



УДК 621.791

## FEATURES OF THE USE OF MATERIALS AND COATINGS FOR THE EFFICIENT WORK OF EQUIPMENT IN THE MINING INDUSTRY

### ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ В ГІРНИЧОДОБУВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

**Ranchuk M. / Панчук М.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-4898-2707

**Ranchuk A. / Панчук А.***PhD / док. філософії*

ORCID: 0000-0002-4898-2707

**Matviienkiv O. / Матвієнків О***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.***Kryshchop S. / Криштопа С.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф***Martyniuk R. / Мартинюк Р.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, Ukraine  
Івано-Франківський національний університет нафти і газу, Івано-Франківськ Україна*

**Анотація.** В роботі проведено аналіз ефективності застосування матеріалів та покриттів для виконання технологічних процесів у гірничодобувній галузі. Використання інженерних матеріалів, таких як полімери, метали та керамічні покриття є доцільним для різних нішевих ситуацій. Визначено, що причиною виходу з ладу машин та механізмів в основному є процеси стирання, корозії та корозійно-абразивного зношування. Встановлено, що найкращий захист поверхонь технологічного обладнання від наведених негативних факторів забезпечують металоматричні покриття, які складаються з нікелевої матриці та карбиду вольфраму (Ni-WC). Карбід вольфрамові покриття володіють найвищими механічними властивостями, що дозволяє їм значно подовжити термін служби гірничодобувного обладнання. Разом з тим вартість карбід вольфрамових покриттів так само є найвищою. Таким чином на основі проведених досліджень перспективним можна вважати застосування комбінованих видів покриттів. Подальші наукові дослідження повинні бути направлені на розроблення процесів надійного з'єднання між собою елементів комбінованих покриттів.

**Ключові слова:** абразивне зношування, корозія, карбід вольфраму, комбіноване покриття, полімерні матеріали

### Вступ.

Гірничодобувна промисловість належить до провідних галузей глобальної економіки. Вона являє собою комплекс виробництв у сфері видобутку й збагачення корисних копалин базових металів, благородних металів, залізних, уранових руд, вугілля, алмазів, вапняку, калієвого польового шпату (поташу), графіту, азбесту, слюди, глини та інших мінеральних матеріалів тощо [1]. До



гірничодобувної промисловості також відноситься видобуток нафти й газу.

Вплив сучасної гірничодобувної промисловості як окремо взятої галузі на світову економіку постійно зростає. За цього бюджети на розвідку корисних копалин за останні роки зросли приблизно на 16%. Такий сплеск зумовлений збільшенням попиту на рідкісноземельні елементи, промислові мінерали та дорогоцінні метали [2].

Устаткування для гірничодобувної промисловості є основою її діяльності та використовується для виконання технологічних операцій таких, як різання, свердління, земляні роботи, навантажувальні, розвантажувальні роботи тощо. Ключові категорії інструментів включають бурові долота, різальні зубці, гудзикові коронки та зносостійкі компоненти, розроблені для роботи з абразивними матеріалами та екстремальними умовами експлуатації [3].

Робота обладнання, що відбувається в надзвичайно складних експлуатаційних умовах, неминуче вимагає переробки різноманітних твердих частинок гірських порід, які спричиняють інтенсивний знос поверхонь його вузлів та механізмів, що може приводить до зупинки та вимушених простоїв. [4].

У світовому масштабі економічні втрати, спричинені зносом інструментів під час видобування корисних копалин, становлять 327 мільярдів доларів США щорічно. Споживання енергії у світовій гірничодобувній промисловості становить 6,2% від загального світового споживання енергії, де 17,4% споживаної енергії у видобутку корисних копалин використовується для відновлення та заміни деталей, необхідних через знос [5].

Таким чином дослідження властивостей матеріалів та їхнього раціонального застосування з метою зменшення впливу негативних чинників на роботу технологічного обладнання у гірничодобувній галузі промисловості є актуальним питанням.

