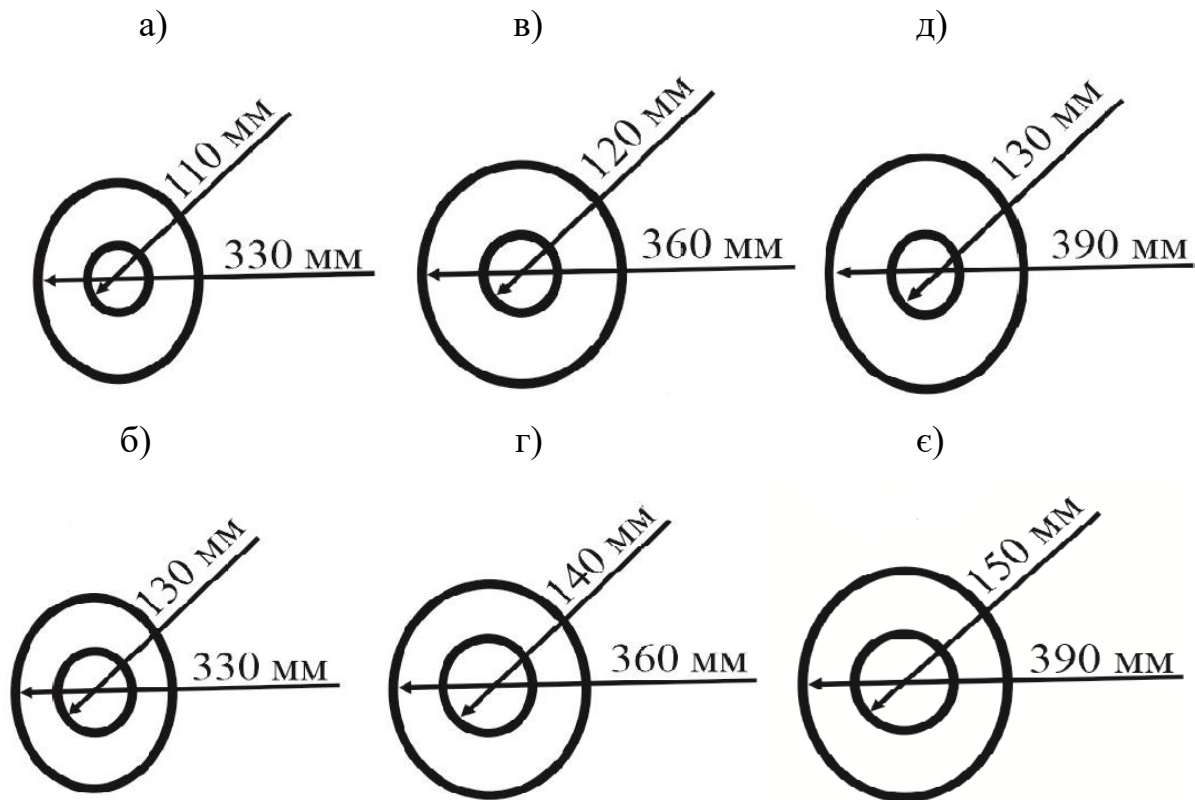


Рисунок 4.2 – Експериментальні види перерізів композитного кріплення та штоку для підготовчих виробок на глибинах понад 1000 метрів

4.3 Розрахунок та аналіз НДС удосконаленої системи композитного кріплення

Використовуючи розроблений алгоритм пошуку раціональних параметрів системи кріплення, який був успішно випробуваний на прикладі підготовчої виробки, розроблена система композитного кріплення виробки для аналогічних гірничо-геологічних умов. За основу була взята схема, що вже обґрунтована для підготовчої виробки з метою уніфікації одержаних результатів.

На базі наявної схеми, користуючись алгоритмом пошуку, що базується на вже підтверджених обчислювальних розрахунках, було встановлено, що необхідно провести деякі зміни. Зокрема, у результаті додаткових експериментів на глибині проведення виробки 1030-1060 м, постало питання щодо перерізу штоку. На базі використання розробленого алгоритму було проведено розрахунок НДС гірського масиву з використанням запропонованої системи кріплення зі змінним перерізом штоку.

Гірський масив у розробленій моделі (рис. 4.3 а) повністю ідентичний тій моделі, що вже раніше використовувалась для дослідження композитного кріплення. Переріз кріплення відповідає вже обгрунтованій величині 390 мм, переріз штоку 150 мм, крок встановлення рамного кріплення – 0,5 м. Розроблено дві системи композитного кріплення зі збільшеним штоком та зі стандартним, причому схема розміщення анкерів не змінюється.

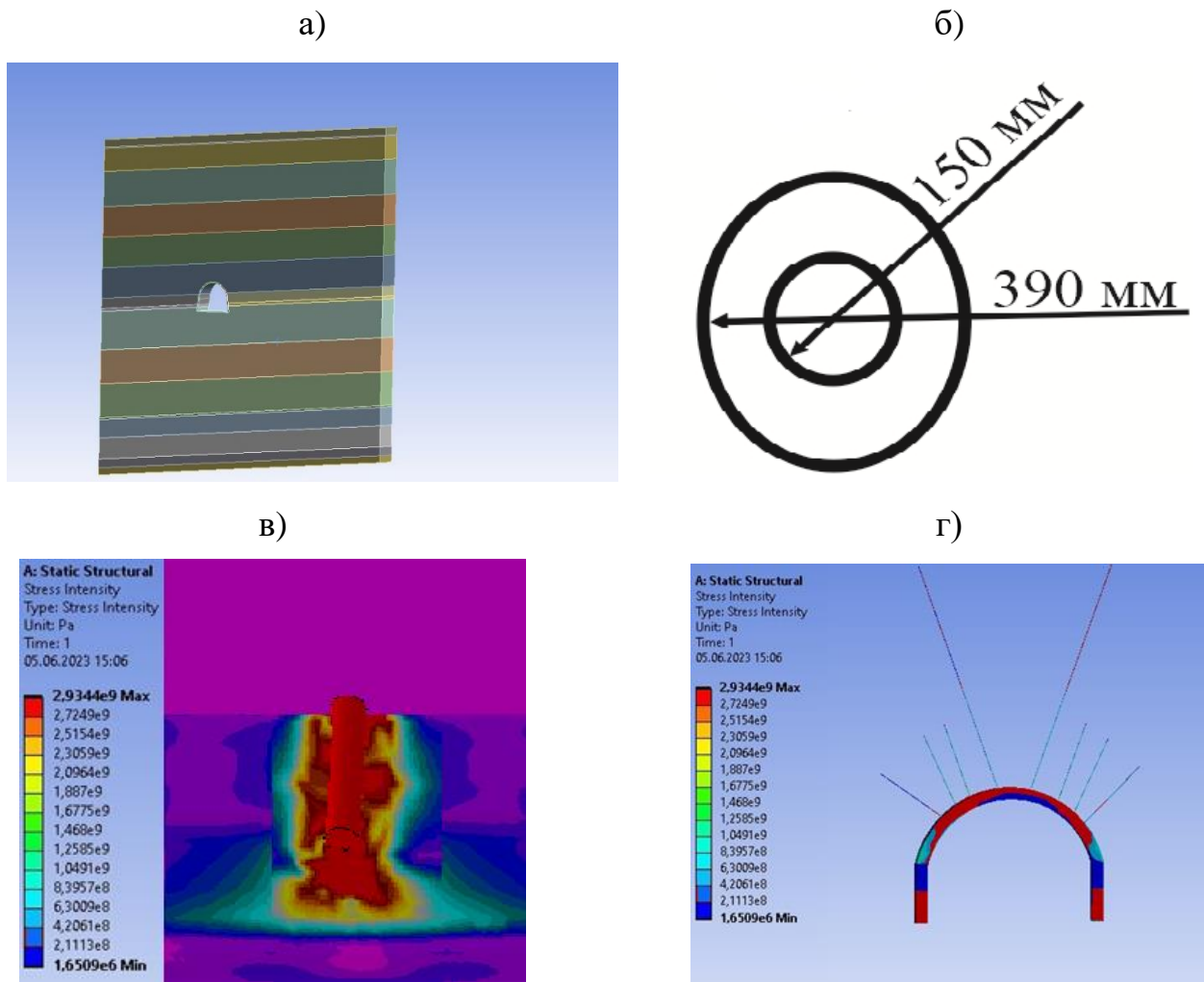


Рисунок 4.3 – Розрахунок НДС для отриманої системи композитного кріплення виробки для великих глибин розробки: а – загальний вигляд моделі; б – схема перерізу композитного кріплення та штоку; в – епюра інтенсивності напружень σ штоку; г – епюра інтенсивності σ напружень системи композитного кріплення

Для аналізу результатів обчислювального експерименту використано епюри інтенсивності напружень σ системи композитного кріплення.

Рамне кріплення зазнає значних навантажень на обидва стояки, що викликано низкою факторів, включаючи тиск бічних порід, а також прийняттям частини навантаження на верхняк через піддатливі елементи. В цілому, по всій довжині стояків відбувається розподіл напружень, які перевищують модуль пружності, що провокує перехід матеріалу в нелінійний стан. Верхняк рами навантажений менш інтенсивно та нерівномірно.

Утворюється область з високими напруженнями, що перевищують $\sigma_t = 270$ МПа, по центру верхняку та поширюється на 0,9 – 1,4 м. Після чого відбувається поступове зниження напружень, симетричне з обох сторін, аж до 150 МПа. Очевидно, що таке різке зниження напружень у верхняку пов'язане з дією вузлів піддатливості, які ефективно розвантажують верхняк, передаючи навантаження на стояки.

