

© І.В. Шека<sup>1</sup>, Є.С. Цівка<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКУ ЯК ІННОВАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ КРІПЛЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

© I. Sheka<sup>1</sup>, Ye. Tsivka<sup>1</sup>

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

## SUBSTANTINATION OF CARBON FIBER AS AN INNOVATIVE MATERIALS FOR FISTENING OF MINING WORKINGS OF COAL MINES

**Мета.** Проаналізувати композитні матеріали та перспективи їх використання як кріпильних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт. Виконати порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей інноваційного матеріалу вуглепластику та металевих матеріалів, а також порівняти їх особливості. Визначити можливість використання вуглепластику як кріпильного матеріалу для гірничих виробок вугільних шахт.

**Методика дослідження.** Виконано узагальнення фізико-механічних властивостей вуглепластику на основі його аналізу. Порівняно особливості механічних властивостей вуглепластику, сталі та алюмінію, які показали, що цей композитний матеріал має кращі фізико-механічні властивості і його доцільно використовувати в елементах кріплення гірничих виробок.

**Результати дослідження.** Проаналізовано та узагальнено області використання композитних матеріалів у промисловості. В результаті досліджень зроблено висновок, що у якості кріпильного матеріалу для гірничих виробок вугільних шахт краще використовувати вуглепластик. Виконано порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей вуглепластику та сталі, які показують, що цей композитний матеріал має ідентичні (а навіть інколи і кращі) властивості, як і у металевих матеріалів. Оцінено переваги та недоліки вуглепластику як кріпильного матеріалу для гірничих виробок вугільних шахт. Уточнено, що стримуючим фактором, на сьогоднішній день, є вартість вуглепластичних волокон, та згодом їх ціна зменшиться, а затребуваність збільшиться. Зроблено висновок, що при використанні цього композитного матеріалу в елементах кріплення гірничих виробок можливо збільшити темпи їх проведення, зменшити трудомісткість робіт, що виконуються та покращити умови праці при полегшенні конструкції.

**Наукова новизна.** Встановлено, що вуглепластик як композитний матеріал можна використовувати в елементах кріплення підготовчих виробок вугільних шахт.

**Практичне значення.** За результатами аналізу встановлено, що вуглепластики можна використовувати в елементах кріплення гірничих виробок, що буде сприяти розвитку підземного вуглевидобутку.

**Ключові слова:** композитний матеріал, гірничі виробки, фізико-механічні властивості, вуглепластик, кріплення.

**Вступ.** Для забезпечення енергетичної незалежності економіки необхідна інтенсифікація вуглевидобутку. У зв'язку з цим щорічно зростає важкість та глибина розробки вугільних пластів [1]. На даний момент часу, більшість діючих вугільних шахт в Україні переходять до більш важких металевих спецпрофільей:

СВП 27, СВП 33. Матеріали, які використовуються при кріпленні виробок, мають наявні недоліки, такі як: досить висока вага конструкції, замалі темпи проведення виробки, висока трудомісткість робіт, що виконуються та ін.

Враховуючи останні тенденції у розвитку науки і техніки, в світі вже давно обґрунтовують використання композитних матеріалів [2, 3]. Одним з таких матеріалів є так званий карбон, або вуглепластик.

При високопродуктивній праці добувних ділянок ефективним напрямком є підтримка підготовчих виробок та їх повторне використання за допомогою зміцнення породного масиву кріпленням із композитного матеріалу.

У зв'язку з цим метою даної роботи є обґрунтування інноваційних матеріалів на прикладі вуглепластику, що забезпечить надійне кріплення підготовчих виробок вугільних шахт, розташованих в умовах великого нерівномірного тиску, а також зменшить трудомісткість робіт, що виконуються.

**Основна частина.** Аналіз досліджень металевих матеріалів 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 [4] гірничих виробок (рис. 1).

Безліч компонентних матеріалів та різні процеси, які можна використовувати, роблять композити надзвичайно універсальними [3, 5] та ефективними. Як правило, вони отримують більш легкі, міцні та довговічні рішення порівняно з традиційними матеріалами.

