

УДК 622.273.21

DOI: 10.31474/2415-7902-2024-2-13-78-90

Петльований М.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ГІДРАТАЦІЇ ТА РАННІХ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТОВАНОГО ПАСТОВОГО ЗАКЛАДАННЯ НА ОСНОВІ ХВОСТІВ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНИХ РУД

Мета. Експериментальні дослідження кінетичних особливостей процесу гідратації в'язучого матеріалу та їх взаємозв'язку з міцнісними характеристиками традиційних пастових закладних сумішей на основі портландцементу та хвостів збагачення, що створює основу для подальшого проєктування ефективних і економічних рецептур закладних сумішей з можливістю використання альтернативних в'язучих матеріалів.

Методика. Для досягнення мети у роботі застосовано лабораторні дослідження процесу приготування пастових закладних сумішей на основі хвостів збагачення з варіацією вмісту цементу у твердій частині 3, 6 та 9%, що охоплює діапазон, який застосовується у закордонній практиці закладних робіт. Для оцінки інтенсивності та кінетики гідратації використано параметр електропровідності, що вимірювався кондуктометром ВТ 761. Для дослідження міцності на стиск зразків закладання використано ручний гідравлічний прес з робочим тиском до 25 МПа.

Результати. Встановлено хвилеподібну динаміку зміни величини електропровідності з часом при різному вмісті цементу в пастовій закладній суміші. Виявлено закономірність зміни досягнутих пікових значень електропровідності при різному вмісті цементу в пастовій закладній суміші. Отримано закономірності динаміки зміни у часі ранньої міцності пастового закладання при різному вмісті цементу. Виявлено закономірності зв'язку електропровідності пастових закладних сумішей з їх міцнісними характеристиками при різних термінах твердіння.

Наукова новизна. Вперше експериментально вивчені кінетичні особливості гідратації та міцнісні характеристики цементованого пастового закладання на основі цементу і хвостів збагачення залізних руд одного з гірничо-збагачувальних комбінатів України.

Практична значимість. Результати досліджень будуть корисними для оптимізації складу цементованого пастового закладання залежно від вимог до міцності, термінів твердіння та економічності, особливо в умовах пошуку нових альтернативних видів в'язучого матеріалу.

Ключові слова: пастове закладання, в'язучий матеріал, гідратація, електропровідність, міцність, кінетика.

Вступ.

В умовах стрімкого технологічного прогресу видобуток мінеральних ресурсів набуває пріоритетного значення, забезпечуючи людство необхідною сировиною для багатьох ключових галузей, таких як енергетика, металургія, будівництво, машинобудування, хімічна промисловість, інформаційні технології, медицина, військові технології тощо [1, 2]. Мінеральні ресурси є основою для виробництва товарів, розробки інноваційних матеріалів та надання різноманітних послуг, що є фундаментом сталого економічного зростання, технологічного оновлення та підвищення якості життя людей. Сьогодні підземним способом видобувається 12-17% всіх корисних копалин (близько 800-850 млн тонн), а понад 80% займає відкритий спосіб розробки [3, 4]. Багатьма дослідженнями доведений деструктивний вплив процесів гірничого виробництва на природне навколишнє середовище, особливо на стан земної поверхні [5, 6].

Внаслідок підземного видобутку на земній поверхні утворюються зони просідання та обвалення, а при відкритому способі – кар'єрні пустоти. За обох способів вилучення мінеральної сировини неминучим є високий рівень відходоутворення [7, 8], який, переважно, представлений накопиченими відвалами пустих порід і хвостосховищами.

Зазначені нові форми гірничо-техногенного ландшафту призводять до втрати родючості ґрунтів та потенціалу раціонального використання земельних площ, зменшенню біорізноманіття, зміни гідрологічних режимів підземних вод, несуть небезпеку населенню й цілісності інфраструктурних об'єктів.

З причини мінімізації шкідливого впливу на природне навколишнє середовище широкого розповсюдження набуло застосування технологій закладання виробленого простору, особливо при підземному способі [9-11]. Сьогодні на передових шахтах світу при видобуванні металевих руд, кам'яного вугілля та інших видів корисних копалин розповсюдження набули різні технології закладання, які класифікуються на сипуче породне закладання, цементоване породне закладання, цементоване пастове закладання. При відкритому способі розробки різноманітні технології закладання розповсюдження не набули. Закладання відоме більше як гірничотехнічний етап рекультивації кар'єрних пустот і, здебільшого, використовується їх традиційне засипання пустими відвальними породами за умов їх достатніх заскладованих поруч об'ємів.

Однією з важливих екологічних проблем гірничодобувних галузей різних країн світу є утворені хвостосховища, які не лише забруднюють довкілля, займають значні площі, але й становлять загрозу екологічних катастроф внаслідок прориву їх дамб [12-14]. У зв'язку з необхідністю утилізації даного типу відходів розповсюдження на закордонних шахтах отримало цементоване пастове закладання, основою якого є саме дрібнодисперсні хвости збагачення.

В Україні на гірничих підприємствах технології закладання не знайшли широкого розповсюдження. Серед монолітних способів закладання застосовується цементоване породне закладання лише на двох рудниках [15]. Існує також суттєва проблема з накопиченими хвостами збагачення залізних руд та вугілля. Тільки у Криворізькому залізорудному басейні накопичено близько 4,3 млн тонн хвостів збагачення залізних руд на площі понад 6000 га. Хвости збагачення у закладних сумішах не утилізуються, а, здебільшого, використовуються для облаштування дамб хвостосховищ. Такий закладний матеріал може бути з користю використаний на гірничих підприємствах у технологіях пастового закладання як підземних, так і в перспективі для поверхневих техногенних пустот [16]. Використання технології цементованого пастового закладання для відновлення порушеної земної поверхні є новим і перспективним підходом до раціонального природокористування в промислово розвинених регіонах України [17].