Розподіл напружень в анкерному кріпленні також відбувається нерівномірно. Напруження в бокових анкерах на 90% його довжини перевищують $\sigma_t = 270$ МПа, що пов'язано із впливом фронтальної зони опорного тиску. Також близько 70% довжини канатних анкерів схильні до напружень 270 МПа і вище, після чого відбувається перехід в непружний стан.

У штоці діє достатньо рівномірний розподіл напружень в діапазоні 160 – 220 МПа, за виключенням появи збурень, пов'язаних зі зсувом породних шарів по горизонталі відносно один одного.

Для якісної оцінки ефективності роботи системи кріплення необхідно враховувати фактор очисних робіт. На даному етапі очисний вибій знаходиться по центру вертикальної осі симетрії виробки, тому розподіл напружень, що відображається у композитному кріпленні, актуальний для конкретного випадку. Саме з цим фактором пов'язана, зокрема, асиметрія розподілу максимальних напружень з креном в ліву сторону.

У зв'язку з цим необхідно зазначити, що вся запропонована система композитного кріплення бере активну участь у процесі підтримки гірничої виробки та піддається досить високим навантаженням, але в різний момент часу.

4.4 Обґрунтування раціональних параметрів композитного кріплення для гірничих виробок вугільних шахт, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів

Виконані дослідження дозволили розробити систему рекомендацій щодо надійної підтримки підготовчих виробок композитним кріпленням в умовах глибоких шахт. Вони включають:

- обґрунтування перерізу композитного кріплення залежно від глибини розміщення виробки H та середнього розрахункового опору гірського масиву на стиснення R ;

- визначення параметрів кріпильної системи в залежності від умов підтримки підготовчої виробки: крок встановлення композитного кріплення L та його переріз; схема розміщення анкерів та переріз штоку.

Після обробки результатів серії обчислювальних експериментів методами кореляційно-дисперсійного аналізу [207] встановлено, що найбільш тісний зв'язок простежується між величиною відношення глибини H розміщення виробки та середньому розрахунковому опорі гірського масиву на стискання R . Рівняння перерізу композитного кріплення має вигляд:

$$D = 0,12\left(\frac{H}{R}\right)^{0,27}, \text{ м} \quad (4.1)$$

Параметр R визначається за нормативним документом [208] з урахуванням впливу характеристик міцності літологічних різниць, що залягають на відстані по вертикалі між підготовчою виробкою та вугільним пластом, що відпрацьовується.

Рівняння дозволяє спрогнозувати раціональну величину перерізу композитного кріплення для широкого кола гірничотехнічних умов вугільних шахт, що розроблюють надглибокі горизонти.

Визначення раціональних параметрів кріпильної системи композитного кріплення здійснено за двома взаємопов'язаними напрямками:

– пошук зв'язку параметрів встановлення композитного кріплення (як базової складової кріпильної системи) з геомеханічними факторами H/R та перерізом композитного кріплення;

– виявлення найбільш ефективного перерізу штоку, а також раціональних схем встановлення анкерів з урахуванням параметрів композитного кріплення.

У результаті розроблено наступний алгоритм вибору раціональних параметрів композитного кріплення підготовчої виробки:

1. Визначається раціональний переріз композитного кріплення за формулою (4.1).

2. Виходячи з гірничотехнічних умов проведення виробки та оптимального перерізу композитного кріплення рекомендовано використання штоку перерізом, що наведено на рис. 4.2,-б, в; якщо у виробці в силу інших гірничотехнічних умов необхідно ставити кріплення з більшим перерізом, ніж раціональний, то рекомендовано використання штоку перерізом, що зображено на рис.4.2-г, д, є;

3. Крок встановлення L композитного кріплення розраховується за нормативними документами [209], [210] та за формулою:

$$L = \frac{N}{P}, \text{ м} \quad (4.2)$$

де N – опір однієї рами композитного кріплення, кН;

P – розрахункове навантаження на 1 м виробки, кН/м.

4. Крок встановлення анкерів дорівнює кроку встановлення L композитного кріплення, оскільки анкери розташовується посередині кожного міжрамного простору.

Вибрані таким чином параметри системи композитного кріплення дозволяють знизити її матеріаломісткість при збереженні необхідної стійкості гірничої виробки.

Попередні дослідження виявили дві основні тенденції зміни рівня напруженості гірського масиву та елементів кріпильної системи гірничих виробок:

– інтенсивність напружень σ у кріпильній системі зростає зі збільшенням відношення H/R , що тотожно збільшенню на неї навантаження з боку гірського масиву;

– інтенсивність напружень σ знижується зі збільшенням перерізу композитного кріплення, навантаження на елементи кріплення знижуються.

Обидві тенденції (рис. 4.4) мають нелінійний характер: градієнт зміни σ знижується у міру зростання параметрів H/R та перерізу композитного кріплення.

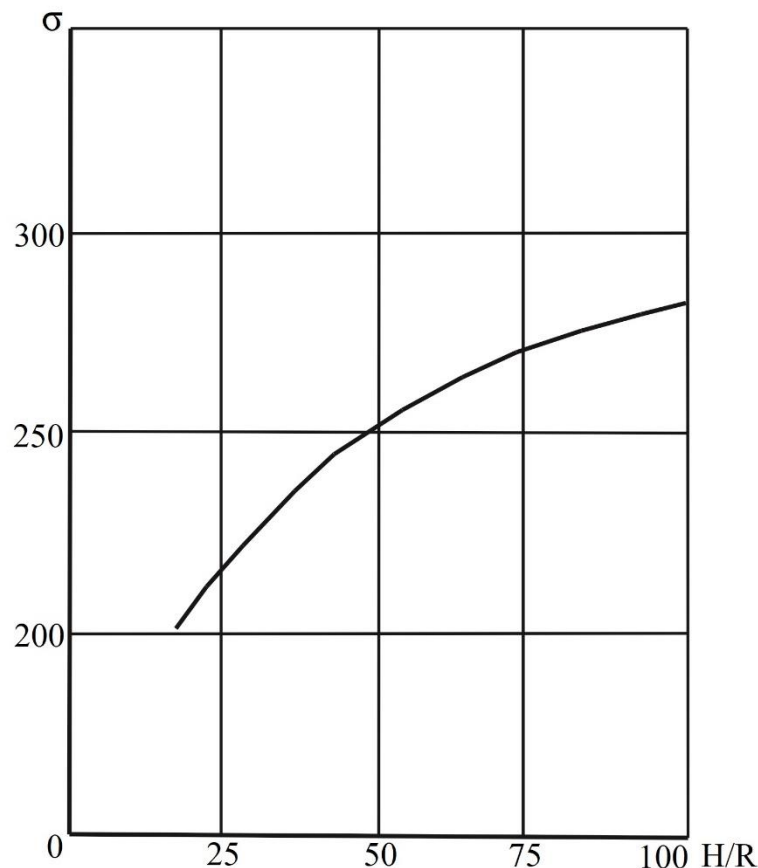


Рисунок 4.4 – Закономірність впливу параметрів H/R на інтенсивність напружень σ в елементах композитного кріплення

Ці тенденції увійшли в основу перебору варіантів параметрів системи композитного кріплення та вибору з них найбільш доцільних з точки зору виконання умов стійкості гірничої виробки за мінімальної матеріаломісткості засобів її кріплення на великих глибинах.

З іншого боку, згідно з існуючими теоріями гірського тиску в гірничих виробках [211] – [215], рівень напружень в елементах кріплення прямо пропорційний навантаженню, що діє на неї. Тому підсумувавши навантаження,

можна цілком обґрунтовано припустити, що її загальна величина Q має однакові закономірності зв'язку з параметрами H/R та перерізом композитного кріплення (рис. 4.5). Це є взаємозалежні та нерозривні складові єдиного геомеханічного процесу деформування масиву навколо гірничої виробки.

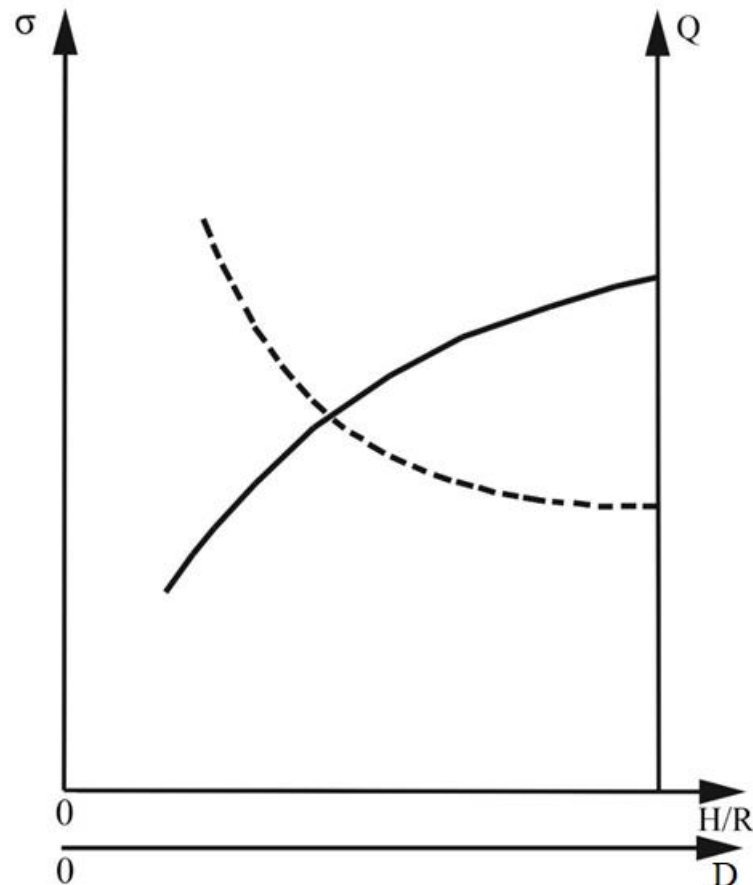


Рисунок 4.5 – Якісна закономірність впливу параметрів H/R (-) і D (- -) на формування навантаження Q та інтенсивність напружень σ в елементах композитного кріплення

Таким чином, комплекс багатоваріантних обчислювальних експериментів дозволив підтвердити отриманий науковий висновок, що сприяє досягненню максимальної несучої здатності кріпильної системи залежно від гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов підтримки підготовчої виробки на великих глибинах: навантаження на композитне кріплення підготовчої виробки, знаходиться в прямо пропорційній степеневій залежності від параметра H/R і обернено пропорційно перерізу композитного кріплення. Конкретизація

закономірностей зв'язку дозволила оцінити й обґрунтувати як степеневу залежність від параметра H/R , так і експоненційну від перерізу композитного кріплення.

