

© І.В. Шека¹, І.А. Салєєв², М.В. Шишов², О.К. Малова¹, В.М. Почепов¹, О.Р. Мамайкін¹
¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
²ТОВ «ДТЕК Енерго», Київ, Україна

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ЗАСТОСУВАННЯ У КРІПЛЕННЯХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

© I. Sheka¹, I. Salieiev², M. Shyshov², O. Malova¹, V. Pochepov¹, O. Mamaikin¹
¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
²LLC “DTEK Energy”, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE USE OF COMPOSITE MATERIALS FOR FURTHER APPLICATION IN THE SUPPORT OF MINE WORKINGS

Мета. Аналіз композитних матеріалів та перспективи їх використання для кріплення гірничих виробок на вугільних шахтах.

Методика дослідження. Для досягнення поставленої мети використовувались аналітичні дані щодо ринку композиційних матеріалів, об'єму потужностей їх виробництва, вартісні показники. Використовувались дані фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів та їх кількісні показники.

Результати дослідження. Проаналізовано область використання композитних матеріалів у промисловості. Аналіз показує, що композитні матеріали задіяні у багатьох галузях: медицині, мостобудуванні, оборонній промисловості, тощо. Порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей вуглепластику та сталі показує, що цей композитний матеріал має ідентичні (а навіть інколи і кращі) властивості, ніж у металевих матеріалів. В результаті досліджень зроблено висновок, що у якості кріпильного матеріалу для гірничих виробок вугільних шахт краще використовувати вуглепластик. 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 гірників при полегшенні конструкції.

Наукова новизна. Вперше аналітично визначено галузі застосування та тенденції розвитку ринку композитних матеріалів. Встановлено та порівняно фізико-механічні властивості композитних матеріалів та сталі. Визначено, що вуглепластик здатний сприймати високі напруження, а кріплення може бути виготовлене різної геометричної форми. Обґрунтовано, що кріплення з вуглепластику витримує допустимі напруження та його можна використовувати при кріпленні підготовчих виробок на вугільних шахтах.

Практичне значення. Отримані результати доводять, що кріплення з вуглепластику полегшить конструкцію кріплення, що разом з пришвидшенням роботи зміни буде сприяти розвитку підземного вуглевидобутку.

Ключові слова: вуглепластик, гірничі виробки, композитний матеріал, кріплення, напружено-деформований стан, фізико-механічні властивості.

Вступ. Забезпечення стійкості гірничих виробок комбінованими та інноваційними способами кріплення набуває великого поширення за рахунок нових технологій. При цьому, необхідними умовами є: висока надійність кріплення виробленого простору, мінімальна кількість кріпильних матеріалів необхідних для закріплення, удосконалення організаційної структури процесу, а також пришвидшення темпів кріплення та спорудження виробок. Наявність цих вимог спричиняє пошук нових видів та технологій управління напружено-деформованим станом масиву гірських порід [1, 2], застосування новітніх матеріалів у елементах кріплення гірничих виробок [3, 4], заходів із пошуку та відтворення внутрішніх резервів у організаційній структурі [5–7], створення новітніх сумішей [8, 9] та відповідної техніки [10], тощо.

У зв'язку з цим метою даної роботи є аналіз композитних матеріалів та перспективи їх використання для кріплення гірничих виробок на вугільних шахтах.

Основна частина. У роботі [11] було проаналізовано композитні матеріали на основі вуглепластику у елементах кріплення виробок, але цей аналіз є не досить повним, адже у роботі не проаналізовано досить багато чинників, які підтверджують доцільність використання вуглепластику у кріпленні гірничих виробок.

В останні роки світовий ринок композитних матеріалів динамічно розвивається [12] та в 2021 році оцінювався більш ніж в 99 мільярдів доларів при фізичній вартості 12 мільйонів тонн [13, 14].

Структура ринку композитів у різних країнах та прогноз його зміни до 2024 року представлений на рис. 1.

