

GENERAL CHARACTERISTIC OF BIOCEMENTATION AND CONTROL PARAMETERS

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЦЕМЕНТАЦІЇ ТА ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ

V. Udymovych

В.М. Удимович

Національний університет харчових технологій

National University of Food Technologies

The constant increase in population each year leads causes to a significant acceleration of urbanization with tangible consumption of concrete for infrastructure construction. However, modern technology of Portland cement (concrete base) leads to large emissions of carbon dioxide. Deposition of CaCO_3 by microbiological agents is a promising way to maintain nature.

Today, there are two main ways to use MICP: to change the pore structure of the respective materials by sedimentation calcium carbonate with biological agents in the presence of the enzyme urease, and to rise the strength between the particles of bulk materials by binding.

Nowaday, the research has established the advantages of the first and second MICP technology with the possibility of application in different geographical, climatic and environmental boundaries on the planet. To start applying and for greater dissemination of MICP technology, it is necessary to develop scaling of industrial technology, standards of proper production, control and test protocols at different stages of production, eligibility criteria and quality management at all stages of the life cycle.

Also, the use of MICP technology makes it possible to reduce energy use, decrease carbon emissions and increase opportunities for the processing of various wastes of such as industrial origin and agricultural sector. However data to quantify

these benefits are societal and industrial concerns. The development of principles and methodologies for assessing the life cycle of MICP and the structures used with MICP may play a significant role in the future.

There are several problems in the adaptation of the biological process in the construction industry, which is not the focus sector experts.

Biosafety and process economics. MICP offers excellent opportunities for the utilization of industrial waste and thus attracts part of the economy. However, they need to be adapted locally accordingly.

Key words: *biocementation, microbiologically induced calcium precipitation, urease-producing bacteria, urease, Sporosarcina pasterii, Bacillus subtilis.*

Постійне збільшення населення щороку призводить до значного пришвидшення урбанізації зі значним споживанням бетону для будівництва інфраструктури. Однак сучасна технологія отримання портландцементу (основа бетону) призводить до великих викидів вуглекислого газу. Осадження CaCO_3 мікробіологічними агентами є перспективним способом підтримки природи.

Сьогодні існує два основних шляхи використання МІОК: зміна структури пор відповідних матеріалів за рахунок осадження карбонат кальцію біологічними агентами у присутності ферменту уреазу та збільшення міцності між частинками сипучих матеріалів за рахунок зв'язування.

На сьогодні при проведенні досліджень встановлено переваги першої і другої технології МІОК з можливістю застосування у різних географічних, кліматичних та екологічних межах на планеті. Для початку застосування і достатнього поширення технології МІОК необхідно розробити масштабування технології промислового використання, стандарти належного виробництва, а також протоколи контролю і випробувань на різних етапах виробництва, критерії прийнятності і менеджмент якості на всіх етапах життєвого циклу.

Також використання технології МІОК дає можливість оптимізувати об'єми використання енергії, зменшити викиди вуглекислого газу та збільшити можливості для переробки різноманітних відходів як промислового походження, так і агросектору. Однак дані для кількісної оцінки цих вигод є невеликою через побоювання суспільства та промисловців. Формування принципів та методик для оцінки життєвого циклу МІОК та структур, які використовуються з МІОК може відіграти істотне значення в майбутньому.

Існує декілька проблем у адаптації біологічного процесу у будівельній галузі, до якої не прикута увага фахівців сектору. Біологічна безпека використання та економіка процесу. МІОК пропонує чудові можливості утилізації промислових відходів виробництв і тим самим залучає різні частини економіки. Однак, вони повинні бути адаптовані на місцевому рівні відповідно.

Ключові слова: *біоцементация, мікробно-індуковане осадження кальцію, уреазо-продукуючі бактерії, уреаза, Sporosarcina pasterii Bacillus subtilis.*

Постановка проблеми. Переважна кількість інфраструктурних об'єктів, як дороги, мости та будівлі житлового та нежитлового призначення у значній кількості будувались швидкими темпами протягом останніх ста років як результат швидкого економічного розвитку та процвітання. Значна кількість цих споруд будувалися в країнах, що свого часу розвивалися, в середині минулого століття, і на сьогодні постає питання технічного обслуговування та оновлення цих споруд. Водночас економіка країн, що розвивається, насамперед Китаю та Індії, стрімко будує та розвиває власну інфраструктуру. В результаті це призвело до значного споживання будівельних матеріалів і в найближчому майбутньому продовжуватиме зростати (Chen et al., 2010, Schneider et al., 2011).