Для проектування і вибору раціональних складів пастових закладних сумішей суттєве значення має вивчення інтенсивності протікання процесів гідратації в'язучих речовин та характеристика набору міцності закладного масиву. Більше того, представляє інтерес визначення цих властивостей на основі хвостів збагачення залізних руд українських гірничо-збагачувальних комбінатів, що здійснюється вперше у цьому науковому дослідженні.

Метою дослідження є визначення кінетичних особливостей процесу гідратації в'язучого матеріалу та їх взаємозв'язку з міцнісними характеристиками традиційних пастових закладних сумішей на основі портландцементу і хвостів збагачення, що створює основу для подальшого проектування ефективних та економічних рецептур закладних сумішей з можливістю використання альтернативних в'язучих матеріалів.

У представленому дослідженні вперше експериментально вивчаються характеристики цементованого пастового закладання на основі хвостів збагачення залізних руд одного з гірничо-збагачувальних комбінатів України.

Методологія дослідження.

Згідно значного набутого досвіду застосування цементованого пастового закладання у вироблених просторах шахт діапазон вмісту компонентів у суміші є наступним [18, 19]: дрібнодисперсні хвости збагачення (70-85%), в'язучий матеріал (2-10%) та вода (15-25%). При перемішуванні зазначених закладних матеріалів утворюється суміш, яка за консистенцією та властивостями нагадує пасту. Важливим параметром закладної суміші є вміст твердої частини (вага в'язучого та інертного матеріалу), що визначає подальші транспортабельні характеристики закладної суміші та міцність сформованого закладного масиву. Діапазон вмісту твердої частини у складі пастової суміші, згідно набутого досвіду, складає 70-80%.

Для досягнення поставленої мети в лабораторних умовах здійснено виготовлення пастових закладних сумішей, визначено їх кінетику гідратації та досліджено міцнісні характеристики. В якості інертного та основного матеріалу використовувались дрібнодисперсні хвости збагачення залізних руд Полтавського ГЗК, розмір частинок -44 мкм склав 50-60%, насипна щільність 1,62 т/м³. В якості в'язучої речовини використовували портландцемент М 500 виробника ПрАТ «Кривий Ріг Цемент», насипна щільність якого становить 1,3 т/м³. Для затворіння цементу і хвостів збагачення використовувалась звичайна водопровідна вода (рН = 7,7).

Було виготовлено 3 рецептури пастових закладних сумішей з варіюванням вмісту в'язучого матеріалу (цементу) по твердій частині 3, 6 та 9%. Вміст твердої частини у закладній суміші прийнято 75%, що є середнім показником у діапазоні 70-80% згідно досвіду застосування пастового закладання, а вода складає 25%. Водоцементне співвідношення у закладних сумішах склало 1:11; 1:5,5; 1:3,7. Хвости збагачення у сушильній шафі типу СНОЛ 58/350 висувувались до пилоподібного стану. Далі компоненти пастового закладання згідно запланованих вище рецептур зважувались лабораторними вагами WLC 20/C/1, засипались у ємність, перемішувались у сухому стані з наступним додаванням води. Затворені водою компоненти закладання перемішувались лабораторним міксером протягом 5-7 хвилин до консистенції пасти. Виготовлені пастові закладні суміші заливались у трьохгнізді металеві форми з розміром комірок 70×70×70 мм для випробування на міцність у терміні 3, 7 та 14 днів. Закладна суміш готувалася в об'ємі дещо більшому, ніж потрібно для заливки форми ЗФК-70 у зв'язку з необхідністю окремого дослідження кінетики процесу гідратації. З метою імітації умов заповнення поверхневих техногенних пустот, таких як кар'єрні, які знаходяться у відкритому просторі, зразки закладання після розбирання форм витримували у навколишньому середовищі при температурі 20-25°C та вологості повітря 40-50%.

Для дослідження міцності на стиск зразків закладання використано ручний гідравлічний прес JG-212 з можливістю формування максимального тиску в системі до 25 МПа. Принцип дії пресу полягає в тому, що при натисканні важеля механічного насоса гідравлічне масло переміщує поршень, який чинить тиск на розташовану металічну платформу зі зразком. При випробуваннях на міцність фіксували значення тиску у гідравлічній системі, коли відбулось руйнування зразка й припинялось зростання тиску за причини зникнення опору. Для визначення безпосередньої міцності на стиск зразка закладання спочатку розраховувалась сила, що діє на платформу зі зразком, виходячи із зафіксованого тиску та площі поршня. Оперуючи значенням сили навантаження та вимірної площі поперечного перерізу зразка, обчислювалась міцність на стиск. Перед випробуванням зразків на міцність за допомогою електронного штангенциркулю фіксували точні розміри сторін кубічних зразків закладання.

Для дослідження кінетики процесу гідратації використовували параметр електропровідності (ЕП), яку вимірювали ґрунтовим кондуктометром ВТ 761, що вимірює її значення у діапазоні 0-19,9 мСм/см. Прилад розміщувався у магнітній стінці, електрод якого поглинався у ємність з досліджуваною пастовою закладною сумішшю без в'язучого матеріалу, а також при його вмісті 3, 6 та 9%. Фіксували зміну величини ЕП суміші кожні 0,5-1 год до її стрімкого спаду. В основі дослідження кінетики гідратації було вивчення характеру зміни та пікових величин ЕП у часі.