**Методи досліджень .** Методологія дослідження базується на якісному та кількісному огляді літератури, що включає дослідження властивостей матеріалів та покриттів, які використовуються для модифікації поверхонь технологічного обладнання гірничодобувної галузі.



## 1. Негативні чинники для умов гірничодобувної галузі

У гірничодобувній промисловості машини та агрегати зазвичай стикаються з складними умовами експлуатації та проходять випробовування на межі своїх можливостей. Ці екстремальні умови передбачають дію високих температур, корозійних хімічних речовин, високого тиску, абразивного зносу, різноманітних ударів і ставлять унікальні виклики, які вимагають спеціалізованих стратегій проектування та захисту поверхонь технологічного обладнання.

Загалом умови експлуатації технологічного обладнання підкреслюють критичну необхідність у сучасних матеріалах та захисних покриттях для забезпечення його довговічності та необхідної продуктивності.

Високі температури створюють серйозну загрозу для структурної цілісності та довговічності поверхонь [6]. Під час добування породи за допомогою операцій буріння та різання температура робочих органів може досягати 300<sup>0</sup>C [7]. Високотемпературне середовище сприяє деградації поверхонь обладнання внаслідок окислення, сульфітації, термічної втоми та трибологічних механізмів зношування, включаючи стирання, ковзання та ерозію. Ці чинники скорочують термін служби компонентів та погіршують продуктивність роботи обладнання в цілому [8].

Матеріали та покриття з високою термостійкістю є важливими чинниками для запобігання пошкодженню обладнання внаслідок тривалого впливу високих температур. Вибір матеріалів для покриття та методів його нанесення повинен враховувати рівні термічного впливу, умови навантаження та хімічну взаємодію.

Під час видобування корисних копалин та їхнього транспортування матеріали поверхонь обладнання регулярно піддаються впливу високо агресивних хімічних речовин, що прискорюють їхню деградацію. Ці середовища включають не тільки хімічний вплив, але й механічний знос, що призводить до складного режиму руйнування, відомого як трібокорозія, де тертя та корозія діють синергетично, пошкоджуючи поверхні матеріалів [9,10]. Глобальний економічний тягар корозії є величезним. Автори [11] оцінюють світову вартість пошкоджень від корозії в 1,8 трильйона доларів США станом на 2001 рік.



Хімічні речовини, такі як  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , кислоти, луги та іони хлориду, викликають локалізовані явища корозії, включаючи точкову корозію, щілинну корозію та корозійне розтріскування під напругою [12]. Ці ефекти порушують структурну цілісність трубопроводів, клапанів, реакторів та компонентів буріння.

Для вирішення проблеми необхідним є використання відповідних матеріалів, спеціалізованих покриттів або композитних матеріалів, стійких до хімічного впливу, які запобігають швидкому зносу обладнання при контакті з цими агресивними речовинами.

Середовища високого тиску та високоабразивні середовища, такі як ті, що зустрічаються під час глибоководних видобувних робіт, підземного буріння та переробки корисних копалин, становлять серйозну загрозу для цілісності матеріалів [13]. Ці середовища характеризуються екстремальним гідростатичним тиском, механічним стиранням від частинок та коливальними навантаженнями, що може спричинити швидкий знос та корозію [14].

Однак, більшість дослідників гірничодобувної галузі сходяться на думці, що найбільш значними чинниками, що призводять до виходу з ладу машин та механізмів є стирання, корозія та корозійно-абразивне зношування.

Таким чином покриття для гірничодобувної промисловості повинні забезпечувати надзвичайну міцність, стійкість до корозії, стирання, ударів та екстремальних температур, щоб захистити обладнання у надзвичайно складних умовах, подовжити термін служби активів, скоротити час простою та знизити витрати на обслуговування, часто характеризуючись високою твердістю, міцною адгезією, хімічною стійкістю та гнучкістю для таких компонентів, як гідравлічні деталі, жолоби та конвеєри.