Основною причиною вибору композиційних матеріалів для компонентів є економія ваги відносно жорсткості та міцності. Наприклад, армований вуглецевим волокном композит може бути в п'ять разів 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.

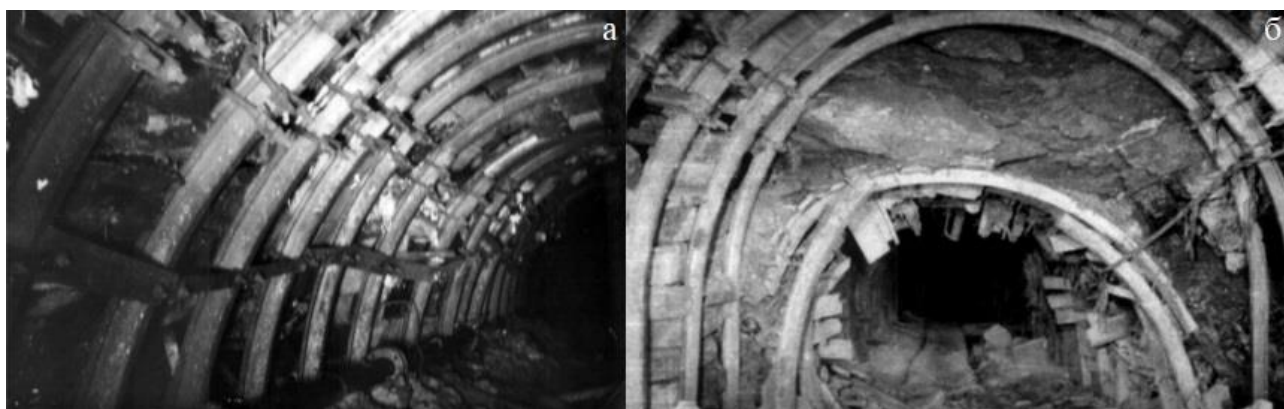


Рис. 1. Різний стан гірничих виробок, закріплених металевим кріпленням на великих глибинах при проявах нерівномірного гірничого тиску:  
а) початковий стан; б) перекріплення зруйнованої виробки

Слід також враховувати, що вартість сталі доволі швидко зростає (рис 2), що дає можливість конкурувати з металевими матеріалами – композитним. Найвні недоліки металу можливо зменшити, і в деяких випадках виключити, за рахунок використання сучасних технологій та інноваційних матеріалів.



Рис. 2. Динаміка зміни вартості сталі СТ-5 по роках

Обґрунтування використання композитних матеріалів на прикладі вуглепластику виконано у зв'язку з подорожчанням вартості металу та збільшенням його ваги при зміні спецпрофілю СВП. Тобто металеве кріплення, яке має достатні недоліки, які перераховані вище, досить застаріле та потребується новий вид кріплення гірничих виробок.

Композитний (або композиційний) матеріал – це штучний багатокомпонентний матеріал, що складається з основи – матриці, і наповнювачів, які відіграють зміцнювальну та деякі інші ролі. Між фазами композиту є межа розділу фаз. Поєднання різнорідних речовин призводить до створення нового матеріалу, властивості якого істотно відрізняються від властивостей кожного з його складових. Тобто ознакою композитного матеріалу є помітний взаємний вплив складових елементів композиту – їх нову якість. [4, 5]

Композитні матеріали класифікують [3, 6] за: типом матриці (органічна та неорганічна), хімічною природою зв'язуючого (терморективні та термопластичні), типом посилюючих елементів (скляні, вуглецеві, органічні, базальтові та борні), формою посилюючих (армуючих) елементів (волокна, нитки, жгути, тканини, плівки, ленти) та структурою композитів (волокнисті, шаруваті, дисперсно-посилені, посилені частками, наноккомпозити). Композитні матеріали використовують у різних галузях (рис. 3).