Певні етапи проведення лабораторних досліджень за вищезазначеними методиками ілюструються на Рисунку 1.

Отриманий масив експериментальних даних кінетики гідратації та міцнісних характеристик закладних сумішей аналізувався, систематизувався та оброблявся за допомогою програми Microsoft Excel для встановлення математичного характеру кореляційних залежностей. Окрема увага приділялась встановленню взаємозв'язку електропровідності закладних сумішей з динамікою набору їх міцності.



(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 1 – Етапи проведення лабораторних досліджень: (а) вигляд консистенції приготовленої пастової суміші; (б) виготовлення зразків пастового закладання; (в) моніторинг величин електропровідності пастової закладної суміші у процесі її твердіння; (г) випробування міцності на стиск

Результати досліджень та обговорення.

Розуміння кінетики процесу гідратації та твердіння пастової закладної суміші є важливим, оскільки дозволяє прогнозувати динаміку процесу набору міцності закладного масиву в часі та визначити оптимальні умови твердіння й підібрати компонентний склад суміші, щоб досягти необхідних механічних характеристик та довговічності з урахуванням економічних вимог.

Для дослідження кінетики процесу гідратації можливо застосувати властивість електропровідності, яку можна виміряти відразу з моменту приготування свіжої пастової закладної суміші до її затвердіння. ЕП є однією з важливих властивостей матеріалів, яка характеризує їх здатність проводити електричний струм. Попередніми авторитетними дослідженнями встановлено, що показник ЕП можна використовувати для оцінки інтенсивності та еволюції гідратації цементу й мікроструктурних трансформацій у зразках пастового закладання [20, 21].

Електропровідність відображає концентрацію іонів у суміші, що пов'язано з розчиненням та взаємодією мінералів компонентів, таких як цемент, дрібні частинки хвостів і вода, та забезпечується за рахунок їх руху. У процесі гідратації розчинених іонів поступово стає менше, оскільки вони беруть участь у формуванні нових твердих кристалічних фаз, і величина ЕП поступово знижується. Отже, електропровідність суміші залежить від кількості (концентрації) іонів та їхньої рухливості – чим більше іонів і вище їх рухливість, тим вищою є провідність. Відстежуючи зміну ЕП з часом, можна оцінити швидкість та етапи гідратації, що допоможе прогнозувати момент, коли суміш досягає певного рівня міцності, а також визначити, наскільки ефективно відбувається твердіння та структуроутворення закладного масиву.

Сьогодні на шахтах і рудниках за кордоном найбільш поширеним видом в'язучого матеріалу у складі цементованого пастового закладання є цемент, вміст якого у зв'язку з його вищою вартістю за умов наявності місцевої мінерально-сировинної бази альтернативних в'язучих матеріалів намагаються зменшити зі збереженням прийнятних механічних характеристик закладного масиву. Тим не менш, цемент є основним в'язучим матеріалом і при дослідженні нових рецептур закладних сумішей варто мати порівняльну характеристику властивостей з закладними сумішами на основі чистого цементу. В умовах нових досліджень цементованого пастового закладання на основі хвостів збагачення залізних руд гірничо-збагачувальних комбінатів першочерговим завданням проектування оптимальних закладних сумішей також повинно стати дослідження їх властивостей на основі чистого цементу.

В результаті виконання серії експериментальних вимірювань величин електропровідності приготовлених закладних сумішей з часом при різному вмісті цементу отримано графіки зміни їх динаміки, що ілюструється на Рисунку 2.

Аналіз Рисунка 2 вказує на хвилеподібний характер гідратації в'язучого матеріалу та дозволяє зробити низку важливих наукових результатів. Так, на початковому етапі (до 400 годин) спостерігається поступове зростання електропровідності для всіх сумішей, що можна пояснити активною фазою гідратації цементу, при чому при вмісті 6 і 9% інтенсивність вища. У цей період у розчині збільшується концентрація іонів через розчинення цементу та утворення гідратних фаз. Також для кожної пастової суміші максимального значення ЕП набуває у різні моменти часу. Суміш з 9% вмістом в'язучого досягає найбільшого піку 4,65 мСм/см через ≈ 300 годин, з 6% значення 4,03 мСм/см – через ≈ 370 годин та із 3%, відповідно, 3,25 мСм/см – через ≈ 460 годин. Також, як видно з Рисунка 2, існує різниця в часі досягнення піку між сумішами з 9% і 3% цементу, яка

становить близько 160 хвилин, що вказує на приблизно 35% різницю у швидкості початку гідратації між ними та на 19% між 9% і 6%.

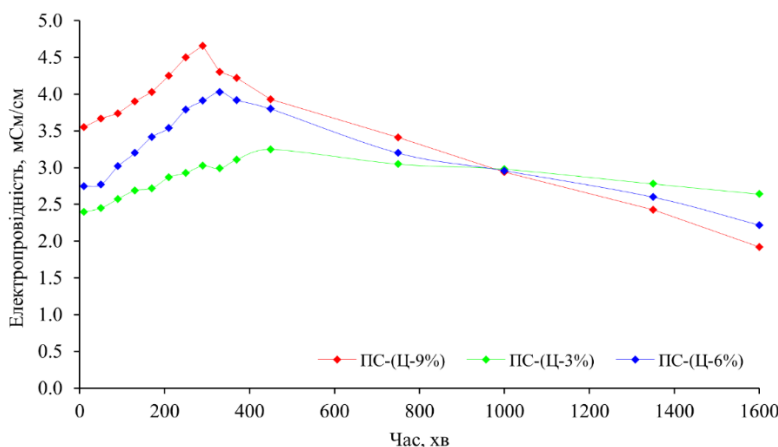


Рисунок 2 – Динаміка зміни величини електропровідності з часом при різному вмісті цементу в пастовій закладній суміші