## **2. Аналіз матеріалів та покриттів**

Для зберігання та переміщення руди на поверхню використовуються бункери та жолоби. Конструкції цих установок сприяють вільному переміщенню матеріалів та дозволяють за цього видаляти різноманітні засмічення. Пил, пісок, каміння та агресивні хімічні речовини є постійною загрозою як у підземному, так



і в відкритому видобутку корисних копалин.

Традиційні матеріали, такі як гума, сталь або стандартні полімери, швидко руйнуються в цих умовах, що призводить до поломок, трудомістких заміन та погіршення умов безпеки. Для ефективної роботи установок їхні поверхні доцільно модифікувати за допомогою поліетилену з надвисокою молекулярною масою – UHMW-PE [15].

Завдяки надзвичайній стійкості до стирання, своїм самозмащувальним властивостям та високій ударній міцності, поліетилен UHMW-PE забезпечує надійну роботу та не потребує регулярної заміни. Особливістю використання UHMW-PE є те, щоб порода до бункера чи жолоба повинна подаватися під малим кутом відносно робочих поверхонь установок.

Останнім часом в гірничо-видобувній промисловості для транспортних цілей почали використовуватись труби, виготовлені з поліетилену високої щільності [16]. Завдяки таким властивостям поліетилену, як висока гнучкість, малий коефіцієнт тертя, значна стійкість до стирання, надійна герметичність з'єднань ці труби використовуються для постачання технічної води, транспортування шламу і пульпи, виготовлення систем дегазації тощо.

Разом з тим на стійкість до стирання в поліетиленових трубопроводах більше ніж в металевих впливає морфологія абразивних частинок - абразивне середовище повинно мати округлу, а не кутову форму. Тому перед їхнім встановленням потрібно провести дослідження в конкретних виробничих умовах. За цього дані лабораторних досліджень можуть суттєво відрізнятись від результатів отриманих на виробництві.

Металеві матеріали та сплави використовуються протягом останніх кількох десятиліть у гірничодобувній промисловості завдяки таким привабливим властивостям, як задовільна міцність, твердість, довговічність, пластичність та в'язкість [17].

Одним з таких матеріалів є нержавіюча сталь. Завдяки своїм високим механічним властивостям, стійкості до корозії та можливості очищення, яке не потребує значних зусиль, нержавіюча сталь стала надійним компонентом, що



використовується на багатьох гірничодобувних підприємствах [14].

Завдяки утворенню пасивного шару оксиду хрому ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) на поверхні металу, нержавіюча сталь є стійкою до корозії навіть у суворих умовах з їдкими хімікатами, високими температурами та надмірною вологістю.

Встановлено, що для утворення захисної плівки на поверхні низьковуглецевої сталі, що піддається змішаному зносу та корозії, потрібно від 20 до 60 секунд, то для утворення пасивного шару оксиду хрому ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) на нержавіючій сталі цей час на 20% менший.

Більшість одиниць обладнання з нержавіючої сталі для гірничодобувної промисловості мають триваліший термін служби порівняно з машинами та пристроями, виготовленими з інших металів. Крім того, нержавіюча сталь повністю придатна для вторинної переробки, що робить її добрим вибором для екологічно чистих гірничих практик.

В роботі [18] досліджувалось якість та тип матеріалів, що використовуються для захисного покриття завантажувального жолоба, що використовується на підприємствах гірничодобувної промисловості.

Завантажувальний жолоб дробарки схильний до передчасного зносу, що призводить до частих зупинок для технічного обслуговування. Технічне обслуговування зазвичай передбачає заміну існуючого захисного покриття, яке зазвичай виготовляється з галоген бутилкаучуку. Повторюваний характер цих операцій підкреслює важливість збільшення середнього часу між відмовами (MTBF) жолоба. Технічне обслуговування є дорогими та підкреслює необхідність більш міцного захисного покриття.