## ОСНОВНІ ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

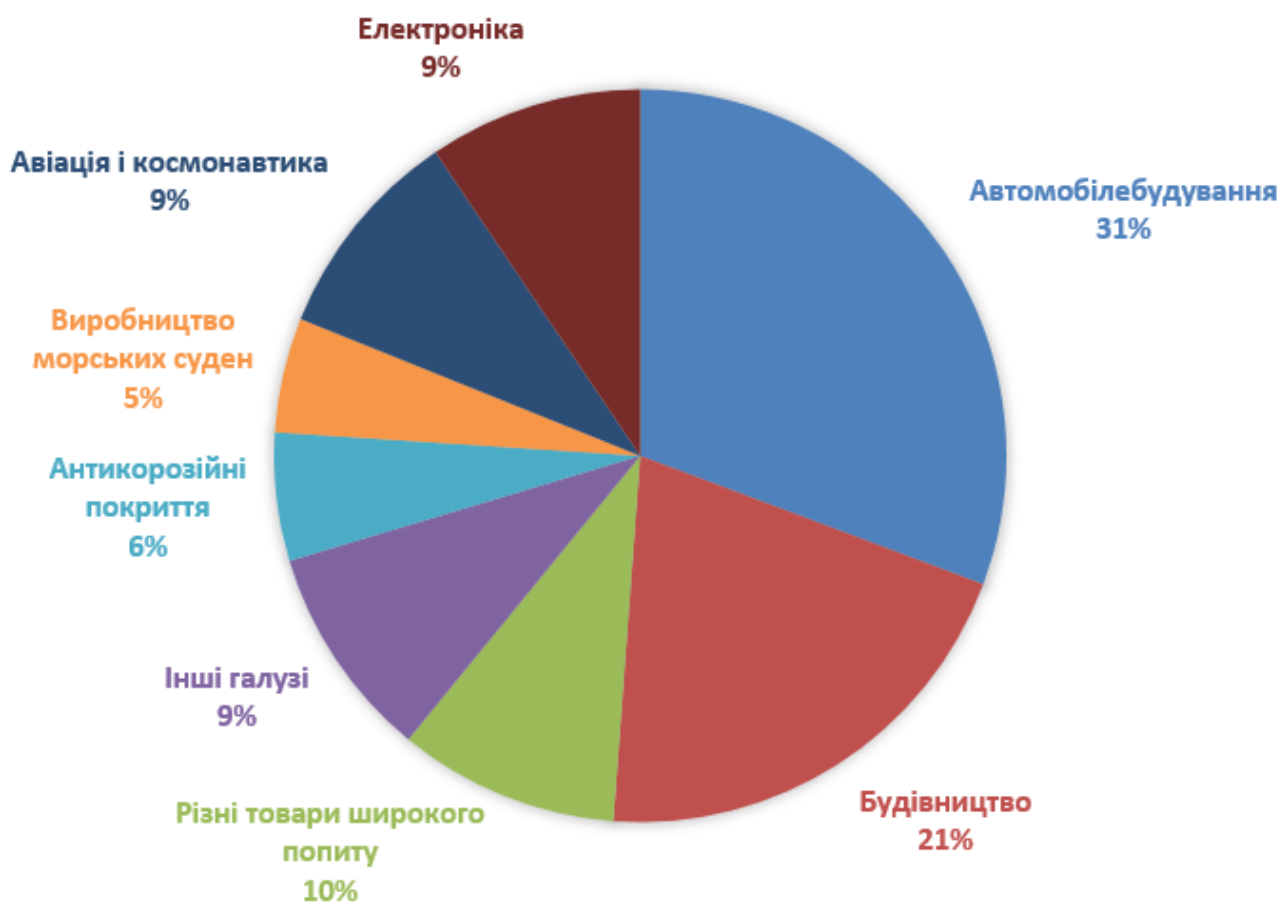


Рис. 3. Діаграма використання композитних матеріалів

Найбільше композити використовуються в автомобілебудуванні (31%) та будівництві (21%), з чого можна зробити висновок, що композити піддаються великим напруженням та витримують їх [2, 6, 11]. Світовий ринок композиційних матеріалів зростає приблизно на 5% на рік, а попит на вуглецеве волокно зростає на 12% на рік [7].

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. Основними видами полімерних [4, 6, 7] композитних матеріалів є: склопластики, вуглепластики, боропластики та органопластики, які представлені на рис 4.