Для повноти уявлень про кінетичні процеси варто звернути увагу й на ширину пікового діапазону. Більш вузький пік (наприклад, суміші з 9% цементу) вказує на швидке досягнення максимальної іонної активності та швидке зниження концентрації іонів, що може означати стрімке затвердіння і набір ранньої міцності закладного масиву, проте, ймовірно, у пізніх строках твердіння швидкість набору буде знижена, оскільки основні процеси гідратації завершаться швидше. На післяпіковому етапі можна бачити закономірну різницю в інтенсивності зменшення електропровідності пастових сумішей з різним вмістом в'язучого. У цей період іони зв'язуються у тверді фази, такі як гідратовані продукти цементу, що зменшує загальну іонну рухливість в розчині та знижує ЕП. Суміші з більш високим вмістом в'язучого (6 та 9%) демонструють різкіше зниження, що свідчить про завершення процесів гідратації на більш ранньому етапі.

Якщо порівняти максимальні пікові значення електропровідності й вміст цементу у закладній суміші, то існує тісний кореляційний зв'язок між ними, що описується поліноміальною залежністю 3 порядку (Рис. 3).

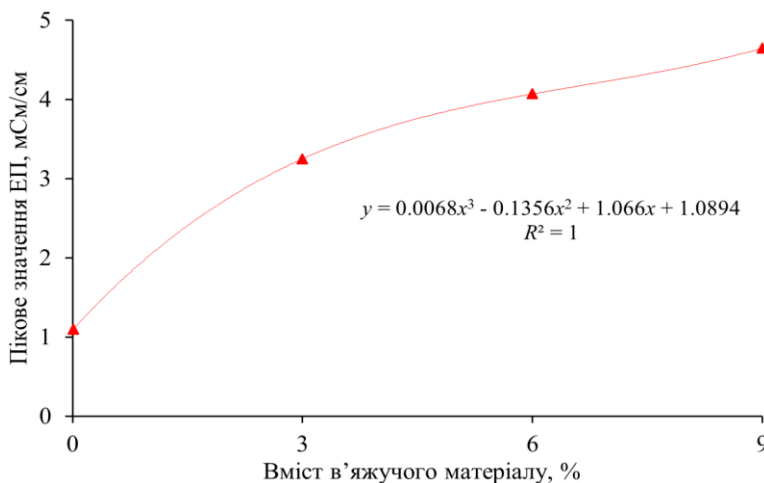


Рисунок 3 – Закономірність зміни досягнутих пікових значень ЕП при різному вмісті цементу в пастовій закладній суміші

Аналіз Рисунка 3 показує, що пікове значення ЕП збільшується зі збільшенням вмісту в'язучого матеріалу у пастовій суміші за поліноміальним законом 3 порядку. Залежність має виражений нелінійний характер та відображає складність процесу гідратації пастової суміші. При низькому вмісті в'язучого (до 3%) зростання електропровідності відбувається менш інтенсивно, проте, при подальшому збільшенні вмісту до 6% і 9% спостерігається більш значне зростання, що вказує на посилення іонних процесів та інтенсивніше протікання гідратації. Результати цих досліджень показують, що ЕП закладної суміші є індикатором активності гідратаційних процесів і залежить від вмісту в'язучого матеріалу, у даному випадку цементу. Збільшення вмісту цементу закономірно прискорює процес гідратації, підвищуючи максимальну електропровідність і скорочуючи час до її зниження.

Величина та ширина пікових діапазонів ЕП пастових сумішей можуть дати корисні дані для прогнозування характеристик міцності пастової закладної суміші. Для цього потрібно оперувати експериментальними даними значень міцності закладання на стиск при різному вмісті в'язучого зразків закладання, що було також зроблено у ході виконання досліджень. Обробка експериментальних даних зафіксованого тиску на гідравлічному пресі та точних вимірювань площі поперечного перерізу зразків закладання дозволили з високою точністю визначити їх міцність на стиск (Рис. 4).

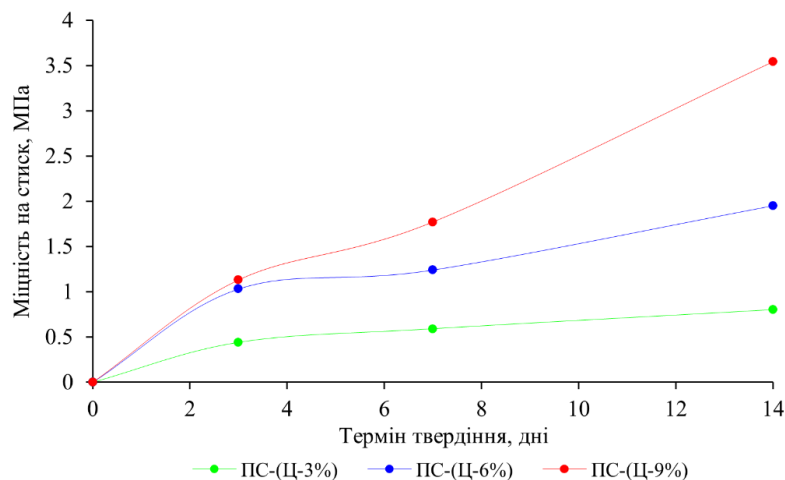


Рисунок 4 – Закономірності динаміки зміни у часі ранньої міцності пастового закладання при різному вмісті цементу в закладній суміші

Аналіз результатів Рисунка 4 показує, що для суміші з 9% цементу є характерним найбільший приріст міцності на стиск на всіх етапах твердіння й на 14 день міцність сягає понад 3,5 МПа. Суміш із 6% цементу демонструє помірне зростання міцності, досягаючи приблизно 2,5 МПа на 14 день, а суміш із 3% цементу – найнижче зростання міцності (близько 1 МПа на 14 день). На ранніх етапах (1-2 день) суміші з 6 і 9% цементу демонструють стрімкий набір міцності, що відповідає даним електропровідності, де вищі піки ЕП вказували на інтенсивні процеси гідратації. Суміш із 3% цементу має значно повільний початковий набір міцності, що відображає та підтверджує слабку іонну активність у процесі гідратації та меншу концентрацію цементних компонентів.