Серед будівельних матеріалів бетон завоював статус найбільш використовуюваного матеріалу штучного виробництва у світі. Тому на сьогодні доволі складно знайти належну заміну бетону на основі портландцементу для зростаючого будівельного попиту (Imbabi et al., 2012).

Цемент, як основа будівельних матеріалів, залишатиметься ключовим матеріалом для забезпечення світових потреб у житлі та сучасній інфраструктурі і на надалі. На сьогодні щорічне глобальне виробництво цементу досягає значення до 3,5 мільярда тонн, але очікується збільшення приблизно до 4 мільярдів тонн на рік. Одна лише Китайська Народна Республіка споживає близько 55% від загального об'єму виробництва (Chen et al., 2012). Основне зростання споживання цементу передбачається в таких країнах, як Китай та Індія, а також у таких регіонах, як Близький Схід та Північна Африка (Bond et al., 1999).

В наслідок збільшення споживання, перед цементною промисловістю у всьому світі постає питання щодо збереження матеріалів для отримання цементу та енергоресурсів, а також скорочення викидів CO₂ як зростаюча екологічна проблема світового масштабу (Удимович, 2021).

У недалекому минулому були напрацьовані певні досягнення для вирішення цих проблем. Змішування цементу із вторинними матеріалами, такими як попіл, доменний шлак і кремнезему є найважливішим серед них. Але в будь-якому випадку виробництво портландцементу на сьогодні призводить до антропогенних викидів CO₂, що негативно впливає як на біосферу в цілому, так і на людину безпосередньо.

В сучасному глобальному світі будівельна індустрія повинна зважено та свідомо відповідати за вплив на навколишнє середовище (раціональне використання матеріалів та енергії); соціальні проблеми (здоров'я та благополуччя населення); економічні наслідки (вартість будівництва).

Сучасні технології виробництва будівельних матеріалів засновані на використанні величезної кількості енергії та призводять до виробництва значних обсягів CO₂. Таким чином, трансформаційні зміни у будівельних матеріалах є необхідними для забезпечення сталого розвитку як інфраструктури, так і цивілізації.

Метою статті є аналіз сучасних публікацій, які стосуються методів лабораторних досліджень та обробки бетонних конструкцій за допомогою

біоцементациї. Наведені в статті результати дослідження узагальнюють інформацію щодо дослідження технології МІОК та параметрів контролю при впровадженні технології

Викладення основних результатів дослідження

Природа протягом мільйонів років створювала будівельні матеріали зі стійкими властивостями. Зазвичай для нас вони представлені такими формами як кераміка (зубна емаль, оболонка молюсків), полімери (екзоскелет членистоногих, шовк, клітинні стінки рослин) або збалансовані композити на основі кераміки та полімерів (пір'я, роги, кістки). Біологічні матеріали - це практично всі композити з оптимізованим складом (Chen et al., 2012). Відтворення принципів природного будівництва має величезний потенціал для розвитку стійких будівельних матеріалів.

Останнім часом біомінералізація успішно розпочинає впроваджуватися в процесі отримання будівельних матеріалів (De Muynck et al., 2010, Ramachandran et al., 2001) та видається перспективною у структурних та геотехнічних застосуваннях (Achal et al., 2011, DeJong et al., 2010, DeJong et al., 2013, Van Tittelboom et al., 2010).

Біомінералізація

Мінералізація часто використовується в будівництві, що відображається у виробництві корисних копалин, карбонатних продуктів. При біомінералізації саме живі організми беруть участь у процесі мінералізації.

Біомінералізація може бути двох видів:

- біологічно контрольована мінералізація (БКМ)
- біологічно індукована мінералізація (БІМ).

При біологічно контрольованій мінералізації мінеральні складові зазвичай осідають всередині органічних матриць живих (мікробних) клітини, що дозволяє організмам здійснювати достатній рівень контролю при утворенні та накопиченні корисних копалин (Bazylinski and Frankel, 2000).