4.5. Висновки за розділом

1. Розроблено алгоритм пошуку раціональних параметрів кріпильної системи, який за допомогою обчислювального експерименту дозволяє враховувати переріз кріплення, переріз штоку, кількість анкерів та їх розташування, що суттєво впливають на експлуатаційні характеристики кріплення.

2. Використовуючи розроблений алгоритм, проведено обчислювальний експеримент для дослідження НДС удосконаленої системи кріплення, що дозволило обґрунтувати раціональні параметри композитного кріплення.

3. Виконані дослідження дозволили розробити алгоритм вибору раціональних параметрів системи композитного кріплення в умовах ШУ «Покровське».

4. Встановлено дві основні тенденції зміни рівня напруженості гірського масиву та елементів кріпильної системи композитного кріплення:

- інтенсивність напружень σ у кріпильній системі композитного кріплення зростає зі збільшенням відношення H/R , що тотожно збільшенню на неї навантаження з боку гірського масиву;
- інтенсивність напружень σ знижується зі збільшенням перерізу композитного кріплення, навантаження на елементи кріплення знижуються.

5. За підсумками досліджень розроблено методикау визначення раціональних параметрів композитного кріплення, суть якої полягає в застосуванні розробленої здобувачем формули для визначення раціонального перерізу композитного кріплення, що дозволяє в подальшому вибирати раціональний переріз кріплення і штоку піддатливості та крок встановлення композитного кріплення. Запропоновану методикау рекомендується використовувати як додаток до чинних нормативних документів з підтримки гірничих виробок на великих глибинах.

ЗАКЛЮЧНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова задача, що полягає у встановленні закономірностей зміни напружено-деформованого стану гірського масиву при встановленні кріплення із композитних матеріалів. Встановлені закономірності лягли в основу розробки методики визначення раціональних параметрів композитного кріплення підготовчих виробок на глибинах понад 1000 метрів.

Основні наукові та практичні результати і висновки, отримані при виконанні роботи, полягають у наступному:

1. Виконано аналіз сучасних уявлень та ступеню вивченості питання про використання композитних матеріалів у різних галузях та передумови використання інноваційних матеріалів у елементах кріплення гірничих виробок, що дозволило розробити комплексний підхід до визначення раціональних параметрів кріплення підготовчих виробок композитним кріпленням.

2. Розроблено фізичні моделі кріплення із композитних матеріалів, що забезпечує зменшення трудомісткості з прискоренням часу технологічних робіт та безпеки праці шахтарів при полегшенні конструкції. Розроблено методику проведення обчислювального експерименту з вивчення поведінки гірського масиву та композитного кріплення, використання якої дозволило отримати найбільш достовірні результати розрахунку НДС породного масиву та композитного кріплення.

3. Обґрунтовано просторову геомеханічну модель навантаження гірського масиву та композитного кріплення в період проходження над виробкою очисного вибою. Проведено серію обчислювальних експериментів МСЕ в пружно-пластичній постановці. Проаналізовано характер та розміри зон опорного тиску, а також встановлено ступінь впливу очисних робіт на композитне кріплення. Встановлено, що найбільш інтенсивний вплив на систему кріплення відбувається при розташуванні очисного вибою безпосередньо над виробкою.

4. Встановлено закономірності поведінки геомеханічної системи та конструкцій елементів композитного кріплення при надпрацюванні виробки, у зоні

ведення очисних робіт, поза зоною ведення та при зміні глибини розташування. Виявлено залежність перерізу композитного кріплення від глибини Н розміщення виробки та середнього розрахункового опору на стискання гірського масиву. Запропоновано формулу для розрахунку перерізу композитного кріплення для великих глибин розробки.

5. Розроблено алгоритм пошуку раціональних параметрів системи композитного кріплення, який за допомогою обчислювального експерименту дозволяє враховувати переріз композитного кріплення, переріз штоку, кількість анкерів та їх розташування. Створено систему рекомендацій щодо визначення параметрів засобів кріплення, що забезпечують надійну підтримку підготовчих виробок в умовах надглибоких горизонтів.

6. Розроблено методику розрахунку параметрів композитного кріплення підготовчих виробок для підготовчих виробок на глибинах понад 1000 метрів, яка дозволяє розробити технічні рішення щодо забезпечення належних експлуатаційних параметрів виробок для шахт ШУ «Покровське».

7. Очікуваний річний економічний ефект трудомісткості при кріпленні виробок композитним кріпленням складе: 5 400 000 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Doleski, O. D., Kaiser, T., Metzger, M., Niessen, S., & Thiem, S. (2022). Decarbonization as a Strategic Issue. *In Digital Decarbonization: Achieving climate targets with a technology-neutral approach (pp. 1-19)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33330-0_1
2. Bandelow, N. C., Hornung, J., Schröder, I., & Vogeler, C. S. (2021). Decarbonization and climate change. *Review of Policy Research*, 38(6), 754-756.. <https://doi.org/10.1111/ropr.12445>
3. Hanna, R., & Victor, D. G. (2021). Marking the decarbonization revolutions. *Nature Energy*, 6(6), 568-571. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00854-1>
4. Alliance, P. P. C. (2020). Countries sign up to phase out coal power by 2030. URL: <https://www.abc.net.au/news/2017-11-17/20-countries-have-signed-up-to-phase-out-coal-power-by-2030/9161056>. [accessed: 19.03. 2020].
5. Обухова, Н. О., & Судніцина, В. М. (2017). Сучасні тенденції розвитку ринку вугілля. *Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності*, (15), 171-175. <https://doi.org/10.31498/2225-6407.15.2017.135184>
6. Козименко І.А. Державне регулювання розвитку вугільної промисловості в умовах структурних трансформацій економіки України. дис. ... докт. філософ.: 281 «Публічне управління та адміністрування» / Національна академія державного управління при Президентові України, Київ, 2021
7. Dubiński, J., Prusek, S., Turek, M., & Wachowicz, J. (2020). Hard Coal Production Competitiveness in Poland. *Journal of Mining Science*, (56), 322-330. <https://doi.org/10.1134/S1062739120026806>
8. World Energy Outlook 2020. (2020). Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
9. International Energy Agency. Coal information 2017. OECD: Paris, 2017. 500 p. <https://doi.org/10.1787/coal-2017-en>
10. Звіт генерального директора ПРИВАТНОГО АКЦІОНЕРНОГО ТОВАРИСТВА «ШАХТОУПРАВЛІННЯ «ПОКРОВСЬКЕ» за 2020 рік <http://pokrovskoe.com.ua/sites/default/files/files/news/%D0%9E%D1%82%D1%87%D>

[0%B5%D1%82%20%D0%93%D0%94%20%D0%A8%D0%A3%D0%9F%20%D0%B7%D0%B0%202020%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%20%D0%BD%D0%B0%20%D1%81%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B8%20%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf](#)

11. Jewell, J., Vinichenko, V., Nacke, L., & Cherp, A. (2019). Prospects for powering past coal. *Nature Climate Change*, 9(8), 592-597.. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0509-6>

12. H. Immink, R.T. Louw, & A.C. Brent. (2018) *Tracking decarbonisation in the mining sector. Journal of Energy in Southern Africa* Vol 29 No 1 <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i1a3437>

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

14. Cheema-Fox, A., LaPerla, B. R., Serafeim, G., Turkington, D., & Wang, H. (2021). Decarbonizing everything. *Financial Analysts Journal*, 77(3), 93-108.:1-16 <https://doi.org/10.1080/0015198X.2021.1909943>

15. Noussan, M., Hafner, M., Tagliapietra, S., Noussan, M., Hafner, M., & Tagliapietra, S. (2020). Decarbonization Solutions. *The Future of Transport Between Digitalization and Decarbonization: Trends, Strategies and Effects on Energy Consumption*, 29-50. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37966-7_2

16. Macarie, A. C., Balcu, I., Sfirloaga, P., Panaitescu, F. V., Panaitescu, M., & Lazaroiu, G. (2021, October). Analysis of innovative decarbonation technologies by methanation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1182, No. 1, p. 012038). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1182/1/012038>

17. Хорольський, А.О. (2020). Проектування технології кріплення виробок в складних гідрогеологічних умовах. *Геотехнічні проблеми розробки родовищ* 2020, 11-15.