Всі інноваційні матеріали дуже гарно взаємодіють між собою, але, як показали дослідження фізико-механічних властивостей, у вугільній промисловості краще використовувати вуглепластик як кріпильний матеріал, тому що він має більш високу питому міцність, високу теплостійкість і тривалу стійкість до механічних напружень, що якраз і необхідно для гірничих виробок вугільних шахт.



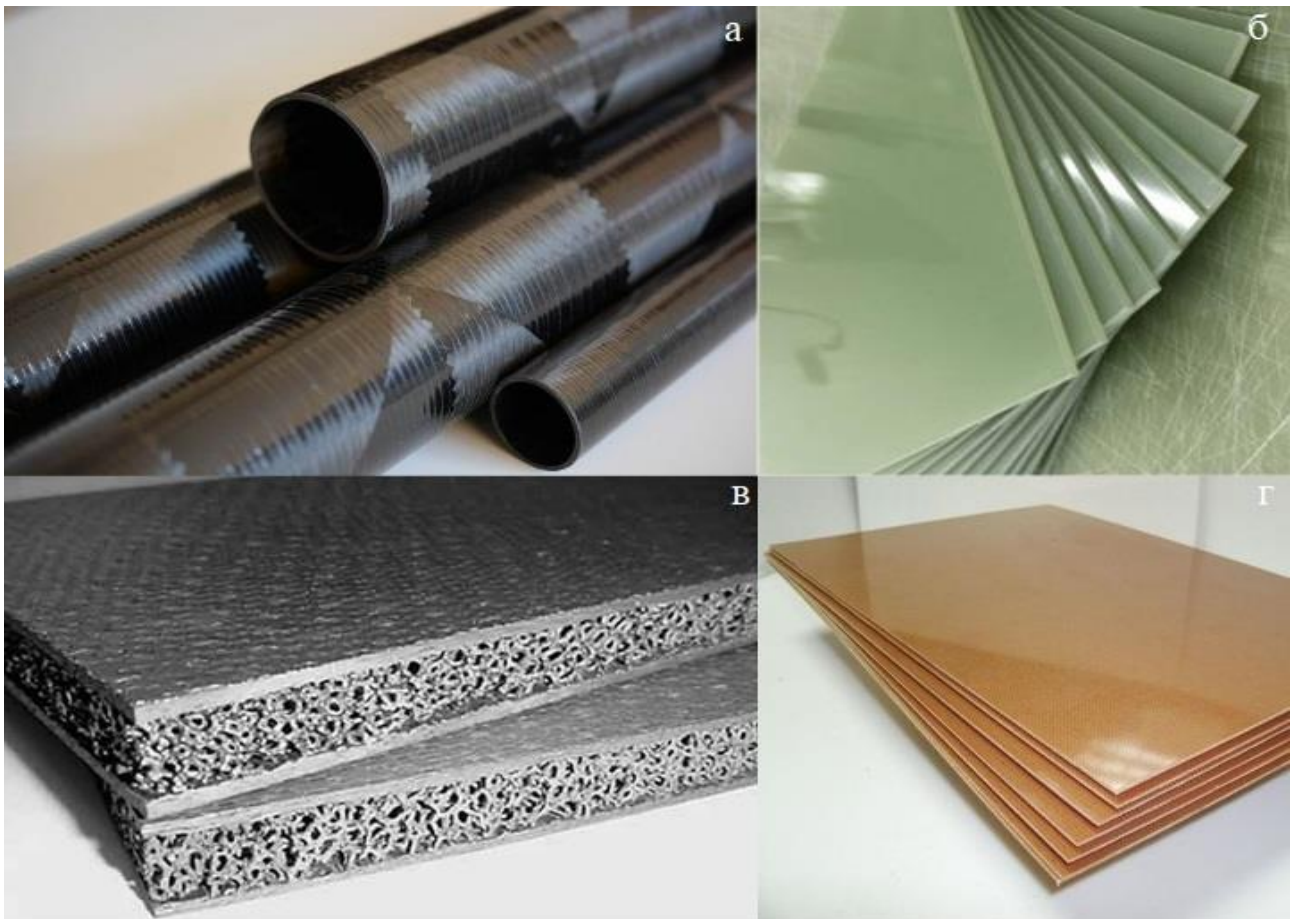


Рис. 4. Види полімерних композитних матеріалів: а) вуглепластики; б) склопластики; в) боропластики; г) органопластики.