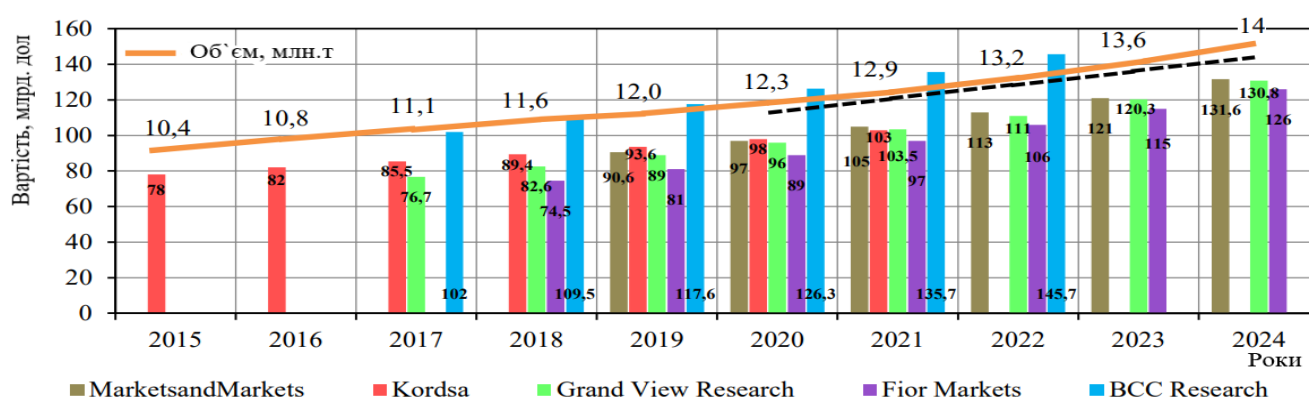


Рис. 1. Оцінка та прогноз світового ринку композитних матеріалів в період з 2015 по 2024 рік

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

Будівельна та автомобільна промисловість найбільше постраждали від спалаху Covid-19. Очікується, що їх швидке відновлення зростанню всього ринку композитів в довгостроковій перспективі [15].

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 до 10 кг (табл. 1).

Таблиця 1

Споживання вуглепластиків на душу населення за країнами

Споживання на душу	США	Японія	Німеччина	Австрія	Франція	Англія	Іспанія, Португалія	Країни Бенілюксу	Скандинавські країни	Італія	Греція	Туреччина
кг	7,1	5,8	9,1	4,0	3,9	2,3	3,1	10,6	4,4	4,7	3,2	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 до 2024 року.

Країни Азії займають найбільшу частку ринку композитів, завдяки економічному розвитку транспорту, будівництву, вітроенергетиці, виробництву труб та резервуарів, що стимулює високий попит.

Таблиця 2

Структура ринку композитів за країнами в період 2021 р.

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

У 2021 р. на країни Азії припадає 48% світового ринку в натуральному вираженні і 43% у вартісному, тоді як тільки на китайський ринок припадало 28% світового ринку в натуральному вираженні, або 3,4 мільйонів тонн (див. табл. 2).

Ринок Північної Америки становить 3,1 мільйонів тонн, що становить 26% світового ринку в натуральному вираженні і 30% у вартісному вираженні. На ринок Південної Америки припадає 2% світового ринку, або 300 тисяч тонн [15].

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 [16 – 18].

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.

Наприклад, різні композитні матеріали вимагають різних підходів. Це визначається вимогами до характеристик продукту, регламентами та ціновими порогоми. 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 обліку можливих зовнішніх впливів на матеріали (фізичних, механічних, експлуатаційних) при проектуванні виробів.

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 [19, 20].

Вуглепластики є високоміцними і розраховані на робочу температуру до 120-150 °С, також вони повинні забезпечувати збереження показників пружно-міцнісних властивостей при впливі 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 [21].

Вартість виробництва залежить від вибору сировини – основних (армуючи 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.