Авторами роботи було проведено аналіз різних моделей завантажувальних жолобів, виготовлених з таких матеріалів, як галоген бутилкаучук, нержавіюча сталь 316 (аналогом в Україні вважають марку 07X18H13M2) та керамічні матеріали. Проведені дослідження показують, що керамічний матеріал демонструє найсприятливіші характеристики захисного покриття, з швидкістю ерозії  $06,636753 \text{ кг/м}^2\text{с}$ , що перевершує галоген бутилкаучук ( $3,326576 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ) та нержавіючу сталь 316 ( $2,186633 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ). Дані досліджень наведені в таблиці 1.



**Таблиця 1. Швидкість ерозії для досліджуваних матеріалів**

Матеріали	Швидкість ерозії, кг/м <sup>2</sup> с [18]	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Вартість, USD/кг
галоген бутилкаучук	3,326576	920...960 [19]	2,5 ... 2,7 [20]
нержавіюча сталь 316	2,186633	8000 [21]	4,20...6,20 [22]
Керамічні матеріали	0,6636753	14900 [23]	150 [23]

*Авторська розробка*

Результати, представлені в таблиці вказують на те, що керамічні покриття покращують зносостійкість та подовжують термін служби гірничодобувного обладнання.

Керамічні матеріали довели свою надзвичайну ефективність у захисті від зносу, особливо в умовах високого стирання та температур. Ці матеріали мають високу твердість та стійкість до корозії, що робить їх ідеальними для використання в екстремальних умовах. Крім того, здатність підтримувати структурну стабільність за високих температур робить їх кращим вибором у галузях промисловості, де потрібна довготривала міцність та експлуатаційні характеристики [24,25].

Керамічне покриття подовжує термін служби гірничодобувного обладнання та зменшує незаплановане технічне обслуговування через передбачуваний знос. Після нанесення керамічних покриттів обладнання працює з очікуваною швидкістю зносу та може бути відремонтоване під час планового технічного обслуговування.

Тривалий період простою є дорогим і складним для діяльності підприємства, коли незахищене обладнання виходить з ладу катастрофічно та не передбачувано. Запасні частини також можуть бути досить дорогими та складно доступними. Такі обставини вимагають застосування передового покриття на основі керамічних матеріалів для конкурентоспроможності на ринку та прибутковості порівняно з іншими галузями промисловості [26].

Варто відзначити, що покриття на основі чистого карбїду через його



крихкість погано працюють в умовах ударного навантаження [27]. Тому існує потреба в міцному матричному матеріалі з відносно високою твердістю та низькою вартістю [28].

Зазвичай як покриття використовується комбінація різних керамічних матеріалів, що забезпечує високу стійкість до корозії, нагрівання та стирання. Поширені керамічні матеріали та їх комбінації включають наступні: карбід кремнію (SiC), карбід барію ( $B_4C$ ), карбід титану (TiC), кремнезем ( $SiO_2$ ), карбід вольфраму (WC), глинозем  $Al_2O_3$  та інші.

Захисні властивості вищезгаданих покриттів значною мірою залежать від рецептури та методу нанесення. Одним із ефективних способів поєднання високих зносостійких властивостей кераміки з формувальною здатністю металів є нанесення композитних матеріалів за допомогою процесів наплавлення.

Найчастіше у зносостійких покриттях, що наносяться за допомогою наплавлення використовуються системи карбід нікелю-вольфраму (Ni-WC).

Карбід вольфраму зазвичай застосовується, як частина композитного покриття на основі матриці, виготовленої з нікелю з додаванням сплаву бору, кремнію і хрому. Система матеріалів Ni-WC відрізняється від інших систем твердосплавного наплавлення NbC, TiC,  $B_4C$  та CCO тим, що карбіди вольфраму не утворюються на місці (*in situ*) під час затвердіння, а радше повинні витримати термічний цикл зварювання.

Зносостійкі властивості покриттів Ni-WC зумовлені наявністю карбиду вольфраму. Покриття Ni-WC мають високі значення твердості та надзвичайно високу в'язкість порівняно з іншими карбідами.