Вуглепластик – це композитний матеріал на основі волокон вуглецю та смол. Складається з армованого наповнювача із вуглецевого волокна і полімерної матриці. Основна складова частина вуглепластика - це нитки вуглецю. Такі нитки дуже тонкі (приблизно 0,005-0,010 мм в діаметрі), з цих ниток сплітаються тканини, які утворюють пластини. Вони можуть мати різний малюнок плетіння. У ролі зв'язуючої матриці [8] у вуглепластику виступають смоли (зазвичай поліефідні або епоксидні).

Вуглеволокно роблять з лінійного полімеру акрилонітрилу. Речовина обробляється в автоклаві під великим тиском і високої температурі. Температурна обробка складається з декількох умовних етапів. [8, 9]

Перший – представляє собою нагрів вихідного (віскозного або поліакрилонітрильного) волокна при високій температурі, при цьому відбувається його обвуглювання.

Другий – «стадія карбонізації» - нагрів волокна в середовищі інертного газу при температурах від 800 до 1500 °С. В результаті карбонізації [10] відбувається утворення вуглецевих структур і видалення сторонніх включень.

Третій – заключна стадія графітізації – процес термічної обробки в інертному середовищі при температурах 1600-3000 °С. На цій стадії відбувається насичення волокна вуглецем і його зміст доводиться до максимальної величини. Чим більшій температурі піддається волокно і довше обробляється в печі, тим

якіснішим, і дорогим воно стає [11, 12].

Властивості вуглепластику роблять його більш затребуваним у гірничій промисловості ніж склопластики, органопластики та інші композитні матеріали [11, 13]. Дані властивості присутні завдяки вуглецевим волокнам, та представлені на рис. 5 та у таблиці.

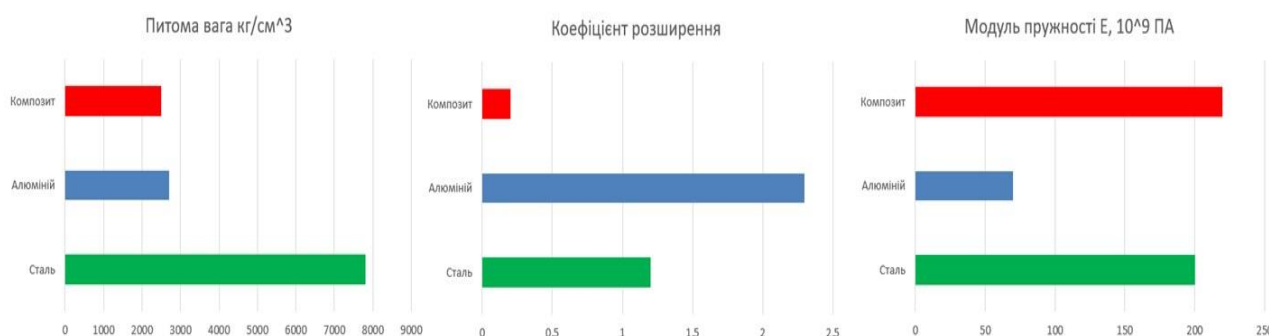


Рис. 5. Порівняння властивостей композитних матеріалів з алюмінієм та сталлю

Таблиця

#### Фізико-механічні властивості вуглепластику та сталі

Фізико-механічні властивості	Матеріал	
	вуглепластик	сталь
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	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 стисненні, МПа	990	500

З даних [14], що наведені у таблиці можна зробити висновок, що використання вуглепластику дасть можливість полегшити конструкцію кріплення в 5 разів. При збільшенні частоти деформування в діапазоні, відповідному частоті коливань більшості конструкцій, модулі пружності вуглепластику значно зменшуються. Облегшення конструкції кріплення із композитних матеріалів також впливає на зменшення трудомісткості в процесі послідовного кріплення гірничих виробок.