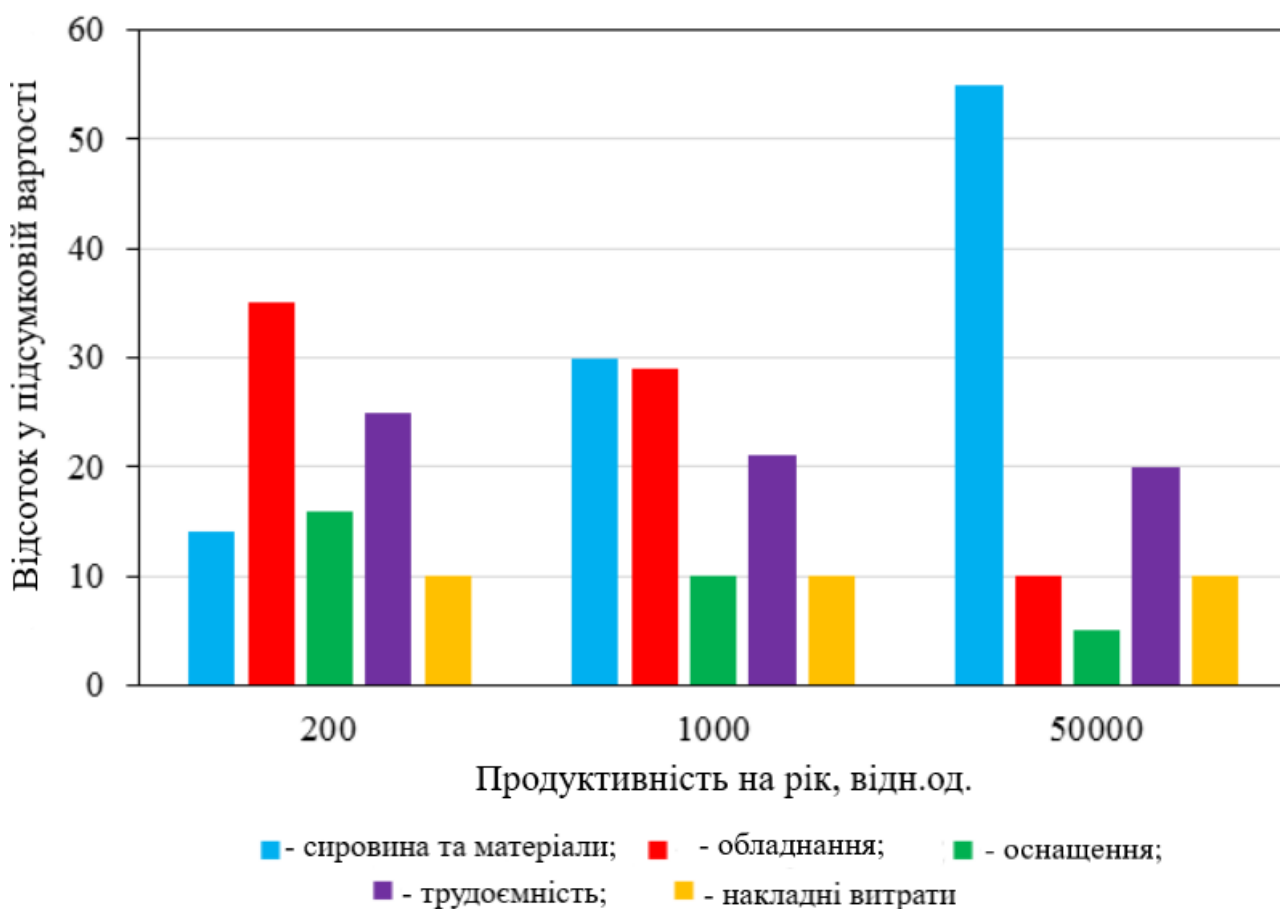


Рис. 2. Співвідношення складових вартості композитних матеріалів залежно від обсягів виробництва

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 [22].

Основними виробниками таких допоміжних матеріалів є Stevik (Франція), Diatex (Франція), Solvay (США), Airtech Advanced Materials Group (США, Великобританія, Китай, Люксембург) та інші компанії, які коштують від 30\$ за одиницю.

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

Аналіз досліджень металевих матеріалів [23–25] показав, що зі збільшенням глибини проведення виробки, потребується зміна спецпрофілю СВП, змінюється і його питома вага, за рахунок чого збільшується трудоємність робіт, що виконуються, темпи проведення виробок зменшуються, а також величина конструктивної піддатливості стає невеликою, що обумовлюється незадовільним станом гірничих виробок [26].

Аналізуючи дослідження [27, 28] в світі вже давно обґрунтовують використання композитних матеріалів. На даний момент часу композитні матеріали широко використовують у автомобілебудуванні, будівництві, інженерії, електроніці та ін (рис. 3). А в роботі [29] проаналізовано використання композитів у гірничій промисловості та їх перспективи.



Рис. 3. Діаграма використання композитних матеріалів у різних галузях

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.

Широке застосування знайшли композиційні матеріали в авіаційній та ракетно-космічній техніці [30], де використовуються такі їх властивості, як висока питома міцність та стійкість до впливу високих температур, стійкість до вібраційних навантажень, мала питома вага. З цих матеріалів виготовляються корпусні деталі та деталі внутрішнього інтер'єру.

Досить широко композиційні матеріали застосовують у галузі суднобудування [31, 32]. 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. Цій можливості дозволили досягти унікальних властивостей матеріалів, їх висока теплоізоляція і вогнестійкість.