Керамічні покриття в основному використовуються для захисту базових сплавів від гарячої корозії та окислення, а також для мінімізації пошкоджень від зносу. Ще однією функцією керамічних покриттів є зниження температури основного металу у випадку термобар'єрних покриттів [8]. Керамічні матеріали мають багато передових властивостей, таких як термостійкість, корозійна стійкість, зносостійкість та електроізоляція.

Карбіди здійснили революцію в галузі. Зростання використання твердих



металів у гірничодобувній промисловості та в обробці сталі призвело до значного зростання попиту на вольфрам.

Основним напрямком застосування карбіду вольфраму на гірничодобувних підприємствах є виконання бурових робіт, де карбідні долота для видобутку корисних копалин слугують передовим інструментом у розвідці та видобутку корисних копалин.

Твердосплавні долота для гірничої справи, виготовлені переважно з надзвичайно твердого карбіду вольфраму, є важливими ріжучими інструментами для буріння міцних гірських порід та твердих утворень завдяки своїй високій твердості, міцності та зносостійкості. Твердість карбіду вольфраму, яка становить 8,5-9,0 балів за шкалою Мооса, забезпечує стабільну продуктивність буріння в граніті, кварциті та інших складних типах гірських порід.

Застосування зносостійких деталей з карбіду вольфраму в гірничодобувних виробках виходить за рамки буріння та систем обробки матеріалів. В операціях дроблення використовуються зносостійкі вкладиші з карбіду для гірничодобувного обладнання для захисту критичних поверхонь від абразивних рудних матеріалів. Ці захисні компоненти стратегічно розташовані в щекових дробарках, конусних дробарках та ударних дробарках, де потік матеріалу створює найвищі характеристики зносу.

Вибір відповідних ріжучих інструментів з карбіду вольфраму для гірничодобувних робіт вимагає ретельного врахування твердості руди, обсягу обробки та бажаного розподілу розмірів частинок. Компоненти з карбіду вольфраму гірничодобувного класу в схемах дроблення зазвичай мають спеціалізовану геометрію, оптимізовану для певних типів руди, незалежно від того, чи переробляється м'яке вугілля, чи тверді металеві руди.

З огляду на вищезазначені аргументи, як кераміка, так і сталь є перспективними матеріалами для потенційного подовження середнього терміну між поломками жолоба. Можна розглянути кілька рішень, включаючи повну заміну захисного покриття або локальну заміну, спрямовану на виявлені ділянки, схильні до ерозії. При виборі між керамікою та нержавіючою сталлю 316 слід



враховувати економічні, фінансові та технічні фактори.

Альтернативна пропозиція передбачає поєднання галогенованого бутилкаучуку з керамікою або нержавіючою сталлю. Галогенований бутилкаучук, будучи еластичним, забезпечує амортизацію ударів на відміну від пластичної і жорсткої кераміки та нержавіючої сталі 316. Хоча кераміка та сталь мають кращу стійкість до стирання порівняно з каучуком, гібридне покриття може поєднувати еластичність каучуку з твердістю кераміки або нержавіючої сталі 316, створюючи каучуково-керамічні та/або каучуково-нержавіючі сталеві покриття [18].

Для гумокерамічного покриття це може означати використання гуми відповідної форми та рельєфу для розміщення керамічних блоків, зібраних за допомогою високотехнологічних способів з'єднання. Крім того, затискні отвори можуть бути стратегічно розміщені в стійких до ерозії зонах для надійного кріплення нового покриття до жолоба. Ретельний розгляд цих варіантів є критично важливим, враховуючи конкретні експлуатаційні вимоги та обмеження гірничого середовища.

### **Висновки:**

В роботі досліджено особливості роботи обладнання у гірничодобувній промисловості. Визначено, що причинами руйнування поверхонь технологічного обладнання в основному є процеси стирання, корозії та корозійно-абразивного зношування.