На підставі визначених попередніх експериментальних даних електропровідності можна бачити (Рис. 2), що більш високі піки ЕП для сумішей з 6% і 9% цементу корелюють з вищим рівнем початкової міцності. Висока ЕП вказує на високу іонну активність, що

пов'язано зі швидким утворенням гідратних фаз та набором міцності. Вузька ширина пікового діапазону ЕП для суміші зі вмістом 9% цементу також відображає стрімку та інтенсивну гідратацію, що пояснює її високі характеристики міцності на стиск до 14 дня твердіння. Встановлення математичного характеру залежностей зміни міцності саме з часом при різному вмісті цементу на 14 день твердіння недоцільно проводити зараз. Для більш точного опису динаміки набору міцності потрібні дані у термінах 28, 56 та 90 днів, оскільки характер залежності може суттєво різнитись у віці 0-14 днів та 0-90 днів. При випробуваннях на міцність закладання у більш пізньому терміні залежність, ймовірно, прийме логарифмічний характер, що є властивим для всіх твердіючих і бетонних сумішей.

Випробування на міцність зразків закладання показало, що збільшення вмісту цементу з 3 до 9% сприяє значному підвищенню міцності на стиск пастової закладної суміші на всіх стадіях твердіння. Результати електропровідності та міцності на стиск взаємопов'язані за фізичною сутністю: більш високі значення та вузькі піки ЕП для сумішей з високим вмістом цементу вказують на інтенсивні гідратаційні процеси, що призводить до більш швидкого набору міцності. Отже, далі зазначений взаємозв'язок параметрів інтерпретується у вигляді математичних залежностей зміни міцності цементованого пастового закладання від величини електропровідності суміші на різних етапах твердіння (Рис. 5). Аналіз Рисунок 5 показує, що міцність на стиск пастового закладання зростає зі збільшенням електропровідності суміші за степеневими законами.

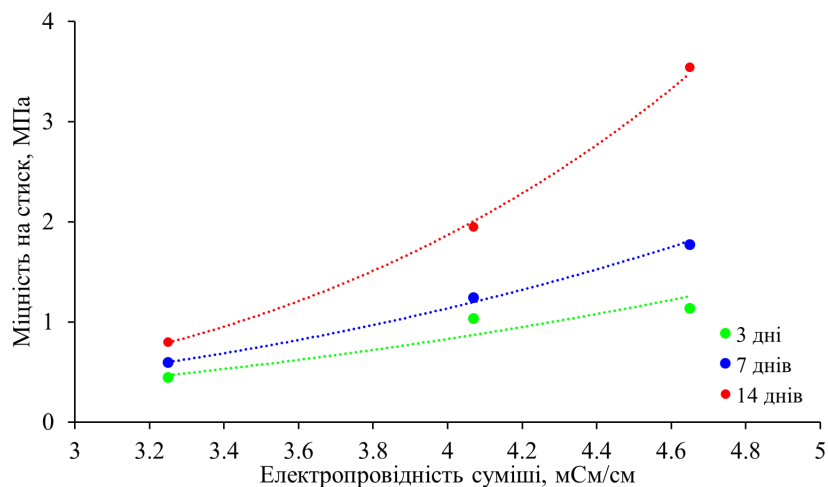


Рисунок 5 – Закономірності зв'язку електропровідності сумішей з їх міцнісними характеристиками при різних термінах твердіння

На всіх стадіях твердіння (3, 7 і 14 днів) пастові закладні суміші з більш високим вмістом цементу, які досягли високих піків ЕП (згідно Рис. 2, 3), демонструють більш високу міцність. З аналізу двох графіків можна зробити висновок, що електропровідність суміші позитивно корелює з характеристиками міцності закладання: чим вищий вміст цементу і, відповідно, електропровідність, тим вища кінцева міцність закладної суміші. Це дозволяє використовувати ЕП як індикатор для контролю та прогнозування міцності пастового закладання на основі цементу на різних етапах твердіння, а, можливо, й інших видів в'язучих матеріалів, що потребує подальших досліджень.

Отже, у даному дослідженні вперше вивчення міцнісних властивостей цементованого пастового закладання на основі хвостів збагачення залізних руд українських гірничо-

збагачувальних комбінатів було розпочато саме з використанням традиційного цементу, що дає наукову основу та розуміння меж міцнісних характеристик, які можуть бути досягнуті при використанні цього найбільш гідравлічно активного в'язучого матеріалу. Встановлено важливий кореляційний зв'язок міцності закладання з електропровідністю приготовленої суміші й доведено, що вона може бути індикатором кінетики процесу гідратації та величини ранньої міцності закладного масиву.