Високий прорив композитні матеріали зробили у галузі мостобудування [33]. Використання склопластику відкриває перспективний шлях будівництва мостів із нових матеріалів. Збудований міст завдовжки 40 метрів, протягнутий упоперек однієї з найбільш завантажених залізниць у Данії [34]. Міст був спеціально розроблений для створення залізничних переходів. Ключовою умовою створення мосту, для однієї з найбільш завантажених залізниць Данії, 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 оборонній промисловості [35] композиційні матеріали зіграли значну роль у стратегії та напрямку нових розробок. Так захисні каски, бронезилети, що традиційно виготовляються у всіх країнах багато років з металу, нині також виготовляються з композиційних матеріалів.

Аналіз цін на 1 кг вуглепластиків в 2022 році показує, що для оборонної промисловості має найвищу додану вартість (> 100 \$/кг).

Механічні властивості композитних матеріалів залежать від фізико-механічних властивостей фазових складових та дефектів кристалічної будови [36]. В композиційних матеріалах із волокнистою будовою фази зміцнення дефекти кристалічної структури накопичуються переважно в матричній фазі та на границях розподілу між фазовими складовими.

У дослідженні [37] встановлені фізико-механічні властивості алюмоматричних композитів (табл. 3), а в роботі [38], порівняно фізико-механічні властивості композитів на основі вуглепластичних волокон та сталі (табл. 4).

Таблиця 3

Фізико-механічні властивості алюмоматричних композитів

	Al_2O_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
Межа текучості, МПа	107	90	142

Таблиця 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 стисненні, МПа	990	500

З даних, які наведені у таблицях 3 та 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.

У роботах [39–41] досліджено, що властивості композитів залежать від: швидкості кристалізації, температурного градієнту, кристалографічної орієнтації, хімічного складу, досконалості структури.

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.

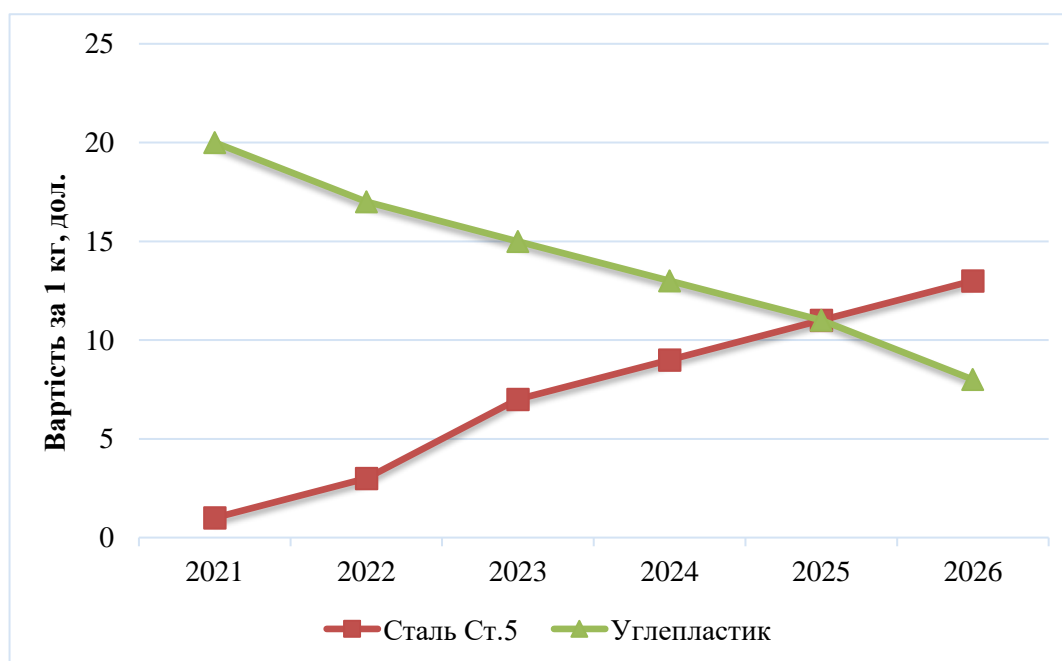


Рис. 4. Динаміка та прогноз зміни вартості сталі та вуглепластику на найближчі роки

Але однією з основних проблем застосування вуглепластику є його досить висока вартість. Проаналізувавши світову тенденцію ринку композитів [42, 43], побудовано залежність, яка показує, що приблизно через 5 – 10 років вартість матеріалу зрівняється з металом (див. рис. 4).

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.