Під час біологічно індукованої мінералізації, навпаки, мікроорганізми виділяють один або декілька метаболічних продукти, що взаємодіють з іонами або сполуками у навколишньому середовищі, що в подальшому зазвичай

призводить до осадження мінеральних частинок як результат утворення побічних продуктів метаболізму. Утворені подібним чином біомінерали, найімовірніше, є ненавмисним та неконтрольованим наслідком метаболічної активності, яка доволі часто призводить до вибіркової цементації, виробляючи відносно нерозчинні органічні та неорганічні сполуки та їх з'єднання, а сам процес доволі часто називають біоцементуванням (Frankel and Bazylinski, 2003).

Це твердження опирається на осадження карбонату кальцію, що викликане мікроорганізмами (мікробноіндуковане осадження кальцію, МІОК) (Rong and Qian, 2012). Застосування технології МІОК було продемонстровано при відновленні та вилученні важких металів (Achal et al, 2012 a, b, c), зміцненні ґрунту (Whiffin et al., 2007), відновленні кам'яних матеріалів (Castanier et al., 1999, Rodriguez-Navarro et al., 2003, Stocks-Fischer et al., 1999, Tiano et al., 1999), очищенні стічних вод (Hammes et al., 2002), ущільненні піску (Achal et al., 2009), зміцненні бетону (Achal et al., 2011, De Muynck et al., 2008, Ramachandran et al., 2001).

МІОК відбувається під час складних біохімічних реакцій, що регулюються двома важливими ферментами як уреаза та карбоангідраза, які виробляються мікробами і водночас також використовується і сечовина, як субстрат, а також кальцій як джерело мінералів. За активності уреазу 1 моль використаної сечовини призводить до утворення 1 моль аміаку та 1 моль карбамату, який спонтанно гідролізується з утворенням додаткових 1 моль аміаку та вугільної кислоти (Burne and Chen, 2000).

Невдовзі утворюються бікарбонат та 2 моля іонів амонію та гідроксиду після врівноваження у воді, що призводить до збільшення значення рН та, зрештою, зміщує рівновагу бікарбонату, що призводить до утворення карбонат-іонів. Через збільшення рН у клітині для секреції карбонат-іонів необхідна значна концентрація позаклітинних іонів кальцію та низька концентрація позаклітинного протону. Доволі високе значення рН призводить в подальшому до утворення CO_3^{2-} із HCO_3^- (Knoll, 2003). В результаті концентрація карбонату

збільшується, що викликає збільшення рівня перенасичення до осадження CaCO_3 навколо клітини при наявності розчинних іонів кальцію.

Ще один фермент, що полегшує взаємоперетворення CO_2 та HCO_3^- і сприяє осадженню CaCO_3 - це карбоангідраза (Mobley and Hausinger, 1989). Цей фермент відіграє значну роль у концентруванні CO_2 (Yadav et al., 2011). Якщо HCO_3^- є джерелом розчиненого неорганічного вуглецю (РНВ), карбоангідраза може пришвидшувати його перетворення в CO_2 (Li et al., 2010).

Якщо підсумовувати, то процес МІОК залежить від шести ключових факторів, а саме:

- наявності уреазы,
- наявності карбоангідрازی,
- достатньої концентрації кальцію,
- концентрації розчиненого неорганічного вуглецю,
- значення рН
- наявності місця формування.

В майбутньому МІОК може використовуватися в об'ємі як єдиний цементуючий матеріал (біоцементация) або як поверхневий шар цементування (біоосадження).

Біоцементация

Біоцемент утворюється за рахунок МІОК у проміжках та порах частинок зернистого матеріалу за рахунок взаємодії рідини, що містить відповідні уреазопродукуючі мікроорганізми, сечовину як субстрат та розчин кальцію (Achal et al., 2013, Rong and Qian, 2012). Фермент уреазы, котрий продукується відповідними бактеріями, гідролізує сечовину і кальцій, що використовується як джерело енергії для утворення біоцементу. В подальшому біоцемент зв'язує між собою частинки разом, утворюючи тверде тіло. Даний процес в подальшому може активно застосовуватися для стабілізації ґрунтів (Cheng et al., 2013, Cheng and Cord-Ruwisch., 2012), при проведенні будівельних робіт (Mukherjee et al., 2013), відновлення артефактів з каменю (Jimenez-Lopez et al., 2007, Tiano et al., 1999), герметизация водних каналів та тріщин у них (Tobler et al., 2012) та усунення забруднень (Achal et al., 2012 b).