Нами створена модель конструкції кріплення із композитних матеріалів [15], яка представлена на рис. 6 (заявка на винахід: а202008057).

Арочне піддатливе кріплення із композитних матеріалів реалізується наступним чином: спочатку встановлюють стійки та зводять верхняк арочної форми змінного перетину виконані з вуглепластику, у верхняк вмонтовується металевий шток, який пропускається у металевий стакан, вмонтований у стійку, в якому

міститься пластичний матеріал, який буде виходити через дросельний отвір. Піддатливий режим починає працювати в складних гірничо-геологічних умовах. Верхняк з вмонтованим металевим штоком починає просідати, пластичний матеріал починає текти та виходити через дросельний отвір. Арочне кріплення починає працювати в піддатливому режимі в умовах вельми великих напружень та є можливість витикання пластичного матеріалу через дросельний отвір, коли конструкція починає демпфувати, а металевий шток опускається уздовж стійки. Це супроводжується більш рівномірним розподілом напруження між верхняком та стійкою, що разом з фактором змінного профілю сприяє більш рівномірному напруженню по контуру кріплення. Облегшення конструкції арочного кріплення із композитних матеріалів також впливає на зменшення трудомісткості в процесі послідовного кріплення. Вага кріплення зменшується в 5-6 разів, що пов'язано з послідовним переносом роботи зміни, зниженню витрат часу на монтаж та демонтаж, а також збільшує безпеку праці шахтарів.

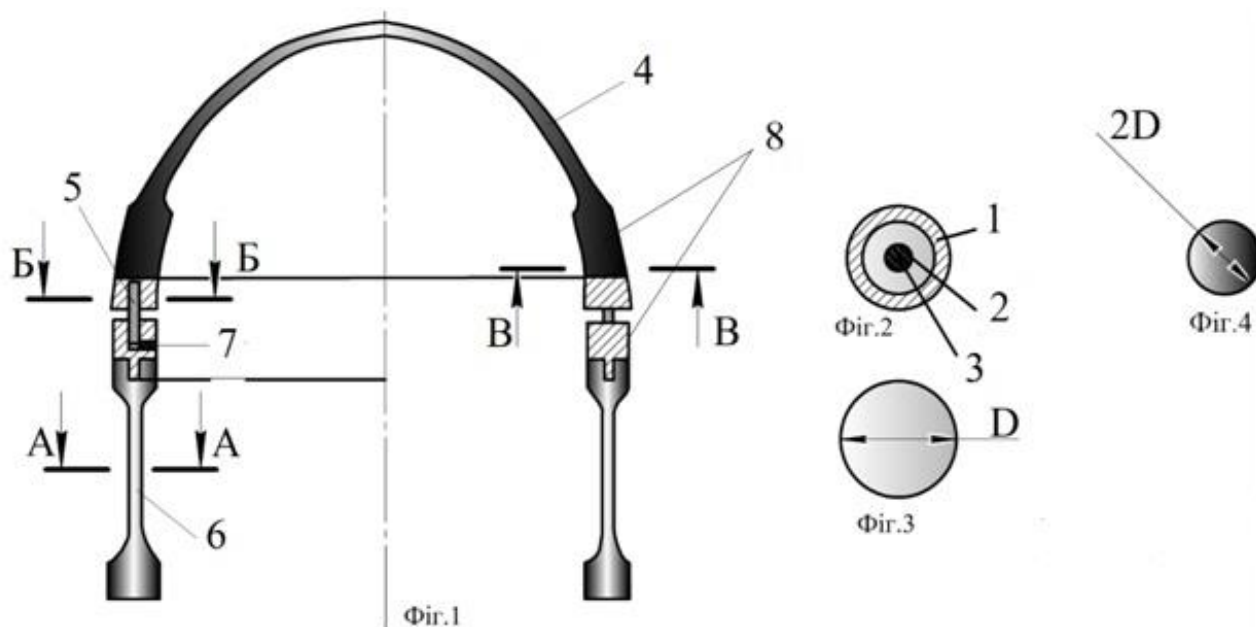


Рис. 6. Конструкція арочного піддатливого кріплення змінного перетину із вуглепластику

Арочне піддатливе кріплення з використанням вуглепластику може бути виготовлене в умовах виробництва композитних матеріалів та може знайти своє застосування для гірничих виробок вугільних шахт в складних гірничо-геологічних умовах.