Для вугільної промисловості завжди стоїть задача вдосконалення не тільки технології ведення очисних робіт [44, 45] та підвищення якості видобутого вугілля [46], але і кріплення виробок [47]. Зростає необхідність використання конструкції кріплення, яка повинна бути легкою, міцною, стійкою до корозії та здатною рівномірно розподіляти гірський тиск.

Аналізуючи тенденції розвитку вугільної промисловості України [48, 49] слід зазначити досить складні умови видобутку, які при тому постійно ускладнюються, що є серйозною проблемою при відпрацюванні вугільних родовищ.

Авторами створено моделі кріплення із композитних матеріалів [50, 51], які представлені на рис. 5

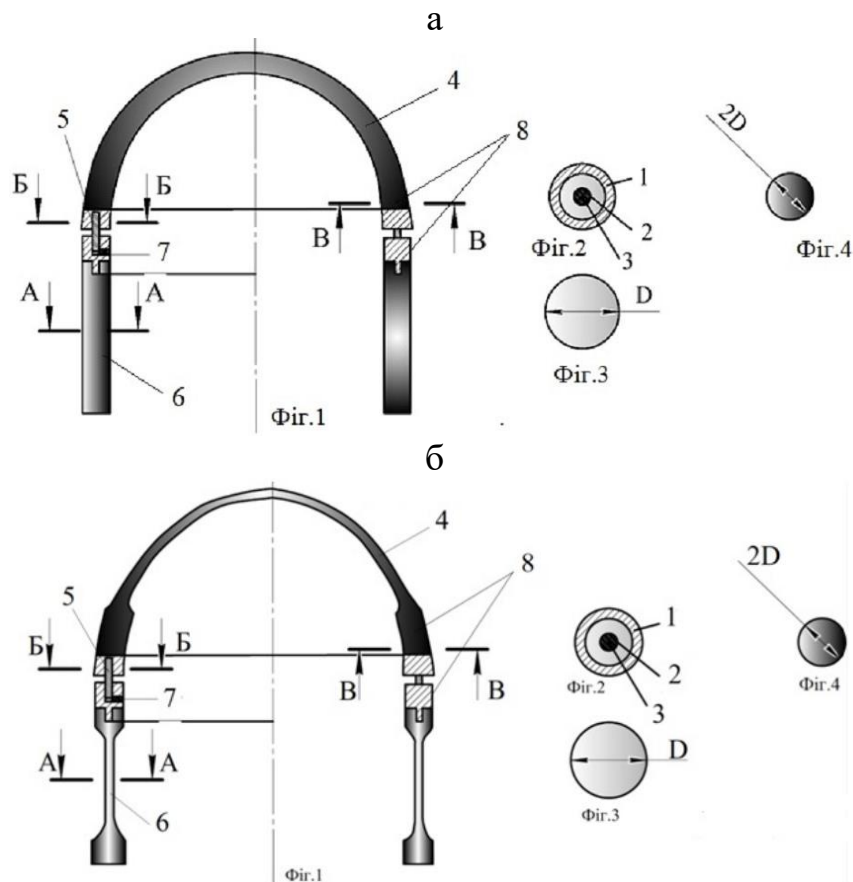


Рис. 5. Модель аркового кріплення із композитних матеріалів постійного профілю (а) та змінного (б): 1 – метал, 2 – вуглепластик, 3 – пластикний матеріал, 4 – верхняк, 5 – шток, 6 – стояк, 7 – дросельний отвір, 8 – вузол піддатливості

Аркове кріплення із композитних матеріалів реалізується наступним чином: спочатку встановлюють стояки та зводять верхняк арочної форми змінного перетину виконані з вуглепластику, у верхняк вмонтовується шток, який пропускається у стакан, що 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.

Аркове 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 стояками, що разом з фактором змінного профілю сприяє більш рівномірному напруженню по контуру кріплення. Облегшення конструкції аркового кріплення із композитних матеріалів також впливає на зменшення трудомісткості в процесі послідовного кріплення. Вага кріплення зменшується, що пов'язано з послідовним переносом роботи зміни, зниженню витрат часу на монтаж та демонтаж, а також збільшує безпеку праці шахтарів.

У роботі [52] було досліджено композитне кріплення за допомогою комп'ютерного експерименту у пружній постановці задачі. Результати представлені на рис. 6.