18. Гріньов, В. Г., Хорольський А. О., & Виноградов Ю. О. (2019). *Технологічні аспекти спорудження виробок у складних гідрогеологічних умовах*. Геотехнічна механіка, 149, 132-141
19. Шашенко, О. М., & Чередник, В. А. (2020). Закономірності деформування конвеєрної виробки в гірничо-геологічних умовах ДП «ВК «Краснолиманська». *Вісті Донецького гірничого інституту*. 176-183
<https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-176-183>
20. Машурка С.В. Геомеханічне обґрунтування параметрів комбінованого кріплення і способу охорони виробок, що використовують повторно в складних гірничо-геологічних умовах: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09 / НТУ «Дніпровська політехніка» Україна. Дніпро, 2019. 235 с.
21. Дубовик О.І. (2020). Стан і перспективи розвитку вугільної промисловості України. Матеріали конференції «Перспективи розвитку будівельних технологій», 33-37
22. Череватський, Д. Ю., & Фокіна, І. В. (2016). Про взаємодію держави та бізнесу в процесі модернізації вугільної промисловості. Матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи інноваційного розвитку економіки».—Одеса, МНВУП «ЕМПАС-ЛТД» ТОВ.—Т. І, ч. І, 218-220.
23. Хорольський, А.О., Гріньов, В.Г., & Мамайкін, О.Р. (2019). Оптимізація стійкості функціонування підсистем очисного вибою. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, (23), 85–103.
<https://doi.org/10.30929/2074-1537.2019.1.85-103>
24. Гріньов, В.Г., Хорольський, А.О., & Мамайкін, О.Р. Декомпозиційний підхід при побудові систем генерації енергії у вуглепромислових регіонах. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2019. №44. С. 116-126.
<https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-116-126>
25. Li, S., Zhang, C., Lu, J., Chen, R., Chen, D., & Cui, G. (2021). A review of progress on high nitrogen austenitic stainless-steel research. *Materials Express*, 11(12), 1901-1925. <https://doi.org/10.1166/mex.2021.2109>

26. Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B., & Davaran, A. (2015). Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.06.005>
27. Jin, J., Liu, F. B., Chen, Y. B., & Gao, K. W. (2015). Surface carbon chemical states of ion implanted AISI 440C martensitic stainless steel. *Journal of iron and steel research international*, 22(6), 513-518. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30034-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30034-0)
28. Bondarenko, V. I., Kovalevska, I. A., Biletskyi, V. S., & Desna, N. A. (2022). Optimization principles implementation in the innovative technologies for re-used extraction workings maintenance. *Petroleum and Coal*, 64(2), 424 – 435
29. Li, Y. F., Chen, W., & Cheng, T. W. (2022). The Sustainable Composite Materials in Civil and Architectural Engineering. *Sustainability*, 14(4), 2134. <https://doi.org/10.3390/su14042134>
30. A.K. Adilova, S.S. Zhuzbayev, & S.E Akhmetzhanova. (2021). Composite material structure and problems of composite mechanics. *Conference Series physico-mathematical*. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-1726.92>
31. Arsalan Ahmad. (2021). Composite Materials, Types & Their Applications. Pakistan's Only Newspaper on Science & Technology
32. Шека І.В. (2022). Композити у гірничій промисловості. Минуле. Сьогодні. Майбутнє. VII МІЖНАРОДНИЙ МОЛОДІЖНИЙ КОНГРЕС. Сталый розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. 10-11 лютого 2022 р.: тези доп. – Львів, 2022. – С. 248
33. Мікосянчик О. О., Литвиненко В. А., Жосан О. Ю., Педан Є. В. Оцінка якості виробів з композиційних матеріалів за характеристиками міцності. Проблеми тертя та зношування. 2022. №. 4(97). С. 36-43.
34. Composite materials (n.d.). <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/introduction>

35. Босак А.О., & Мурза В.М. (2018). Світове виробництво сталі: тенденції, проблеми і роль України. *World still production: trends, problems and role of Ukraine*. Розділ 2, 10-15
36. Види і область застосування композитних матеріалів. (2016). <https://www.stroi-baza.ru/articles/one.php?id=5755>
37. Market Research Report // Fortune Business Insights. (2020). www.fortunebusinessinsights.com
38. Liu, J., Wei, X., Gao, L., Tao, J., Xu, L., Peng, G., & Zhou, J. (2023). An overview of C-SiC microwave absorption composites serving in harsh environments. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(4), 1237-1254. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.11.040>
39. Mujalli, M. A., Dirar, S., Mushtaha, E., Hussien, A., & Maksoud, A. (2022). Evaluation of the tensile characteristics and bond behaviour of steel fibre-reinforced concrete: Overview. *Fibers*, 10(12) <https://doi.org/10.3390/fib10120104>
40. Kordsa the reinforcer//A Review of the Global Composites Market and Turkish Composites Market. (n.d.). www.reinforcer.com
41. Umatex//Тренди і драйвери в композитах. (2020). www.umatex.com
42. Лазаренко, О.А., Вовченко, Л.Л., Овсієнко, І.В., & Мацуї, Л.Ю. (2018). *Полімерні композити нановуглець-метал: структура і електричні властивості*. Монографія. ТОВ «ТВОРИ».
43. Куцевич, К.Є., Дементьєва, Л.А., Лукіна, Н.Ф., & Тюменева, Т.Ю. (2018). Клеєві препреги – перспективні матеріали для деталей і агрегатів з ПКМ. *Авіаційні матеріали і технології*, 5, 379-387. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387>
44. Miaoxin, L., & Xiaoyu, Z. (2020). Overview of non-destructive testing of composite materials. *3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing, WCMEIM 2020*, 166-169. <https://doi.org/10.1109/WCMEIM52463.2020.00041>
45. Файнлейб, О. (2020). Термостійкі полімерні композиційні матеріали на основі гетероциклічних матриць. *Polymer Journal*, 2(42), 71-84.

46. Jun He, Meng Cao, Zhishu Wang, & Fanglin Cong. (2021). Low-speed impact damage analysis of aviation composite material structure. *E3S Web of Conferences* 260(2):03021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126003021>
47. Bolf, D., Hadjina, M., Zamarin, A., & Matulja, T. (2021). Methodology for composite materials shrinkage definition for use in shipbuilding and marine technology. *Pomorstvo*, 35(2), 267-274. <https://doi.org/10.31217/p.35.2.9>
48. Samoilescu, G., Bordianu, A., & Patroi, E. (2019). Use of composite materials in shipbuilding. Utility and necessity. *Scientific Bulletin" Mircea cel Batran" Naval Academy*, 22(1), 1-5.. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-19-I1-002>
49. Бондаренко, В., Салеев, І., Шека, І., & Цівка, Є. (2020). Обґрунтування використання композитних матеріалів для підвищення стійкості гірничих виробок. *Ukrainian School of Mining Engineering 2020*, 25–26. <https://doi.org/10.33271/usme14.025>
50. Лобода П. І. (2006). Механізм формування структури спрямовано закристиалізованих композитів LaB6 – MeivB2. *Металознавство та термічна обробка металів*. №1. С.19.
51. James E Roberts, Hon M Aci, & Hon M Asce. (2018). Composite materials for bridge constructions.
52. Niehaus, H., & Jerling, W. (2006). The Nelson Mandela bridge as an example of the use of composite materials in bridge construction in South Africa. *Composite Construction in Steel and Concrete V* (pp. 487-500).. [https://doi.org/10.1061/40826\(186\)46](https://doi.org/10.1061/40826(186)46)
53. Найдовший міст у Європі з'єднає Німеччину і Данію. https://daily.rbc.ua/ukr/show/samyu_dlinnyy_most_v_evrope_soedinit_germaniyu_i_daniyu_050920081
54. Соловійова Т. О. Вплив мікроструктури та напружено-деформованого стану на фізико-механічні властивості композитів систем LaB6-MeB2-Cu(Al): дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2018. 195 с.

55. Mesa, M. C., Oliete, P. B., Orera, V. M., Pastor, J. Y., Martín, A., & Llorca, J. (2011). Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃/Er₃Al₅O₁₂ eutectic rods grown by the laser-heated floating zone method. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(7), 1241-1250. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.05.004>
56. Ashbrook, R. L. (1977). Directionally solidified ceramic eutectics. *Journal of the American Ceramic Society*, 60(9-10), 428-435.
57. Pastor, J. Y., Poza, P., Llorca, J., Pena, J. I., Merino, R. I., & Orera, V. M. (2001). Mechanical properties of directionally solidified Al₂O₃-ZrO₂ (Y₂O₃) eutectics. *Materials Science and Engineering: A*, 308(1-2), 241-249. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)02040-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)02040-2)
58. Deng, H., Dickey, E. C., Paderno, Y., Paderno, V., Filippov, V., & Sayir, A. (2004). Crystallographic characterization and indentation mechanical properties of LaB₆-ZrB₂ directionally solidified eutectics. *Journal of materials science*, 39, 5987-5994. <https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000041695.40772.56>
59. Bansal, N. P., & Boccaccini, A. R. (Eds.). (2012). *Ceramics and composites processing methods*. John Wiley & Sons. 500 pp
60. Deng, H. (2006). Study of the interface behavior in directionally solidified LaB₆-ZrB₂ eutectics.: A Doctoral dissertation / The Pennsylvania State University, 2006. 194 p.
61. Chen, W. T., White, R. M., Goto, T., & Dickey, E. C. (2016). Directionally solidified boride and carbide eutectic ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(6), 1837-1851. <https://doi.org/10.1111/jace.14287>
62. Sazrhi, A., Bura, R. O., & Amperiawan, G. (2019). Mastery of Composite Materials to Support Indonesia's Defense Industry. In *2019 IEEE 6th Asian Conference on Defence Technology (ACDT)* (pp. 162-168). <https://doi.org/10.1109/ACDT47198.2019.9072849>
63. Loboda, P. I. (1999). Anisotropy of microhardness of directionally crystallized materials based on lanthanum hexaboride. *Materials Science*, 35(4), 552-560. <https://doi.org/10.1007/BF02365754>