Але слід враховувати, що на даний момент часу, вуглепластики досить дорогі. Це не дозволить поки що використовувати їх в повній мірі у вугледобувній промисловості. Але згодом, зі зменшенням ціни на виготовлення композитних матеріалів [16-18], вуглепластики будуть більше використовуватись у вугледобувній промисловості.

**Висновки.** Отримані результати дозволяють зробити висновок: вуглепластики як нові інноваційні матеріали можна використовувати в конструкціях кріплення гірничих виробок вугільних шахт.

Вуглепластик за властивостями переважає алюміній та метал. Карбон має високу теплостійкість і тривалу стійкість до механічних напружень. Дані властивості роблять вуглепластики в промисловому виробництві більш затребуваними, ніж решта композитних матеріалів, але стримуючим фактором, на сьогоднішній день, є вартість вуглепластичних волокон, та згодом їх ціна зменшиться, а затребуваність збільшиться.

Попередні дослідження показали, що вуглепластик за допомогою своїх унікальних характеристик здатний сприймати високі напруження та може бути виготовлений різної геометричної форми, завдяки властивостям гнучкості та міцності.

Використання вуглепластику в елементах кріплення гірничих виробок дозволить збільшити темпи проведення, зменшить трудоємність робіт, що виконуються та підвищить безпеку праці шахтарів у виробках надглибоких горизонтів.

#### Перелік посилань

1. Виноградов, Ю. А., & Хорольский, А. А. (2019). Разработка программного обеспечения для повышения эффективности поддержания выработок в сложных гидрогеологических условиях. *Горная механика и машиностроение*, (4), 5-11.
2. Vamakan, S. M. H., & Gholami, P. (2014). A novel feature selection method based on an integrated data envelopment analysis and entropy model. *Procedia Computer Science*, 31, 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.310>
3. Artrith, N., & Urban, A. (2016). An implementation of artificial neural-network potentials for atomistic materials simulations: Performance for TiO<sub>2</sub>. *Computational Materials Science*, 114, 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.11.047>
4. 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
5. Goncharov, A. A., Dub, S. N., Agulov, A. V., & Petukhov, V. V. (2015). Structure, composition, and mechanical properties of thin films of transition metals diborides. *Journal of Superhard Materials*, 37(6), 422-428. <https://doi.org/10.3103/s1063457615060076>
6. *Види і область застосування композитних матеріалів* (2016). <https://www.stroibaza.ru/articles/one.php?id=5755>
7. *Composite materials* (n.d.). <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/introduction>
8. Visal, S., & Deokar, S. U. (2016). A review paper on properties of carbon fiber reinforced polymers. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2(12), 238-243.
9. Lee, S. C., Jeong, S. T., Park, J. N., Kim, S. J., & Cho, G. J. (2008). Study on drilling characteristics and mechanical properties of CFRP composites. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 21(4), 364-368. <https://doi.org/10.1007/s10338-008-0844-z>
10. *Physical properties of composite materials* (n.d.). <https://www.omicsonline.org/blog/2015/01/23/1879-physical-properties-of-composite-materials.html>



11. Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2018). *Advanced mechanics of composite materials and structures*. Elsevier.
12. Zerr, A., Miehe, G., Li, J., Dzivenko, D. A., Bulatov, V. K., Höfer, H., ... & Yoshimura, M. (2009). High-Pressure Synthesis of Tantalum Nitride Having Orthorhombic  $U_2S_3$  Structure. *Advanced Functional Materials*, 19(14), 2282-2288.  
<https://doi.org/10.1002/adfm.200801923>
13. Гращенко, Д. В., & Чурсова, Л. В. (2012). Стратегия развития композиционных и функциональных материалов. *Авиационные материалы и технологии*, (S), 231-242.
14. Бондаренко, В., Салеев, И., Шека, И., & 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>
15. Апрочне піддатливе кріплення із композитних матеріалів (n.d.).  
<https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1468545/>
16. Каблов, Е. Н. (2012). Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии*, 5, 7-17.
17. Composites properties (n.d.).  
[http://www.issp.ac.ru/ebooks/books/open/Composites\\_and\\_Their\\_Properties.pdf](http://www.issp.ac.ru/ebooks/books/open/Composites_and_Their_Properties.pdf)
18. Amir, S. M. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., Ariffin, A. H., Mohd, S., Salleh, K. A. M., Ishak, M. R., & 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). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102290-0.00016-7>