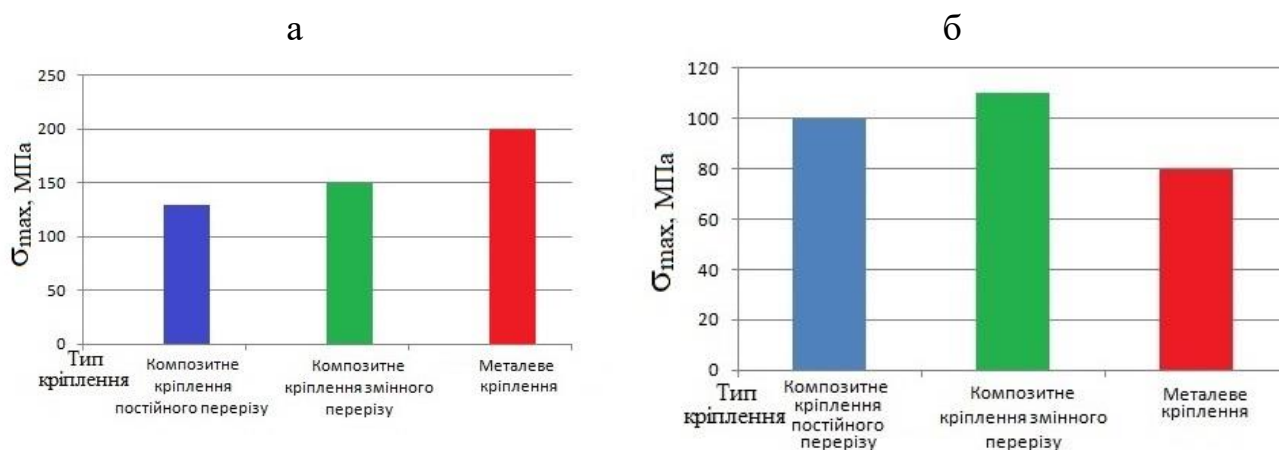


Рис. 6. Залежність зміни σ_{max} у стояках (а) та верхняку (б) від типу встановлюваного кріплення [52]

З одержаних залежностей можна зробити висновок, що кріплення із композитних матеріалів постійного перерізу доцільніше використовувати у гірничих виробках через більш рівномірний розподіл напружень по усьому контуру рами. За рахунок пластичності вуглепластиків елементи кріплення можливо збільшувати або зменшувати [53], як позує кріплення змінного перерізу, тим самим враховуючи зміну гірничо-геологічних умов (ведення очисних робіт, надробка, підробка, тощо).

Слід зазначити, що у дослідженнях [54–58] максимально допустимими напруженнями вважалися $\sigma = 100\text{--}150$ 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.

Висновки. Отримані результати у роботі дозволяють зробити висновок, що вуглепластик як кріпильний матеріал можна використовувати в конструкціях кріплення гірничих виробок вугільних шахт.

Вуглепластик має високу теплостійкість і тривалу стійкість до механічних напружень. Дані властивості роблять вуглепластики в промисловому виробництві більш затребуваними, ніж решта композитних матеріалів.

Стримуючим фактором є вартість вуглепластичних волокон, та згодом їх ціна зменшиться, а затребуваність збільшиться. Визначено, що шляхом до зниження собівартості вуглепластику буде вдосконалення процесу автоматизації виготовлення вуглеволокну, що призведе до здешевлення матеріалу та допоможе бути конкурентоспроможним на ринку інноваційних матеріалів.

Встановлено, 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, зменшити трудомісткість робіт, що виконуються та підвищити безпеку праці шахтарів у гірничих виробках на вугільних шахтах.

Перелік посилань

1. Bazaluk O, Petlovanyi M, Zubko S, Lozynskiy V. & Sai K. (2021). Instability Assessment of Hanging Wall Rocks during Underground Mining of Iron Ores. *Minerals*, 11(8):858. <https://doi.org/10.3390/min11080858>
2. Fomychov, V., Fomychova, L., Khorolskiy, A., Mamaikin, O., & Pochepov, V. (2020). Determining optimal border parameters to design a reused mine working. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(24), 3039-3049.
3. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Podkopaiev, S.V., Sheka, I.V., & Tsivka, Y.S. (2022). Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049, 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>
4. 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>
5. Bazaluk, O., Ashcheulova, O., Mamaikin, O., Khorolskiy, A., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2022). Innovative Activities in the Sphere of Mining Process Management. *Frontiers in Environmental Science*, 304. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878977>