Слід зазначити про відмінності умов твердіння цементованих пастових закладних сумішей. У цьому дослідженні, як зазначено у методиці, твердіння зразків закладання відбувалось на відкритому просторі при вологості 40-50% та температурі 20-25°C з причини того, що цементоване пастове закладання пропонується використовувати для заповнення поверхневих відкритих техногенних пустот і подальшої рекультивациі порушеної земної поверхні у будівельному спрямуванні. На підставі порівняння наших досліджень саме пастового закладання на основі хвостів збагачення залізних руд з відомими закордонними [22-24], проте малочисельними, встановлено, що міцність зразків пастового закладання є на порядок вищою, ніж при імітації шахтних умов на всіх стадіях та термінах твердіння. Це можна пояснити наступним чином. При зберіганні зразків за умов високої вологості (90%), як в шахті, в них відбувається уповільнення процесу випаровування води. Це створює ситуацію, коли водоцементне співвідношення підтримується довше, що може призводити до підвищеної пористості закладного масиву, оскільки надлишок води залишається в масиві, не встигаючи вийти зі структури. У разі впливу відкритого повітря з відносною вологістю 40-50% відбувається інтенсивніше випаровування зайвої води з масиву. В результаті структура суміші ущільнюється, що зменшує пористість та збільшує щільність твердої фази і сприяє формуванню підвищеної міцності.

Подальшими дослідженнями має стати пошук можливостей використання альтернативної мінерально-сировинної бази в'язучих матеріалів, оскільки цемент вважається дороговартісним компонентом і впливає на собівартість закладних робіт. Потрібно розробити нові рецептури пастових закладних сумішей з різною комбінацією в'язучих матеріалів для вибору оптимального складу як за міцнісними характеристиками, так і за економічними. У цих дослідженнях варто орієнтуватись на результати, отримані при дослідженні пастового закладання на основі чистого цементу. Визначення електропровідних властивостей суміші на основі цементу та їх впливу на міцність закладання може слугувати корисним додатковим інструментом. Наприклад, при змішуванні нової рецептури пастового закладання з комбінацією альтернативних в'язучих матеріалів отримано певне пікове значення ЕП суміші у процесі твердіння та схоплювання. Із використанням отриманих закономірностей за величиною електропровідності можна приблизно спрогнозувати ранню міцність, яку слід очікувати та здійснювати корегування у варіації складу в'язучого матеріалу. Результати досліджень будуть корисними для оптимізації складу цементованого пастового закладання залежно від вимог до міцності, термінів твердіння та економічності.

Висновки.

У представленому дослідженні вперше експериментально вивчені кінетичні особливості гідратації та міцнісні характеристики цементованого пастового закладання на основі цементу та хвостів збагачення залізних руд одного з гірничо-збагачувальних комбінатів України. У процесі виконання досліджень отримані наступні наукові та практичні результати:

– розроблена методологія приготування пастових закладних сумішей з різним вмістом в'язучого матеріалу (3-9%), визначення кінетичних особливостей процесу гідратації

в'язучого матеріалу із застосуванням властивості електропровідності та визначення міцнісних характеристик закладних сумішей у ранньому терміні твердіння;

– встановлено хвилеподібну динаміку зміни величини електропровідності з часом при різному вмісті цементу в пастовій закладній суміші, що характеризує найважливіші кінетичні процеси гідратації;

– виявлено закономірність зміни досягнутих пікових значень електропровідності при різному вмісті цементу в пастовій закладній суміші, яка свідчить, що пікове значення ЕП збільшується зі збільшенням вмісту в'язучого матеріалу у пастовій суміші за поліноміальним законом третього порядку;

– виявлено закономірності динаміки зміни у часі ранньої міцності пастового закладання при різному вмісті цементу в пастовій закладній суміші, яка свідчить, що для всіх сумішей відбувається приріст міцності протягом визначеного часу, проте, для сумішей з 6 і 9% спостерігається більш швидкий набір міцності, що відповідає даним електропровідності, де вищі піки ЕП вказували на інтенсивні процеси гідратації;

– виявлено закономірності зв'язку електропровідності пастових закладних сумішей з їх міцнісними характеристиками при різних термінах твердіння, яка свідчить, що міцність на стиск пастового закладання зростає зі збільшенням ЕП суміші за степеневими законами. На всіх стадіях твердіння пастові закладні суміші з більш високим вмістом цементу, які досягли високих піків ЕП, демонструють більш високу міцність;

– результати досліджень будуть корисними для оптимізації складу цементованого пастового закладання залежно від вимог до міцності, термінів твердіння та економічності; у нових дослідженнях з альтернативними в'язучими матеріалами доцільно орієнтуватись на результати, отримані при дослідженні пастового закладання на основі чистого цементу, яке є еталонним, та порівнювати їх дані між собою.

Вдячність.

Дослідження виконані в рамках наукового грантового проекту від Національного фонду досліджень України 2021.01/0306 «Розробка технології відновлення порушених гірничими роботами територій шляхом формування закладних масивів на основі природно-техногенних матеріалів».

Список літератури

1. Ramírez-Márquez, C., Posadas-Paredes, T., Raya-Tapia, A.Y., & Ponce-Ortega, J.M. (2024). Natural resource optimization and sustainability in society 5.0: A comprehensive review. *Resources*, 13(2), 19. <https://doi.org/10.3390/resources13020019>
2. Zheng, Y., Tarczyński, W., Jamróz, P., Ali Raza, S., & Tiwari, S. (2024). Impacts of mineral resources, economic growth and energy consumption on environmental sustainability: Novel findings from global south region. *Resources Policy*, 92, 105019. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105019>
3. Ghorbani, Y., Nwaila, G.T., Zhang, S.E., Bourdeau, J.E., Cánovas, M., Arzua, J., & Nikadat, N. (2023). Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions. *Resources Policy*, 80, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103222>
4. Martino, R., McCann, P., Kumar, R., & Otto van der Ende, R. (2021). Digging deeper: Trends in underground hard-rock mining for gold and base metals. *McKinsey & Company Report*, 5 p.
5. Phillips, J. (2016). Climate change and surface mining: A review of environment-human interactions & their spatial dynamics. *Applied Geography*, 74, 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.001>
6. Petlovanyi, M., Ruskykh, V., Sai, K., & Malashkevych, D. (2024). Prompt determination of predictive parameters for mining-technogenic landscape objects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012035>
7. Петльований, М.В., & Гайдай, О.А. (2017). Аналіз накопичення і систематизація породних відвалів вугільних шахт, перспективи їх розробки. *Геотехнічна механіка*, 136, 147-158.