64. Surappa, M. K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28, 319-334. <https://doi.org/10.1007/BF02717141>
65. Miloš, K., Jurić, I., & Škorput, P. (2011). Aluminium-based composite materials in construction of transport means. *PROMET-Traffic&Transportation*, 23(2), 87-96. <https://doi.org/10.7307/ptt.v23i2.135>
66. Tjong, S. C., & Tam, K. F. (2006). Mechanical and thermal expansion behavior of hipped aluminum–TiB₂ composites. *Materials Chemistry and physics*, 97(1), 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.07.075>
67. Биковський, О. Г., & Бриков, М. М. (2010). Сучасний стан і тенденції у розвитку зварювання композитних матеріалів з матрицею із кольорових металів (огляд). *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, (2), 104-111.
68. Amir, S. M. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., Ariffin, A. H., Mohd, S., Salleh, K. A. M., ... & Shah, A. U. M. (2019). Nondestructive testing method for Kevlar and natural fiber and their hybrid composites. In *Durability and life prediction in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites* (pp. 367-388). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102290-0.00016-7>
69. Minak, G. (Ed.). (2021). *Composite Materials in Design Processes*. MDPI. Books. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0153-6>
70. Xilin, W., Zhidong, J., & Liming, W. (2021). Composite Materials Used in Outdoor Insulation. *Polymer Composites for Electrical Engineering*, 191-206. <https://doi.org/10.1002/9781119719687.ch8>
71. Bondarenko Volodymyr, Kovalevska Iryna & Prokopenko Kostiantyn. (2018). *Research of the application of combined anchor systems for the maintenance of re-used mining workings*.
72. Fomychov, V., Pochevov, V., Fomychova, L., & Lapko, V. (2018). Rheology effect determination of the heterogeneous rock massif on the stress-strain state of the breakage face geomechanical system. *E3S Web of Conferences* (Vol. 60, p. 00015). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000015>

73. Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Барабаш М.В., Снігур В.Г., Гусєв О.С. (2017). *Комбіновані анкерні системи для повторного використання гірничих виробок*: монографія. – Дніпро: ТОВ «ЛізуновПрес», 2017. – 188 с.
74. Лапко, В. (2016). Зміна стану склепіння виробки дворівневою анкерною системою з урахуванням динаміки деформацій у породному масиві. *Ukrainian School of Mining Engineering 2016*, 103–104.
75. Медяник В.Ю. Підвищення стійкості підготовчих виробок при розробці пологих вугільних пластів на великих глибинах: Монографія. – Дніпропетровськ.: Національний гірничий університет, 2009. – 141 с.
76. Fomychov, V.V., Lapko, V.V., Pochepov, V.M. (2017). Stability analysis of two-level anchor support installed in the weakly metamorphosed rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), P. 14-19.
77. Кириченко, В.Я. (2013). Ресурсозберігаючі кріплення гірничих виробок для великих глибин розробки. *Розробка родовищ: Зб. наук. пр.* – 2013. – Т. 7. – С. 49-57.
78. Гайко, Г. І. (2019). *Будівельні матеріали і конструкції підземних споруд. Конструкції кріплення*. Навчальний посібник. КПІ ім Сікорського, Київ, 2019
79. Гайко, Г.І. (2006). *Конструкції кріплення підземних споруд*. Навчальний посібник. Алчевськ, 2006
80. Кириченко, В.Я., & Шишов, М.В. (2013). Напрямок створення ефективних з'єднувальних елементів для піддатливих кріплень гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 112
81. Кириченко В.Я. (2016). Концепція ресурсозберігаючого кріплення гірничих виробок для підвищення ефективності вуглевидобутку шахт. *Ukrainian School of Mining Engineering 2016*, 41-42
82. Бондаренко, В. І., Бузило, В. І., Табаченко, М. М., & Медяник, В. Ю. (2010). *Геомеханічні основи підвищення стійкості підготовчих виробок*:

Навчальний посібник. – Д.: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2010. – 408 с.

83. Bondarenko, V., Symanovych, H., Kovalevska, I., & Chervatiuk, V. (2018). Maintenance of reusable mine workings during the augering mining of coal seams. *E3S Web of Conferences* (Vol. 60, p. 0001). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000001>

84. Кириченко В.Я. (2009). Несуча здатність штрекових металокріплень зі спецпрофілю СВП. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. тр. - Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ*, 2009. — Вип. 83. — С. 55-65.

85. Кириченко, В.Я., & Усаченко Б.М. (2008). Штрекові металокріплення, що відповідають економічним вимогам та геомеханічним завданням великих глибин. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. тр. - Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ*, 2008. — Вип. 78. — С. 178-189

86. Bondarenko V., Kovalevska I., Sheka I., & Sachko R. (2023). Results of research on the stability of mine workings, fixed by arched supports made of composite materials, in the conditions of the Pokrovske Mine Administration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 1156, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012011>

87. Kovalevska, I.A., Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., Tsivka, Y.S., & Sheka, I.V. (2023). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. *In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. *Austrian Society for Geomechanics: Salzburg*. pp.1538-1543.

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

89. Fomychov, V., Fomychova, L., Khorolskyi, A., Mamaikin, O., & Pochepov, V. (2020). Determining optimal border parameters to design a reused mine working. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(24), 3039-3049
90. Rajwa, S., Lubosik, Z., & Płonka, M. (2019). Safety of longwall mining with caving in the light of data from monitoring systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 679 (1) <https://doi.org/10.1088/1757-899X/679/1/012021>
91. Шашенко, А. Н., Прокудин, А. З., & Смірнов, А. В. (2017). Геомеханічні аспекти вибору параметрів комбінованих кріплень капітальних виробок. *Вугілля України*, (4), 11-15.
92. Баришніков, А. С. (2016). Закономірності деформування системи «кріплення-масив» у слабких породах у зоні впливу очисних робіт. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.01 / НГУ. Дніпропетровськ, 2016
93. Кириченко В.Я. Наукові основи підвищення стійкості виробок високоресурсним кріпленням в геодинамічних зонах очисної виїмки.: дис. ... докт. техн. наук: 05.15.02 / НГУ. Дніпропетровськ, 2012.
94. Пономаренко, П. І. (1991). Геомеханічні основи управління станом породного масиву та стійкістю гірничих виробок марганцеворудних шахт України (Докт. Техн. наук). Дніпропетровськ, ДГІ.
95. Штепа, А. В., Усаченко, Б. М., Вигодін, М. А., Глухов, Н. Д., Євтушенко, В. В., Дубровін, В. В., & Сидоров, Б. Г. (1987). Спосіб зведення анкерного кріплення.
96. Шека, І. В., & Цівка, Є. С. (2021). Обґрунтування вуглепластику як інноваційного матеріалу для кріплення гірничих виробок вугільних шахт. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 64, 112–121. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.122>
97. Шека, І.В., Салєєв, І.А., Шишов, М.В., Малова, О.К., Почепов, В.М., & Мамайкін, О.Р. (2023). Аналіз використання композитних матеріалів для подальшого застосування у кріпленнях гірничих виробок. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 72, 30–42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.062>

98. Ларін А. О. (2023). Історія розвитку обчислювальної техніки : учб. посібник для студентів НТУ «ХП». Харківський політехнічний ін-т, нац. техн. ун-т. – Харків : НТУ «ХП», 2023. – 130 с.
99. Воропаєва, В. Я., Локтіонов, І. К., Мироненко, Л. П. & Турупалов, В. В. (2013). Чисельні методи комп'ютерного аналізу: навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.: рек. МОНУ / за ред. В. В. Турупалова. – Львів: Магнолія 2006, 2013. – 224 с
100. Колесницький, О. К., Арсенюк, І. Р., & Месюра, В. І. (2017) Чисельні методи : навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 130 с
101. Задачин, В. М., & Конюшенко, І. Г. (2014). Чисельні методи : навчальний посібник. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 180 с.
102. Вислоух, С. П., Волошко, О. В., Тимчик, Г. С., & Філіппова, М. В. (2021). Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи: підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 228 с
103. Семеріков С. О. (2000). Чисельні методи: об'єктний підхід. *Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання : збірник наукових праць. – Випуск 2.* – К. : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2000. – С. 122-128.
104. Карвацький А. Я. (2018). Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Київ : НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», 2018. 392 с.
105. Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). The finite element method: solid mechanics (Vol. 2). *Butterworth-heinemann.*
106. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). The finite element method: its basis and fundamentals. *Elsevier.*
107. Zienkiewicz, O. C., Morgan, K., & Morgan, K. (2006). Finite elements and approximation. *Courier Corporation.*
108. Бондаренко, В. І., Почепов, В. М., Фомичова, Л. Я., & Фомичов, В. В. (2009). Особливості впливу умов контакту елементів геомеханічної моделі «шаруватий масив-кріплення виробки» на результати обчислювального експерименту. *НАДБАННЯ НАУКОВИХ ШКІЛ Науково-технічний збірник, 37-41*

109. Троханяк, В. І., & Богдан, Ю. О. (2015). Застосування методу кінцевих елементів при побудові сітки в ANSYS Meshing для CFD моделей. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 2(30), 181-189.
110. Куліченко, А. Я., & Мілянйч, А. Р. (2012). Дослідження пружнопластичного руйнування методом кінцевих елементів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 22(4), 347-356.
111. Walaszczyk, J., Drzewiecki, J., & Mutke, G. (2002). Model niszczenia skał stropowych górotworu będącego źródłem intensywnych zjawisk dynamicznych. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. – 99 p.
112. Cao, C., Nemcik, J., & Aziz, N. (2010). Advanced numerical modelling methods of rock bolt performance in underground mines. *10th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*. – 2010. – P. 326 – 329.
113. Aziz, N., Jalalifar, H., Remennikov, A. M., Sinclair, S., & Green, A. (2008). Optimisation of the bolt profile configuration for load transfer enhancement. *Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*. – 2008. – P. 125 – 131.
114. Aziz, N. I., & Jalalifar, H. (2005). Experimental and numerical methodology assessment of load transfer capacity of bolts. *24th International Conference on Ground Control in Mining, August, 2-4, Morgantown, WV, USA*. – 2005. – P. 285 – 293.
115. Aziz, N., & Jalalifar, H. (2007). The role of profile configuration on load transfer mechanism of bolt for effective support. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 55. P. 539 – 545.
116. Iordanov, I., Buleha, I., Bachurina, Y., Boichenko, H., Dovgal, V., Kayun, O., ... & Podkopayev, Y. (2021). Experimental research on the haulage drifts stability in steeply dipping seams. *Mining of Mineral Deposits*, 15, 56–67. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.056>
117. Babets, D., Sdvyzhkova, O., Shashenko, O., Kravchenko, K., & Cabana, E. C. (2019). Implementation of probabilistic approach to rock mass strength estimation

while excavating through fault zones. *Mining of Mineral Deposits*, 15(2), 25-34.
<https://doi.org/10.33271/mining15.02.025>

118. Babets, D.V., Sdvyzhkova, O.O., Larionov, M.H., & Tereshchuk, R.M. (2017). Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 58-64.