Проведений аналіз показав, що для протидії вказаним чинникам можна використовувати полімерні матеріали, нержавіючу сталь а також композитні покриття. Встановлено, що найкращий захист поверхонь технологічного обладнання від наведених негативних факторів забезпечують металоматричні покриття, які складаються з нікелевої матриці та карбиду вольфраму (Ni-WC). І хоча карбід вольфрамові покриття володіють найвищими механічними властивостями, що дозволяє їм значно подовжити термін служби гірничодобувного обладнання, вартість цих покриттів так само є найвищою. Тому, за результатами досліджень можна вважати перспективним застосування



комбінованих видів покриттів. Подальші наукові дослідження повинні бути направлені на розроблення процесів надійного з'єднання між собою елементів комбінованих покриттів.

### **Література:**

1. Radebe, N., & Chipangamate, N. (2024). Mining industry risks and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets. *Resources Policy*, 91(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104887>.

2. Медвідь, Ю. В., Витвицький, В. С., Гавкалюк, В. І., & Присяжнюк, П. М. (2024). Розроблення нових армівних фаз системи MO<sub>2</sub>FE<sub>1</sub>-XCRXB<sub>2</sub> для зміцнення робочих поверхонь нафтогазового обладнання. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (2(57)), 7–14. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2\(57\)-7-14](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2(57)-7-14)

3. Wang, S-H., Tadic, D., Jiang, J., Mckinnell, J. (2016). Weld cladding for mining and mineral processing: a Canadian perspective. *CWA J* 16:52–66.

4. Tang, L., Wang, P., Ma, Z., Pauliuk, S., Chen, W.-Q., Dai T., Lin Z. (2023). Exploring the global trade networks of the tungsten supply chain: Insights into the physical and monetary mismatch among countries. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 27. No 1. P. 323–335. <https://doi.org/10.1111/jiec.13333>

5. Buzauova, T, Sherov, K., Algazy, Zh. Turusbekova, A. (2019). Study of wear and restoration of the mining machines parts: Monograph. Karaganda State Technical University. – Warsaw: iScience Sp. z o. o. - 126 p.

6. Antony Jose S., Lapiere, Z., Williams, T., Hope, C., Jardin, T., Rodriguez, R., Menezes, P.L. (2025) Wear- and Corrosion-Resistant Coatings for Extreme Environments: Advances, Challenges, and Future Perspectives. *Coatings*. 15(8):878. <https://doi.org/10.3390/coatings15080878>

7. Xu, J., Li. C., Dang, J., El Mansori, M., Ren, F. A. (2018) Study on Drilling High-Strength CFRP Laminates: Frictional Heat and Cutting Temperature. *Materials*. 11(12):2366. <https://doi.org/10.3390/ma11122366>

8. Ndumia, J.N., Kang, M., Gbenontin, B.V., Lin, J., Nyambura, S.M. (2021). A



Review on the Wear, Corrosion and High-Temperature Resistant Properties of Wire Arc-Sprayed Fe-Based Coatings. *Nanomaterials* , 11, 2527

9. Panchuk, M., Shlapak, L., Panchuk, A., Szkodo, M., Kiełczyński, W. (2016) Perspectives of use of nanocellulose in oil and gas industry. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. Vol. 3 (2). P. 79-84.

10. Panchuk, M., Sładkowski, A., Panchuk, A., Oleksienko, S. (2022) Perspectives of Plastic Pipes use in Shipbuilding and Marine Industry. *Naše More*. Vol. 69 (1). P. 70–76.

11. Bender, R., Féron, D., Mills, D., Ritter, S., Bäßler, R., Bettge, D., De Graeve, I., Dugstad, A., Grassini, S., Hack, T. (2022) Corrosion challenges towards a sustainable society. *Mater. Corros.* 73, 1730–1751.

12. Zhao, X., Huang, W., Li, G., Feng, Y., Zhang, J. (2022) Effect of CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S and Applied Stress on Corrosion Behavior of 15Cr Tubing in Oil Field Environment. *Metals*. 10, 409

13. Yao, W., Tian, C., Teng, Y., Diao, F., Du, X., Gu, P., Zhou, W. (2025). Development of deep-sea mining and its environmental impacts: A review. *Front. Mar. Sci.* 12, 1598584.