Поліпшення показників міцності до 25% було відзначено, коли біоцементация була досягнута шляхом змішування мікроорганізму *Shewanella sp.*, що був ізольованим з гарячих джерел, до розчину цементу (Ghosh et al., 2005). У дослідженням Achal та ін, біоцементация використовувалася спільно зі звичайним цементом для виготовлення цементних розчинів. Такі досліджувані зразки показали на 17–36% вищу міцність і стійкість до водопроникності (Achal et al., 2009, Achal et al., 2011a/b). Дане відповідне дослідження наочно продемонструвало, що біоцементация залежить від використовуваних штамів бактерій котрі продукують уреазу з достатньою активністю та високою здатністю осаджувати кальцій.

Біоосадження

У процесі біологічного осадження, шар карбонату біологічного походження осаджується на пористій основі, такій як цегла, цемент або цементний розчин.

В цьому випадку МІОК осаджує кристали карбонату всередині поверхневих пор та тріщин, і таким чином запобігає потраплянню речовин та матеріалів у основу матеріалів, із зовні. Таким чином, поверхня з пористих матеріалів, таких як бетон або цегла може бути захищена від проникнення води або хімічних речовин при впливі атмосферних опадів (Phillips et al., 2013).

Біоосадження може проводитися за допомогою використання різноманітних мікроорганізмів, шляхів досягнення кінцевого результату (De Muynck et al., 2008).

У деяких експериментальних дослідженнях, використовували кубики вапняку розміром 30 мм, які оброблялися розчином з NaHCO_3 , сечовиною та CaCl_2 та культуральними рідинами зі штамми *Bacillus* (п'ять різних *Bacillus sphaericus* і один штам *Bacillus lentus*).

Оптимальна доза кальцію була оцінена або близько 13,4 мг Ca^{2+} . Збільшення концентрації сечовини та кальцію на певному рівні та повторна обробка покращили стійкість вапняку до водопроникнення через МІОК (De Muynck et al., 2009, De Muynck et al., 2011, Dick et al., 2006).

Відновлення на основі МІОК

Всі інфраструктурні об'єкти з плином часу піддаються впливу ряду зовнішніх факторів, таких як атмосферні опади або ж механічне пошкодження, що призводить до їхнього пошкодження та втрати первинної міцності та подальшого зменшення терміну експлуатації. Для усунення подібних пошкоджень зазвичай використовують різноманітні синтетичні полімери та продукти на їхній основі, які не завжди дають необхідний ефект та результат для відновлення пошкодженої структури.

Саме тому МІОК розглядається ефективним способом для відновлення пошкоджених бетонних конструкцій. Його можна виконувати на поверхні конструкції, де кристали карбонату осаджуються всередині тріщин та герметизують їх.

Існує декілька способів проведення біовідновлення у бетонних зразках. Перший полягає в тому, що культуру мікроорганізмів накопичують на оптимізованому поживному середовищі разом з розчином сечовини та кальцію, додають до розчину цементу перед подальшим використанням цементуванням – при появі тріщин та розгерметизації. Це призводить до утворення біомінералів кальцію, що одразу герметизують пошкодження. Другий спосіб полягає в тому, що на пошкоджену бетону конструкцію наносять культуральну рідину з бактеріальними клітинами (Wang et al., 2012).

На основі МІОК, Ramachandran et al. (2001), провів дослідження при якому в тріщини бетонних конструкцій вносили суміш піску з клітинами *Sporosarcina pasteurii*, що призводило до покращення міцності на 61%. В іншому експерименті було застосовано бактеріальні клітини, що інкапсульовані поліуретаном для захисту від високого значення рН цементу, але високих значень міцності та захисту не було досягнуто (Bang et al., 2001).

Бактеріальні клітини котрі пропонується подавати до тріщин для відновлення бетонних конструкцій, можуть розвиватися за наявності води, мінімальної кількості поживних речовин, котрі надходять з атмосферними опадами та кисню з подальшим утворенням уреазі і, в кінцевому результаті, осадженням кальциту, що блокує тріщини.

Одна з перешкод, що виникає при відновленні бетонних конструкцій з тріщинами є високе значення рН бетону, і для цього можна використовувати мікрокапсули як носії бактерій. Для створення мікрокапсул за основу може використовуватися меламін, що створює необхідні умови стійкості до високого значення рН та утворює систему забезпечення з джерелом живлення (напр., дріжджовий екстракт) та компонентами МІОК (сечовина, джерело кальцію). У цьому випадку мікрокапсули з наявними у них бактеріальними клітинами у тріщинах бетонних конструкцій розриваються, і починають осаджувати карбонат кальцію для закупорювання тріщини при наявності активної уреазі, що продукується бактеріями (Wang et al., 2014).