119. Sdvyzhkova, O., Babets, D., Kravchenko, K., & Smirnov, A. V. (2015). Rock state assessment at initial stage of longwall mining in terms of poor rocks of Western Donbass. *New Developments in Mining Engineering: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 65-70.

120. Круковський, О.П. (2007) Вплив опорної шайби на напружено деформований стан приконтурного масиву навколо одиночного анкера. *Геотехнічна механіка*, №68. – С. 123 – 128.

121. Слащов, І. М. (2012). Шахтні дослідження стійкості систем підтримки штреків за умов легкообрушуваних порід Західного Донбасу. *Геотехнічна механіка*, № 97. – С. 177 – 185.

122. Булат, А. Ф., & Слащов, І. М. (2012). Розробка комп'ютерних систем математичного моделювання геомеханічних процесів. *Геотехнічна механіка*, № 99. – С. 16 – 27.

123. Виноградов, В.В. & Круковський, О.П. (2011). Пороодо-анкерні елементи конструкцій силового опорно-анкерного кріплення. *Геотехнічна механіка*. №93. – С. 3 – 18.

124. Sdvyzhkova, O., Gapeiev, S., & Tykhonenko, V. (2015). Stochastic model of rock mass strength in terms of random distance between joints. *New Developments in Mining Engineering*, 299, 303.

125. Shashenko, O., Shapoval, V., Khalymendyk, O., Andrieiev, V., Arbuzov, M., Hubar, O., & Markul, R. (2019). Features of the nonlinear calculation of the stress-strain state of the “Rock massif-excavation support” system taking into account destruction. *Transport Means*, 1356-1363.

126. Шашенко, О. М., Хозяїкіна, Н. В., Дубовик, О. І., & Сосна, Д. О. (2017). Методика чисельної імітації процесу спучення порід підосви в магістральних

виробках. *Вісті Донецького гірничого інституту*, (2), 33-42.

<https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-2-33-42>

127. Шашенко, О. М., Сдвижкова, О. О., & Нечитайло, А. Є. (2015). Розрахунок граничної несучої здатності та конструктивних параметрів посиленого кріплення на прикладі перетину «Богданівського скиду». *Форум гірників–2015, матеріали міжнарод. конф.*, С. 96–104.

128. Shashenko, A.N., Storchak, G.G., Logunova, A.O. & Korol, A.Yu. (2014). Estimation of geomechanical parameters of the “pair workings-pillar-working face” system. *Scientific Bulletin of National mining university.*– Dnipropetrovs’k: NMU, 2014.– №2.– P. 58-63.

129. Власов, С. Ф., & Власов, В. С. (2015). Дослідження механізму обвалення порід покрівлі на об’ємній моделі шаруватого трансверсально-ізотропного масиву при переміщенні очисного вибою. *Розробка родовищ*, 9(3), 367-374. <https://doi.org/10.15407/mining09.03.367>

130. Sotskov, V. O., Podvyhina, O. O., Dereviachina, N. I., & Malashkevych, D. S. (2018). Substantiating the criteria for applying selective excavation of coal deposits in the Western Donbass. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 26(1), 158-164. <https://doi.org/10.15421/111817>

131. Власов, С.Ф., & Сидельников, О.А. (2012). *Просторове моделювання геомеханічних процесів під час підземної розробки родовищ*: монографія: Національний гірничий університет, 2012. – 223 с.

132. Vlasov, S., & Sidelnikov, A. (2010). Results of the 3-D simulation of the transversely isotopic rock mass stress state around a longwall. *New techniques and technologies in mining*, 145-150.

133. Malashkevych, D., Sotskov, V., Medyanyk, V., & Prykhodchenko, D. (2018). Integrated evaluation of the worked-out area partial backfill effect of stress-strain state of coal-bearing rock mass. *Solid State Phenomena*, 277, 213-220. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.213>

134. Фомичов, В. В., Медяник, В. Ю., Скитенко, А. І., & Снігур, М. В. (2012). Перспективи застосування та конструктивні особливості гумово-повітряного

армованого кріплення. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (2), 40-43.

135. Лапко, В. В., Мамайкін, О. Р., & Фомичов, В. В. (2011). Математичні методи моделювання взаємодії кріплення та гірського масиву при вирішенні задач геомеханіки. *Геотехнічна механіка*, 94, 16-25.

136. Фомичов В.В. (2007). Особливості застосування методу скінченних елементів у геомеханіці. *Науковий вісник НГУ.* – 2007. – № 10. – С. 56 – 61.

137. Фомичов, В.В. Обґрунтування параметрів управління шаруватим масивом навколо виїмкових виробок: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.02 / В.В. Фомичов. – Д., 2008. – 18 с.

138. Фомичов, В. В., Зубер Р. В, & Сівак Г. П. (2010). Особливості обчислювального моделювання взаємодії анкера і порід гірського масиву. *Науковий вісник НГУ.*–Дніпропетровськ, (6), 21-25.

139. Bondarenko, V., Hardygora, M., Symanovych, H., Sotskov, V., & Snihur, V. (2016). Numerical methods of geomechanics tasks solution during coal deposits' development. *Mining of Mineral Deposits*, 10(3), 1-12. <https://doi.org/10.15407/mining10.03.001>

140. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., & Фомичов, В.В. (2016). Особливості проведення обчислювального експерименту методом скінченних елементів з розрахунку багатопараметричної системи «гірський масив – комбіноване кріплення». *Вісті Академії інженерних наук України*. 43, 39-47

141. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Barabash, M., & Vivcharenko, O. (2018). Geomechanics of mine workings support systems. Dnipro: LizunovPress.

142. Bondarenko V, Kovalevska I, Symanovych H, Barabash M, Chervatiuk V, Husiev O, & Snihur V. (2020). Combined roof-bolting systems of mine workings. London: CRC Press 2020, Taylor & Francis Group, 281 p. <https://doi.org/10.1201/9781003081432>

143. Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Мартовицький А.В., & Копилов О.П. (2010). *Методи розрахунку переміщень і зміцнень*

приконтурних порід гірничих виробок шахт Західного Донбасу. Монографія. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2010. – 330 с

144. Bondarenko, V., Kovalevs'ka, I., & Fomychov, V. (2012). Features of carrying out experiment using finite-element method at multivariate calculation of mine massif – combined support system. *Geomechanical Processes During Underground Mining – Proceedings of the School of Underground Mining*, 7-13. <https://doi.org/10.1201/b13157-3>

145. Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Вівчаренко О.В., Малихін О.В., & О.С. Гусєв. (2014). *Геомеханіка навантаження і розрахунок параметрів кріпильної й охоронної систем підготовчих виробок шахт Західного Донбасу*: монографія. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2014. – 228 с.

146. Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.В., & Кораб М.Г. (2020). Адитивні технології полімерних матеріалів (Огляд). «Автоматичне зварювання», № 5, с. 53-60. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>

147. Гречко О.М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Харків : НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 63–75.

148. N. Shahrubudina, T.C. Lee, & R. Ramlana. (2019). *An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications*. 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing (SMPM 2019) <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>

149. S. K. Parupelli, & S. Desai. (2019). *A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential*. American Journal of Applied Sciences, 16 (8): 244.272 <https://doi.org/10.3844/ajassp.2019.244.272>

150. Sheka, I.V. (2022). Analysis of the features of 3D-printing technology for its use in the creation of new types of fastening of mining workings. V international scientific and technical conference “Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resourcesat: Petroșani, Romania, November 11, 2022, 174-176

151. Borut Pečar, Danilo Vrtačnik, Matic Pavlin, & Matej Možek. (2021). *A Rapid Prototyped Thermal Mass Flowmeter*. *Sensors* 21(16):5373. <https://doi.org/10.3390/s21165373>
152. Slawomir Blasiak, Pawel Andrzej Laski, & Jakub Emanuel Takosoglu. (2021). *Rapid Prototyping of Pneumatic Directional Control Valves*. *Polymers* 13(9). <https://doi.org/10.3390/polym13091458>
153. Krishankumar S. Lahoti, Snehal V. Kharwade, & Jaykumar R. Gade. (2020). *Rapid Prototyping: A Modernistic Era in Prosthodontics*. *International Journal of Science and Research (IJSR)* 9(9):120-124. <https://doi.org/10.21275/SR20831195638>
154. P. Sivasankaran, & B. Radjaram. (2020). Recent Applications of 3d Printing and Its Challenges - A Review. *International Journal of Engineering and Technical Research* V9(06) <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS060240>
155. Haocheng Du, & Shaoqian Chen. (2020). Development and Application of 3D Printing and Its Materials. *Insight - Material Science* 3(2):28. <https://doi.org/10.18282/ims.v3i2.331>
156. Mayur Mask, & Anirudha desai (2020). A review of applications of 3D printing in construction industry. *International E-Conference on Novel Innovations and Sustainable Development in Civil Engineering 2020* Volume: 01.
157. Márton Tamás Birosza, Kristóf Ferenczyb, & Mátyás Andóc. (2021). Application of 3D printing in casting. *Engineering and IT solutions*. <https://doi.org/10.37775/EIS.2021.2>
158. Jagadiswaran, B., Alagarasan, V., Palanivelu, P., Theagarajan, R., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2022). Erratum to “Valorization of food industry waste and by-products using 3D printing: A study on the development of value-added functional cookies” *Foods*, 6 <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100167>
159. Зозуля, П.Ф., Поліщук, О.С., & Поліщук, А.О. (2017). Перспективи застосування технології 3D-друку в легкій промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. - 2017. - № 4. - С. 102-104.