14. Karuppasamy, S., Natarajan J., and Che-Hua Y. (2023). "27 Application of Corrosion-Resistant Laser Claddings." *Handbook of Laser-Based Sustainable Surface Modification and Manufacturing Techniques* 51, no. 51

15. Du, Z. , Wang, J. , Wen, S. , Wang, P. , Zhang, D. and Yin, C. (2015). Study on the Properties of UHMW-PE Film. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 5, 337-343. doi: [10.4236/ampc.2015.58033](https://doi.org/10.4236/ampc.2015.58033)

16. Assaf, R., Haddad, T., Kanan, M. (2019) Improving the quality of high density polyethylene pipes using design of experiments. *Int J Eng Technol*; 8(2): 120–127.

17. B. S. Dhillon, *Mining equipment reliability*. Springer, 2008.

18. Kalala, M., Kisula, P., Muheme, I. (2024). Numerical analysis of a protective coating for mining industry feed chute. *J. Eng. Appl. Sci.* 71, 119. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00452-4>

19. What does density say?. <https://circularrubberplatform.com/glossary/density>



20. Halo Butyl Ruber Prise Trends By Country. <https://www.price-watch.ai/halo-butyl-rubber-prices/>

21. Density of Stainless Steel 316. <https://www.amardeepsteel.com/blog/density-of-stainless-steel-316.html>

22. 316 Stainless Steel Price: Comprehensive Market Analysis and Buying Guide 2025. <https://ssalloy-steel.com/price/316-stainless-steel-price/>

23. Mendez, P.F., Barnes, N., Bell, K., Borle, S.D., Gajapathi, S.S., Guest, S., Izadi, H., Gol, A.K., & Wood, G. (2014). Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, 16, 4-25

24. Pavan, C. M., & Dr. Narendra Babu, B. R. (2018). Review of Ceramic Coating on Mild Steel Methods, Applications and Opportunities. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)*, ISSN:2454-8006, DOI: 10.31695/IJASRE, 4(7), 44–49. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2018.32792>

25. Valizadeh Harzand, F., Samandizade, E., Yazdani Diziche, & Nematollahzade, A. (2025). Ceramic coatings for extreme environments and energy systems: A review. *Synthesis and Sintering*. 5(2), 136-150. <https://doi.org/10.53063/synsint.2025.52289>.

26. EPCM Holdings (n.d) Protective ceramic coatings in mining industry-materials & methods. (2024). [Online] Available from: <https://epcmholdings.com/protective-ceramic-coatings-in-mining-industry-materials-methods/#:~:text=A%20ceramic%20coating%20extends%20the,repared%20during%20scheduled%2C%20routine%20maintenance.>

27. Kleis, I., Kulu, P. (2008). Solid Particle Erosion. Occurrence, Prediction and Control. Springer-Verlag London Limited. 201 p

28. Surzenkov, A., Kulu, P., Tarbe, R., Mikli, V., Sarjas, H., Latokartano, J. (2009) Wear Resistance of Laser Remelted Thermally Sprayed Coatings *Estonian Journal of Engineering* 15 (4): pp. 318 – 328



**Abstract.** *The article analyses the effectiveness of using materials and coatings for technological processes in the mining industry. The use of engineering materials such as polymers, metals and ceramic coatings is appropriate for various niche situations. It has been determined that the main causes of failure of machines and mechanisms are abrasion, corrosion and corrosive-abrasive wear. It has been established that the best protection of technological equipment surfaces from negative factors is provided by metal matrix coatings consisting of a nickel matrix and tungsten carbide (Ni-WC). Tungsten carbide coatings have the highest mechanical properties, which allows them to significantly extend the service life of mining equipment. At the same time, the cost of tungsten carbide coatings is also the highest. Thus, based on the research conducted, the use of combined types of coatings can be considered promising. Further scientific research should be directed towards developing processes for reliably bonding the elements of composite coatings together.*

**Key words:** *abrasive wear, corrosion, tungsten carbide, composite coating, polymer materials.*

Статтю надіслано: 19 січня 2026 року.