6. Ащеулова, О.М., Хорольський, А.О., Фомичова, Л.Я., Почепов, В.М., & Мамайкін, О.Р. (2022). *Моделі та методи дослідження внутрішніх резервів вугледобувних підприємств. Монографія. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».*
7. Ащеулова, О.М., Мамайкін, О.Р., & Медяник, В.Ю. (2020). Дослідження складників внутрішнього потенціалу підприємств гірничозбагачувального комплексу. *Проблеми системного підходу в економіці*, 76, 202-207.
8. Petlovanyi M.V., Zubko S.A., Popovych V.V., & Sai K.S. (2022). Physicochemical mechanism of structure formation and strengthening in the backfill massif when filling underground cavities. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Technologii*, 6, 142-150.
<https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-142-150>
9. Petlovanyi, M., Malashkevych, D., Sai, K., Bulat, I., & Popovych, V. (2021). Granulometric composition research of mine rocks as a material for backfilling the mined-out area in coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 122-129.
<https://doi.org/10.33271/mining15.04.122>
10. Kosenko, A.V. (2021). Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk*, (1), 19-25.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
11. 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>
12. Види і область застосування композитних матеріалів (2016).
<https://www.stroi-baza.ru/articles/one.php?id=5755>
13. 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>
14. 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>
15. *Market Research Report // Fortune Business Insights*. (2020).
www.fortunebusinessinsights.com
16. *Kordsa the reinforcer//A Review of the Global Composites Market and Turkish Composites Market*. (n.d.). www.reinforcer.com
17. *Umatex//Тренди і драйвери в композитах*. (2020). www.umatex.com
18. *Market Research Report//Fortune Business Insights*. (2020). www.fortunebusinessinsights.com
19. Лазаренко, О.А., Вовченко, Л.Л., Овсієнко, І.В., & Мацуї, Л.Ю. (2018). *Полімерні композиції нановуглець-метал: структура і електричні властивості. Монографія. ТОВ «ТВОРИ».*
20. 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>.
21. 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>
22. Файнлейб, О. (2020). Термостійкі полімерні композиційні матеріали на основі гетероциклічних матриць. *Polymer Journal*, 2(42), 71-84.
23. Lucherini, A., & Maluk, C. (2019). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105712.

24. 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.
25. Босак, А. О., & Мурза, В. М. (2018). Світове виробництво сталі: тенденції, проблеми і роль України. *Причорноморські економічні студії*, 34, 10-15.
26. Smoliński, A., Malashkevych, D., Petlovanyi, M., Rysbekov, K., Lozynskyi, V., & Sai, K. (2022). Research into impact of leaving waste rocks in the mined-out space on the geomechanical state of the rock mass surrounding the longwall face. *Energies*, 15(24)
<https://doi.org/10.3390/en15249522>
27. 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>
28. Nagavally, R. R. (2017). Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *Int. J. Mech. Prod. Eng*, 5(9), 82-87.
29. Шека, І.В. (2022). Композити у гірничій промисловості. Минуле. Сьогодні. Майбутнє. 7-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 248
30. 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>
31. He, J., Cao, M., Wang, Z., & Cong, F. (2021). Low-speed impact damage analysis of aviation composite material structure. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 260, p. 03021). EDP Sciences.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126003021>
32. 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-19-11-002>
33. Niehaus, H., & Jerling, W. (2006). The Nelson Mandela bridge as an example of the use of composite materials in bridge construction in South Africa. In *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)
34. Найдовший міст у Європі з'єднає Німеччину і Данію. (n.d.).
https://daily.rbc.ua/ukr/show/samyu_dlinnyy_most_v_evrope_soedinit_germaniyu_i_daniyu_0_50920081
35. Sazrhi, A., Bura, R. O., & Amperiawan, G. (2019). Mastery of Composite Materials to Support Indonesia's Defense Industry. *6th Asian Conference on Defence Technology (ACDT)* (pp. 162-168).
<https://doi.org/10.1109/ACDT47198.2019.9072849>
36. Johnson, J., & Raja, R. (2020). Recent developments in Al7075 hybrid composites and study on its microstructure and mechanical characteristics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 993(1)
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/993/1/012023>
37. Соловійова, Т. О. (2018). Вплив мікроструктури та напружено-деформованого стану на фізико-механічні властивості композитів систем LaB6-MeB2-Cu (Al): дис. канд. техн. наук: 05.16.06 / НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
38. 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>
39. 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.
40. Loboda, P.I., & Bogomol, Y.I. (2002). The thermal stability of the directionally reinforced boride ceramics microstructure. *Ceramics*, 69, 117-124.