160. Said, F., Eldwib, D., Zaytoun, M., Abd Elsalam, A., Bakhom, M., Elshehemy, O., & Abou-Zeid, M. (2023). *3D printing concrete incorporating environmentally friendly materials*. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1004-3_52

161. Fairbairn, E. M. R., Santos, L. D. F., Farias, M. B., & Reales, O. A. M. (2023). *Numerical modeling of new conceptions of 3D printed concrete structures for pumped storage hydropower*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07746-3_12

162. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ 3D ДРУКУ. <https://kupibo.com.ua/praktychne-zastosuvannya-3d-druku/>

163. He, G., Hu, B., Gao, D., & Chen, L. (2022). Treatment of schatzker type V and VI tibial plateau fractures with 3D printing preoperative planning combined with double reverse traction device. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 26(36), 5764-5769. <https://doi.org/10.12307/2022.796>

164. Бондаренко, В. Г., & Григорюк, Д. К. (2020). 3D-друк в медицині. Матеріали XX Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів та студентів, Одеса, 21-22 квіт. 2020 р.

165. В Амстердамі відкрили перший у світі сталевий міст, надрукований на 3D-принтері. <https://news.liga.net/ua/world/news/v-amsterdame-otkryli-pervyy-v-mire-stalnoy-most-napechatanny-na-3d-printere-video-foto>

166. Хорольський, А.О., & Гриньов В.Г. (2020). Розробка нового підходу для вибору способу кріплення виробленого простору. *Гінична механіка та машинобудування*, 3, 27-36

167. Бондаренко, В.І., Шека, І.В., Цівка, Є.С., & Ковалевська, І.А. (2021). Арочне піддатливе кріплення. *Патент на корисну модель №148329*, Україна, МПК E21D 11/14 (2006.01), №u2020 08107; Опубл. 28.07.2021; Бюл. №30

168. Цівка, Є.С., Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., & Шека, І.В. (2021). Арочне кріплення. *Патент на корисну модель №148395*, Україна, МПК E21D 11/14 (2006.01), №u2020 08272; Опубл. 04.08.2021; Бюл. №31

169. Гапєєв С.М. Моделювання і прогноз геомеханічних процесів у виробках глибоких шахт.: дис. ... докт. техн. наук: 05.15.09 / НГУ. Дніпропетровськ, 2014.

170. Цівка Є.С. (2021). Вирішення складних задач геомеханіки за допомогою методу обчислювального експерименту. *IX всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації 2021»*, 487 – 488

171. Шека І.В. (2021). До питання вибору програмного продукту при моделюванні геомеханічних процесів. *Інформаційні технології: теорія і практика. IV Всеукраїнська інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених*, 91 – 93.

172. Мальцев Д.В. Обґрунтування параметрів буропідричних робіт при руйнуванні масиву урановмісних руд.: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / НГУ. Дніпропетровськ, 2013.

173. Соцков В.О. Обґрунтування параметрів розташування та кріплення виробок, що надпрацюються, при веденні очисних робіт на шахтах Західного Донбасу.: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / НГУ. Дніпропетровськ, 2015.

174. Фомичов В.В. Наукові основи управління геомеханічними системами із застосуванням рекурсивних методів при підземній розробці родовищ.: дис. ... докт. техн. наук: 05.15.02 / НГУ. Дніпропетровськ, 2015.

175. Шека І.В. (2022). Методика проведення обчислювального експерименту з обґрунтування взаємодії композитного кріплення з гірським масивом. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія»*. 16-20, 26 травня 2022 р.: тези доп. – Житомир, 2022. – С. 200

176. Фомичов, В. В. (2012). Передумови побудови розрахункових моделей рамно-анкерного кріплення з урахуванням нелінійних характеристик поведінки фізичних середовищ. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (4), 54-59.

177. Загорулько А.В. Програмний комплекс ANSYS в інженерних задачах: Навчальний посібник. Суми: Видавництво СумДУ, 2008. 201 с.

178. Крючков, А. І., & Бахтин, А. І. (2018). Закономірність зміни модулю зсуву в залежності від температури та пустотності гірських порід. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, (1), 18-28.

179. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1982. – 272 с.

180. Бондаренко, В.І., Чередниченко, Ю.Я., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., Вівчаренко, О.В., & Фомичов, В.В. (2010). *Геомеханіка взаємодії анкерного та рамного кріплення гірничих виробок в єдиній вантажонесучій системі*. Монографія. Дніпропетровськ: «ЛізуновПрес», 2010 – 174 с.

181. Iredia Erhunmwun, & Usiosefe Ikronmwosa. (2017). Review on finite element method. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 21(5):999 <https://doi.org/10.4314/jasem.v21i5.30>

182. Морозов, Є.М., Каплун, А.Б., & Олферьева, М.А. (2009). ANSYS в руках інженера: практичний посібник. - М.: ЛІБРОКОМ, 2009. - 272 с.

183. Bazaluk, O., Rysbekov, K., Nurpeisova, M., Lozynskyi, V., Kyrgyzbayeva, G., & Turumbetov, T. (2022). Integrated monitoring for the rock mass state during large-scale subsoil development. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 329. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.852591>

184. Vadym, S., Oleksandr, M., Victor, L., & Natalia, D. (2020). Analysis of the effect of a supporting structure as well as floor rocks moisture on the state of a development mine working. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(4), 454-459.

185. Rysbekov, K., Bitimbayev, M., Akhmetkanov, D., Yelemessov, K., Barmenshinova, M., Toktarov, A., & Baskanbayeva, D. (2022). Substantiation of mining systems for steeply dipping low-thickness ore bodies with controlled continuous stope extraction. *Mining of Mineral Deposits*, 16(2), 64-72. <https://doi.org/10.33271/mining16.02.064>

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

187. Begalinov, A., Almenov, T., Zhanakova, R., & Bektur, B. (2020). Analysis of the stress deformed state of rocks around the haulage roadway of the Beskempir field (Kazakhstan). *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), 28-36. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.028>
188. Nurpeissova, M., Rysbekov, K., Kenesbayeva, A., Bekbassarov, Z., & Levin, E. (2021). Simulation of geodynamic processes. *Engineering Journal of Satbayev University*, 143(4), 16-24. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i4.03>
189. Kovalevska, I., Samusia, V., Kolosov, D., Snihur, V., & Pysmenkova, T. (2020). Stability of the overworked slightly metamorphosed massif around mine working. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 43-52. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.043>
190. Барановський Е.М., & Мойсишин В.М. (2005). Енергетичні теорії міцності та їх використання в механіці гірських порід. *Науковий вісник ІФНТУНГ.* – Івано-Франківськ. – № 2(11). – С.26-32.
191. Бондаренко, В.І., Ільяшов, М.О., Руденко, & М.К. (2012). Теорія управління станом масиву гірських порід: підручник. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. – 320 с.
192. Фомичов, В. В., Соцков, В. О., & Назаров, І. В. (2019). Аналіз зміни розподілу напружень у породному масиві, що включає сполучення виїмкової та очисної виробок при варіюванні геометричних параметрів закладки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (58), 131-143. <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.131>
193. Fomychov, V., Mamaikin, O., Demchenko, Y., Prykhorchuk, O., & Jarosz, J. (2018). Analysis of the efficiency of geomechanical model of mine working based on computational and field studies. *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 46-55. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.046>
194. Фомичов, В. В., Соцков, В. О., & Гусев, О. С. (2014). Визначення зміни несучих характеристик елементів кріплення штреку при його надпрацюванні в умовах дрібношарового породного масиву. *Розробка родовищ: щорічн. наук.-техн. зб.* – Д.: ЛізуновПрес, 2014. – С. 399 – 407.

195. Шека, І.В. (2023). Результати дослідження впливу надпрацювання на гірничі виробки, що закріплені композитним кріпленням. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 25, 67-79. <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.006>

196. Шека І.В. (2023). Дослідження впливу очисних робіт на гірничі виробки, що закріплені композитним кріпленням. *XI всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації 2023»*, 167-168. 22-24 листопада 2023 р., Дніпро, Україна

197. Бондаренко, В., & Шека, І. (2023). Дослідження впливу різних гірничо-геологічних умов на дренажний штрек, що закріплений композитним кріпленням. *Ukrainian School of Mining Engineering 2023*, 59–60. <https://doi.org/10.33271/usme16.059>

198. Kovalevska, I.A., Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., Tsivka, Y.S., & Sheka, I.V. (2023). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. *In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. Austrian Society for Geomechanics: Salzburg. pp.1538-1543.