8. Aznar-Sánchez, J.A., García-Gómez, J.J., Velasco-Muñoz, J.F., & Carretero-Gómez, A. (2018). Mining waste and its sustainable management: Advances in worldwide research. *Minerals*, 8(7), 284. <https://doi.org/10.3390/min8070284>
9. Qi, C., & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*, 144, 106025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>
10. Kuzmenko, O., Dychkovskiy, R., Petlovanyi, M., Buketov, V., Howaniec, N., & Smolinski, A. (2023). Mechanism of interaction of backfill mixtures with natural rock fractures within the zone of their intense manifestation while developing steep ore deposits. *Sustainability*, 15(6), 4889. <https://doi.org/10.3390/su15064889>
11. Petlovanyi, M.V., Malashkevych, D.S., & Sai, K.S. (2020). The new approach to creating progressive and low-waste mining technology for thin coal seams. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 765-775. <https://doi.org/10.15421/112069>
12. Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., & Hudson-Edwards, K.A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
13. Cacciuttolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), 462. <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>
14. Popovych, V., Bosak, P., Petlovanyi, M., Telak, O., Karabyn, V., & Pinder, V. (2021). Environmental safety of phytogenic fields formation on coal mines tailings. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2(446), 129-136. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170x.44>
15. Кузьменко, А.М., Петлєваний, М.В., & Усатый, В.Ю. (2010). Влияние тонкоизмельченных фракций шлака на прочностные свойства твердеющей закладки. В *Матеріалах IV міжнародної науково-практичної конференції "Українська школа гірничої інженерії"* (с. 278-283). Дніпропетровськ, Україна: НГУ.
16. Petlovanyi, M., Sai, K., Khalymendyk, O., Borysovska, O., & Sherstiuk, Y. (2023). Analytical research of the parameters and characteristics of new "quarry cavities – backfill material" systems: Case study of Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 126-139. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.126>
17. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Sai, K., Chebanov, M., & Lozynskiy, V. (2024). Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-Ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1480344. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
18. Yilmaz, E., & Guresci, M. (2017). Design and characterization of underground paste backfill. *Paste Tailings Management*, 111-143. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8_5
19. Sivakugan, N., Veenstra, R., & Naguleswaran, N. (2015). Underground mine backfilling in australia using paste fills and hydraulic fills. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(2), 18. <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0020-8>
20. Liu, S., & Fall, M. (2022). Fresh and hardened properties of cemented paste backfill: Links to mixing time. *Construction and Building Materials*, 324, 126688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126688>
21. Wang, Z., Wang, Y., Cui, L., Bi, C., & Wu, A. (2021). Insight into the isothermal multiphysics processes in cemented paste backfill: Effect of curing time and cement-to-tailings ratio. *SSRN Electronic Journal*, 1-34. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3969622>
22. Yingliang, Z., Zhengyu, M., Jingping, Q., Xiaogang, S., & Xiaowei, G. (2020). Experimental study on the utilization of steel slag for cemented ultra-fine tailings backfill. *Powder Technology*, 375, 284-291. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.052>
23. Duan, X., Huang, Y., & Zheng, W. (2021). Study on the influence of particle size and grade of total tailings on the fluidity of high-concentration filling slurry considering strength. *Geofluids*, 2021, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/8860460>
24. Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & Hu, Y. (2018). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits. *Journal of Cleaner Production*, 188, 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.041>

References

1. Ramírez-Márquez, C., Posadas-Paredes, T., Raya-Tapia, A.Y., & Ponce-Ortega, J.M. (2024). Natural resource optimization and sustainability in society 5.0: A comprehensive review. *Resources*, 13(2), 19. <https://doi.org/10.3390/resources13020019>