41. Pihitli, H., & Tosun, N. (2002). Investigation of the wear behaviour of a glass-fibre-reinforced composite and plain polyester resin. *Composites Science and Technology*, 62(3), 367-370.
42. 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).
43. Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Engineering*, 133, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>
44. Петльований, М.В., Малашкевич, Д.С., Сай, К.С., & Зубко, С.А. (2022). Концептуальні засади створення безвідходної технології розробки тонких вугільних пластів. *Наукові праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна, 1-2(27-28)*, 7-17 [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1\(27\)-2\(28\)-7-17](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1(27)-2(28)-7-17)
45. Малашкевич, Д.С., Петльований, М.В., Сай, К.С., & Козій, Є.С. (2020). Кількісно-якісна оцінка запасів вугілля як важливий етап обґрунтування доцільності їх селективного відпрацювання. *Вчені Записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні Науки*, 31, 158-166 <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/26>
46. Малашкевич, Д.С., Петльований, М.В., Постол, Н.О., & Постол, М.О. (2020). Аналіз якості видобутого кам'яного вугілля та шляхи її підвищення на шахтах Західного Донбасу. *Збірник Наукових Праць НГУ*, 62, 53–64. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.053>
47. Kovalevska, I., Pilecki, Z., Husiev, O., & Snihur, V. (2019). Assessment of the mutual influence of deformation-strength characteristics of the fastening system elements. *E3S Web of Conferences*, 123 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301006>
48. Ляшенко, В. І., & Столярів, В. Ф. (2022). Перспективи потенціалу підземного вуглевидобутку у повоєнному зміцненні обороноздатності держави. *Економічний вісник Донбасу*, (2 (68)), 124-130. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2\(68\)-124-130](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2(68)-124-130)
49. Дубовик, О. І. (2020). Стан і перспективи розвитку вугільної промисловості України. *Перспективи розвитку будівельних технологій: 14-а міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів та студентів*, 33-37.
50. Бондаренко, В.І., Шека, І.В., Цівка, Є.С., & Ковалевська, І.А. (2021). *Арочне піддатливе кріплення* (Патент № 148329 на корисну модель, Україна, МПК E21D 11/14. № u2020 08107; опубл. 28.07.2021, Бюл. № 30)
51. 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)
52. 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*, 1149 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1149/1/012026>
53. Бондаренко, В., Шека, І., & Цівка, Є. (2020). Розробка інноваційного виду кріплення із композитних матеріалів для гірничих виробок вугільних шахт. *Ukrainian School of Mining Engineering 2021*, 59–63. <https://doi.org/10.33271/usme15.059>
54. 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>

55. Bazaluk, O., Rysbekov, K., Nurpeisova, M., Lozynskyi, V., Kyrgizbayeva, G., & Turumbetov, T. (2022). Integrated monitoring for the rock mass state during large-scale subsoil development. *Frontiers in Environmental Science, 10*
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.852591>
56. 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>
57. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Cawood, F., Husiev, O., Snihur, V., & Jimu, D. (2021). Development and testing of an algorithm for calculating the load on support of mine workings. *Mining of Mineral Deposits, 15*(1), 1-10.
<https://doi.org/10.33271/mining15.01.001>
58. 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>

ABSTRACT

Purpose. To analyze composite materials and prospects of their use for roof support in coal mines.

Research methodology. To achieve this purpose, we used analytical data on the market of composite materials, the volume of their production capacity, and cost indicators. Data on the physical and mechanical properties of composite materials and their quantitative indicators were used.

Research results. The areas of application of composite materials in industry are analyzed and summarized. The analysis shows that composite materials are used in many areas of industry: medicine, construction, defense, etc. A comparative analysis of the physical and mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastic and steel shows that this composite material has identical (and sometimes even better) properties than metal materials. The study concluded that it is better to use carbon fiber as a support material for mine workings in coal mines. The advantages and disadvantages of carbon fiber-reinforced plastic as a roofing material for coal mine workings are evaluated. It is clarified that the current limiting factor is the cost of carbon fiber-reinforced plastic, but over time, their price will decrease and their demand will increase. It is concluded that the use of this composite material in the elements of mine support can increase the pace of their implementation, reduce the labor intensity of the work performed and improve the working conditions of miners while lightening the structure.

Scientific novelty. The physical and mechanical properties of composite materials have been analytically determined and it has been substantiated that carbon fiber-reinforced plastic supports can be used in the support of preparatory workings in coal mines.

Practical value. The obtained results prove that the support made of carbon fiber-reinforced plastic will facilitate the design of the support, which, together with the acceleration of the shift operation, will contribute to the development of underground coal mining.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic, mine workings, composite material, support, stress-strain state, physical and mechanical properties.