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Проанализировать композитные материалы и перспективы их использования в качестве крепежных материалов для горных выработок угольных шахт. Выполнить сравнительный анализ физико-механических свойств инновационного материала углепластика и металла, а также сравнить их особенности. Определить возможность использования углепластика в качестве крепежного материала для горных выработок угольных шахт.

**Методика исследования.** Выполнено обобщение физико-механических свойств углепластика на основе его анализа. Сопоставлены особенности механических свойств углепластика, стали и алюминия, которые показали, что этот композитный материал имеет лучшие физико-механические свойства и его целесообразно использовать в элементах крепления горных выработок.

**Результаты исследования.** Проанализированы и обобщены области использования композитных материалов в промышленности. В результате исследований сделан вывод, что в качестве крепежного материала для горных выработок угольных шахт лучше использовать углепластик. Выполнен сравнительный анализ физико-механических свойств углепластика и стали, которые показывают, что этот композитный материал имеет идентичные (а даже иногда и лучшие) свойства, такие же как и у металлических материалов. Оценены преимущества и недостатки углепластика в качестве крепежного материала для горных выработок угольных шахт. Уточнено, что сдерживающим фактором, на сегодняшний день, является стоимость углепластичных волокон, и впоследствии их цена уменьшится, а востребованность увеличится. Сделан вывод, что при использовании этого композитного материала в элементах крепления горных выработок возможно увеличить темпы их проведения, уменьшить трудоемкость выполняемых работ и улучшить условия труда при облегчении конструкции.

**Научная новизна.** Установлено, что углепластик как композитный материал можно использовать в элементах крепления подготовительных выработок угольных шахт.

**Практическое значение.** По результатам анализа установлено, что углепластики можно использовать в элементах крепления горных выработок, будет способствовать развитию подземной угледобычи.

**Ключевые слова:** *композитный материал, горные выработки, физико-механические свойства, углепластик, крепление.*

#### ABSTRACT

**Purpose.** To analyze composite materials and prospects of their use as fastening materials for mining of coal mines. Perform a comparative analysis of the physical and mechanical properties of the innovative material carbon fiber and metallic materials, as well as compare their features. To determine the possibility of using carbon fiber as a fastening material for mining of coal mines.

**Research methodology.** The generalization of physical and mechanical properties of carbon fiber on the basis of its analysis is performed. The features of mechanical properties of carbon fiber, steel and aluminum are compared, which showed that this composite material has the best physical and mechanical properties and it is expedient to use it in the fastening elements of mine workings.

**Research results.** The areas of use of composite materials in industry are analyzed and generalized, and it is concluded that it is better to use carbon fiber as a fastening material for coal mine workings. A comparative analysis of the physical and mechanical properties of carbon fiber and steel is performed, which shows that this composite material has identical (and sometimes even better) properties as metallic materials. The advantages and disadvantages of carbon fiber as a fastening material for mining of coal mines are estimated. It is specified that the restraining factor, today, is the cost of carbon fiber, and later their price will decrease and demand will increase. It is concluded that when using this composite material in the fasteners of mine workings, it is possible to increase the pace of their implementation, reduce the complexity of the work performed and improve working conditions while facilitating the design.

**Scientific novelty.** It is established that carbon fiber as a composite material can be used in the fastening elements of the preparatory workings of coal mines.

**Practical value.** According to the results of the analysis, it is established that carbon plastics can be used in the fastening elements of mine workings, which will promote the development of underground coal mining.

**Keywords:** *composite material, mine workings, physical and mechanical properties, carbon fiber, fastening.*