199. Wang, Y., Zhang, N., Wu, W., Cao, J., Guo, Y., & Duan, D. (2022). Damage data analysis of deep coal roadway roof and application of long anchorage and zone linkage support technology. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13) <https://doi.org/10.3390/su14138092>

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

201. Bondarenko, V., Symanovych, H., Barabash, M., Husiev, O., & Salieiev, I. (2020). Determining patterns of the geomechanical factors influence on the fastening system loading in the preparatory mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 44-50. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.044>

202. Snihur, V., Bondarenko, V., Shaikhislamova, I., Kovalevska, I., & Husiev, O. (2022). Optimization solution substantiation for resource-saving maintenance of workings. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 9-18. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.009>
203. Podkopaiev, S., Gogo, V., Yefremov, I., Kipko, O., Iordanov, I., & Simonova, Y. (2019). Phenomena of stability of the coal seam roof with a yielding support. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 28-41. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.028>
204. Ляшок, Я.О., Подкопаєв, С.В., Бачурін, Л.Л., Бойченко, Г.Е., Ткачук, О.М. (2022). Вплив деформаційних властивостей охоронних споруд підготовчих виробок на їх стійкість за довжиною виїмкової ділянки. *Вісті Донецького гірничого інституту*, №1 (50), 84-95. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2018-1-84-95>
205. Павлов, Є.Є., Фесенко, Е.В., Новак, А.І. (2021). Підвищення стійкості гірничих виробок шляхом перерозподілу навантаження на рамне кріплення. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 65, 28-37. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.028>
206. Павлов, Є.Є., Фесенко, Е.В., Новак, А.І. (2021). Вплив величини пустот закріпного простору аркового кріплення на стійкість гірничих виробок. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 65, 38-49. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.038>
207. Вівчаренко О.В. Обґрунтування параметрів підвищення стійкості виїмкових виробок із застосуванням податливої рамно-анкерної системи: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / НГУ. Дніпропетровськ, 2012.
208. Левчук, О., Новицька, Л., & Дзись, В. (2016). Кореляційно–регресійний аналіз в Mathcad. Довідник, 167 с.
209. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. Київ: Мінвуглепром України, 2007, 113 с
210. КД 12.01.01.201-98 Розташування, охорона та підтримка гірничих виробок при відпрацюванні вугільних пластів на шахтах. Методичні вказівки. Мінвуглепром України. – Донецьк, 1998. – 149 с.

211. Zhang, J., Gao, S., Yang, T., He, Y., Wu, J., & Wu, H. (2023). Study of the failure mechanism of soft rock mining roadways based on limit analysis theory. *Applied Sciences*, 13(18), 10323. <https://doi.org/10.3390/app131810323>
212. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Symanovych, H.A., Sachko, R.M., & Sheka, I.V. (2023). Integrated research into the stress-strain state anomalies, formed and developed in the mass under conditions of high advance velocities of stope faces. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 1254, 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012062>
213. Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*, 15 (2), 111-123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
214. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., & Husiev, O. (2022). Changes in the Rock Mass Geomechanical Properties with Account of the Chaos Theory Based on a Computational Experiment. In *Chaotic Modeling and Simulation International Conference* (pp. 41-52). https://doi.org/10.1007/978-3-031-27082-6_4
215. Bondarenko, V., Symanovych, H., Kicki, J., Barabash, M., & Salieiev, I. (2019). The influence of rigidity of the collapsed roof rocks in the mined-out space on the state of the preparatory mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 13(2), 27-39 <https://doi.org/10.33271/mining13.02.027>

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

ПОГОДЖЕНО:

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


_____ **І.С. Нікітенко**
« 07 » _____ 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер ПРАТ «ШУ
«Покровське»


_____ **Р.М. Сачко**
« 09 » _____ 2024 р.

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ
ПАРАМЕТРІВ КОМПОЗИТНОГО КРІПЛЕННЯ
ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК НА ГЛИБИНАХ ПОНАД 1000
МЕТРІВ**

Дніпро
2024

«Методика визначення раціональних параметрів композитного кріплення підготовчих виробок на глибинах понад 1000 метрів» розроблена співробітниками НТУ «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2024. – 10 с.

Укладачі:

Бондаренко В.І. – д-р техн. наук, завідувач кафедри гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка».

Шека І.В. – аспірант, асистент кафедри гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка».

Методика може бути використана науковими співробітниками проектних та науково-дослідних інститутів гірничодобувної галузі, інженерно-технічними співробітниками виробничих об'єднань, а також студентами гірничих ЗВО та факультетів.

Друкується за авторською редакцією.

© Бондаренко В.І.

© Шека І.В.

ЗМІСТ

1	Загальні положення	4
2	Основні вихідні дані та розрахункові положення	5
3	Обґрунтування раціональних параметрів композитного кріплення для гірничих виробок вугільних шахт, що розташовані на глибинах понад 1000 метрів	7
	Перелік посилань	10

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер ПРАТ «ШУ
«Покровське»

_____ **Р.М. Сачко**

«_____» _____ 2024 р.

РОЗРАХУНОК

**очікуваного економічного ефекту від використання
композитного кріплення на глибинах понад 1000 метрів за 2025
рік**

Дніпро
2024

ЗМІСТ

1	Загальні положення	3
2	База для порівняння	3
3	Фактори, що визначають економічну доцільність	3
4	Виконання розрахунку	4

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Композитне кріплення планується використовувати при кріпленні виїмкових виробок будь-якою площею поперечного перерізу на глибинах понад 1000 метрів в умовах ШУ «Покровське». Крок встановлення кріплення – 0,5 м. Паспортом проведення та кріплення виробок передбачено анкерне зміцнення порід покрівлі (6 анкерів по 2,4 м та 2 по 7,0 м). Таким чином, у поперечному перерізі виробки встановлюється між рамами по 9 анкерів. Безпосередня покрівля виробки представлена алевролітом потужністю до 4,5 м. Безпосередня підошва виробки представлена пісковиком потужністю до 15,5 м та алевролітом до 2,7 м.

2 БАЗА ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ

При розрахунку економічного ефекту порівнюється два варіанти кріплення підготовчої виробки в умовах ШУ «Покровське».

Перший варіант (базовий) – кріплення виробки за затвердженим на шахті паспортом: рамне кріплення зі спецпрофілю СВП-33 у поєднанні з опорно-анкерним кріпленням (9 анкерів у поперечному перерізі), затягування боків та покрівлі виробок – металева сітка, крок встановлення рам та анкерів – 0,5 м. Додатково застосовувалися рудничні стояки та металеві підхвати. Працюють 8 чол/зміна, при оплаті праці 50000 грн для одного гірника.

Другий варіант (запропонований) – композитне кріплення виробок на експериментальних ділянках. Запропоноване кріплення включає використання 9 анкерів у покрівлі виробки. У другому варіанті кріплення виробок забезпечується зменшення трудомісткості з прискоренням часу технологічних робіт та безпеки праці гірників при полегшенні конструкції. Планується робота 5 чол/зміна, при оплаті праці 50000 грн для одного гірника.

3 ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЕКОНОМІЧНУ ДОЦІЛЬНІСТЬ

Дослідженнями встановлено, що в умовах ШУ «Покровське» при розробці вугільних пластів на глибинах понад 1000 метрів суттєво збільшується гірський тиск, що потребує зміни спецпрофілю СВП, змінюється і його питома вага, за

рахунок чого збільшується трудомісткість робіт, що виконуються, темпи проведення виробок зменшуються, а також величина конструктивної піддатливості стає невеликою, що обумовлюється незадовільним станом гірничих виробок. Суттєво зростає і питома металоємність спецпрофілей СВП, яка становить на даний період часу 1000 – 1200 кг/пог.м. Також, щорічно, середня довжина ремонтів виробок сягає 43 – 57%, а таких, що повністю перекріплюються – 12 – 25% від обсягу підтримуваних.

Виявлені недоліки усуваються шляхом зміни матеріалу кріплення з металевого на композитний, який легше у 5 разів. Потребується менше кріпильників для закріплення підготовчих виробок, за рахунок цього економляться кошти на оплаті праці. При цьому рама відносно рівномірно навантажена по всьому контуру, приблизно, на 70% від несучої здатності.

4 ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ

Вихідні дані для розрахунку економічного ефекту наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Очікуваний роковий економічний ефект

Найменування показників	Варіант 1	Варіант 2
1	2	3
Кількість гірників/доб, чол	24	15
Оплата праці 1 гірника, грн/міс	50000	50000
Фонд оплати праці, тис. грн/міс	1200	750
Разом на рік, тис. грн	14400	9000

Очікуваний роковий економічний ефект при кріпленні виробок композитним кріпленням складе: 5 400 000 грн.

Додаток В





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 Ілліч (UA), Шека Іван Валерійович (UA), Цівка 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





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **148395** (13) **U**
 (51) МПК
E21D 11/14 (2006.01)

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

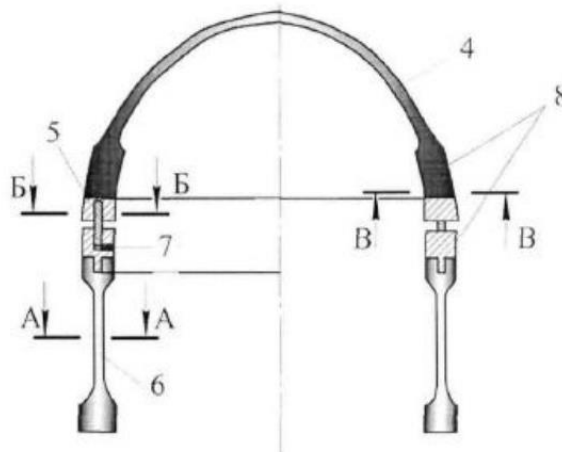
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2020 08272	(72) Винахідник(и): Цівка Євгеній Сергійович (UA), Бондаренко Володимир Ілліч (UA), Ковалевська Ірина Анатоліївна (UA), Шека Іван Валерійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 23.12.2020	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 05.08.2021	(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА", просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000 (UA)
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 04.08.2021, Бюл.№ 31	

(54) АРОЧНЕ КРІПЛЕННЯ

(57) Реферат:

Арочне кріплення містить верхняк, з'єднаний вузлами піддатливості зі стійками. Сійки 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.



Фиг. 1

UA 148395 U