2. Zheng, Y., Tarczyński, W., Jamróz, P., Ali Raza, S., & Tiwari, S. (2024). Impacts of mineral resources, economic growth and energy consumption on environmental sustainability: Novel findings from global south region. *Resources Policy*, 92, 105019. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105019>
3. Ghorbani, Y., Nwaila, G.T., Zhang, S.E., Bourdeau, J.E., Cánovas, M., Arzua, J., & Nikadat, N. (2023). Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions. *Resources Policy*, 80, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103222>
4. Martino, R., McCann, P., Kumar, R., & Otto van der Ende, R. (2021). Digging deeper: Trends in underground hard-rock mining for gold and base metals. *McKinsey & Company Report*, 5 p.
5. Phillips, J. (2016). Climate change and surface mining: A review of environment-human interactions & their spatial dynamics. *Applied Geography*, 74, 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.001>
6. Petlovanyi, M., Ruskykh, V., Sai, K., & Malashkevych, D. (2024). Prompt determination of predictive parameters for mining-technogenic landscape objects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012035>
7. Petlovanyi, M.V., & Haidai, O.A. (2017). Analysis of accumulation and systematization of coal mines rock dumps, prospects for their development [Analiz nakopychennia i systematyzatsiia porodnykh vidvaliv vuhilnykh shakht, perspektyvy yikh rozrobky]. *Geotechnical Mechanics*, 136, 147-158. (in Ukrainian).
8. Aznar-Sánchez, J.A., García-Gómez, J.J., Velasco-Muñoz, J.F., & Carretero-Gómez, A. (2018). Mining waste and its sustainable management: Advances in worldwide research. *Minerals*, 8(7), 284. <https://doi.org/10.3390/min8070284>
9. Qi, C., & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*, 144, 106025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>
10. Kuzmenko, O., Dychkovskiy, R., Petlovanyi, M., Buketov, V., Howaniec, N., & Smolinski, A. (2023). Mechanism of interaction of backfill mixtures with natural rock fractures within the zone of their intense manifestation while developing steep ore deposits. *Sustainability*, 15(6), 4889. <https://doi.org/10.3390/su15064889>
11. Petlovanyi, M.V., Malashkevych, D.S., & Sai, K.S. (2020). The new approach to creating progressive and low-waste mining technology for thin coal seams. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 765-775. <https://doi.org/10.15421/112069>
12. Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., & Hudson-Edwards, K.A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
13. Cacciottolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), 462. <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>
14. Popovych, V., Bosak, P., Petlovanyi, M., Telak, O., Karabyn, V., & Pinder, V. (2021). Environmental safety of phytogenic fields formation on coal mines tailings. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2(446), 129-136. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170x.44>
15. Kuzmenko, O.M., Petlovanyi, M.V., & Usatyi, V.Yu. (2010). The influence of finely ground slag fractions on the strength properties of the hardening liner [Vliyaniye tonkoizmelchennykh fraktsiy shlaka na prochnostnyye svoystva tverdeyushchey zakladki]. In *Materials of the IV International Scientific and Practical Conference "Ukrainian School of Mining Engineering"* (pp. 278-283). Dnipropetrovsk, Ukraine: NHU. (in Russian).
16. Petlovanyi, M., Sai, K., Khalymendyk, O., Borysovska, O., & Sherstiuk, Y. (2023). Analytical research of the parameters and characteristics of new "quarry cavities – backfill material" systems: Case study of Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 126-139. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.126>
17. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Sai, K., Chebanov, M., & Lozynskiy, V. (2024). Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-Ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1480344. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
18. Yilmaz, E., & Guresci, M. (2017). Design and characterization of underground paste backfill. *Paste Tailings Management*, 111-143. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8_5
19. Sivakugan, N., Veenstra, R., & Naguleswaran, N. (2015). Underground mine backfilling in australia using paste fills and hydraulic fills. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(2), 18. <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0020-8>
20. Liu, S., & Fall, M. (2022). Fresh and hardened properties of cemented paste backfill: Links to mixing time. *Construction and Building Materials*, 324, 126688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126688>
21. Wang, Z., Wang, Y., Cui, L., Bi, C., & Wu, A. (2021). Insight into the isothermal multiphysics processes in cemented paste backfill: Effect of curing time and cement-to-tailings ratio. *SSRN Electronic Journal*, 1-34. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3969622>

22. Yingliang, Z., Zhengyu, M., Jingping, Q., Xiaogang, S., & Xiaowei, G. (2020). Experimental study on the utilization of steel slag for cemented ultra-fine tailings backfill. *Powder Technology*, 375, 284-291. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.052>
23. Duan, X., Huang, Y., & Zheng, W. (2021). Study on the influence of particle size and grade of total tailings on the fluidity of high-concentration filling slurry considering strength. *Geofluids*, 2021, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/8860460>
24. Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & Hu, Y. (2018). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits. *Journal of Cleaner Production*, 188, 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.041>

Надійшла до редакції 15.11.2024

M. Petlovanyi

RESEARCH OF THE HYDRATION KINETICS AND EARLY STRENGTH CHARACTERISTICS OF CEMENTED PASTE BACKFILL BASED ON IRON ORE TAILINGS

Purpose. *Experimental studies of the kinetic features of the hydration process of the binder material and its relationship with the strength characteristics of traditional paste backfill mixtures based on Portland cement and iron ore tailings, providing a basis for the further design of effective and economical backfill mixtures with the potential for using alternative binders.*

Methodology. *Laboratory studies were conducted to prepare paste backfill mixtures based on iron ore tailings with varying cement content in the solid part at 3, 6, and 9%, covering the range commonly used in international backfilling practices. To assess the intensity and kinetics of hydration, electrical conductivity was measured using a BT 761 conductometer. Compressive strength testing of backfill samples was conducted using a manual hydraulic press with a working pressure of up to 25 MPa.*

Results. *A wave-like dynamic of electrical conductivity over time was observed at different cement contents in the paste backfill mixture. A pattern of peak electrical conductivity values was identified depending on the cement content in the mixture. The dynamics of early compressive strength development over time were also examined at different cement contents. Furthermore, a correlation was established between the electrical conductivity of paste backfill mixtures and their strength characteristics at various hardening times.*

Scientific novelty. *For the first time, the kinetic features of hydration and the strength characteristics of cemented paste backfill based on cement and iron ore tailings from one of Ukraine's mining and processing plants have been experimentally studied.*

Practical significance. *The study results are valuable for optimizing the composition of cemented paste backfill based on strength requirements, hardening times, and cost-effectiveness, especially in the search for new alternative types of binder materials.*

Keywords: *paste backfill, binder material, hydration, electrical conductivity, strength, kinetics.*

Відомості про автора

Петльований Михайло Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: petlovanyi.m.v@nmu.one

Mykhailo Petlovanyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining Engineering and Education, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine. E-mail: petlovanyi.m.v@nmu.one