На сьогодні також проводяться дослідження щодо можливості використання молочнокислих бактерій, як альтернативних біологічних агентів, котрі можуть бути залучені для біоцементації, оскільки їх використання може призводити до зниження значення рН (Удимович, 2021).

Вплив МІОК на покращення параметрів конструкцій

Міцність оброблених матеріалів

Бетон, котрий містить у своєму складі біоцемент, має більшу міцність при навантаженні (стисканні) ніж звичайний бетон. Відповідно до опублікованих дослідження для визначення цього факту проводились підготовка та накопичення алкалофільних аеробних бактерій *Bacillus pasterii*.

Алкалофільну аеробну бактерію *Bacillus pasterii* вирощували у поживних середовищах, що мали у своєму складі сечовину, CaCl_2 та використовували цементний розчин як заміник води (Ramakrishnan et al., 1998, Ramakrishnan et al., 1999).

Відносно вища міцність при механічних навантаженнях (близько 65 МПа) цементних кубів вимірювалась протягом 28 днів у порівнянні з контрольними кубами (55 МПа), де бактеріальні клітини не додавалися. Ghosh та ін. (2005) повідомляв про збільшення міцності при механічному навантаженні на 17% та 25% після 7 та 28 днів відповідно у досліджуваних зразках через біоцементацію за допомогою мікроорганізму *Shewanella sp.* Jonkers та Schlangen (2007) використовували клітини *S. pasterii* для біоцементації розчинів, і було

визначено, що немає значної різниці в міцності між досліджуваним зразком і між контролем, тоді як міцність при навантаженні була вищою. В подальшому Jonkers та Schlangen (2008) досягли 10% приросту міцності через 28 днів за допомогою консорціуму *Bacillus pseudofirmus* та *Bacillus cohnii*.

Achal та ін. (2009, 2010 a/b) досліджували міцність розчинів на тиск з використанням промислових побічних продуктів, таких як розчин лактози та кукурудзяний екстракт як джерело поживних речовин для накопичення культури. При цьому дослідженні повідомлялося про збільшення на 17% міцності при механічному навантаженні через 28 днів, коли використовувалась лактоза для вирощування *S. pasteurii* для біоцементатації. Коли кукурудзяний екстракт використовувався для вирощування бактеріальних клітин для МІОК, відзначалося збільшення компресії на 35% протягом 28 днів спостереження. Це значення збільшення міцності було досягнуто за рахунок використання модифікованого поживного середовища порівняно зі стандартним поживним середовищем.

Park та ін. (2010), виявили та ідентифікували бактеріальний ізолят *Arthrobacter crystallopoietes* для підвищення міцності при біоцементатації.

Afifudin та ін. зафіксували збільшення міцності при стисканні на 28% бетону, що містить *Bacillus subtilis*, порівняно зі стандартним досліджуваним зразком. При додаванні бактеріальних клітин в цементні матеріали, вони почали рости після отримання поживних речовин, що знаходилися в порах цементного матеріалу та навколишнього середовища. Це призвело до активності бактеріальних клітин, котрі почали осаджувати карбонат кальцію у товщі матриці цементного розчину. В підсумку клітини або гинули, або переходили в ендоспори (Ramachandran et al., 2001).

Таким чином, можна зробити висновок, що окрім МІОК загальне збільшення міцності досягалося і за рахунок достатньої кількості необхідних органічних речовин для мікробної біомаси.

Водопроникність оброблених матеріалів

Як один з фундаментальних параметрів щодо технології МІОК та перспективи довговічності бетону, стійкість до водопроникності відіграє

важливе значення, оскільки цей фактор відображає можливість проникнення та впливу різних агресивних речовин на бетон та бетонні конструкції, що в подальшому може призвести до його пошкодження та руйнування. Проникність зазвичай залежить від пористості цементного розчину, яка кількісно відображається пористістю, розподілом за розмірами, в'язкістю та мікротріщинами (Phung et al., 2013).

МІОК продемонстрував здатність значно зменшувати водонепроникність цементних матеріалів та інших будівельних матеріалів. У 1993 році церква Святого Медара в Туарі була частково відремонтована за допомогою використання карбонату кальцію мікробного походження (біокальцину), що зменшило в п'ять разів поглинання води з поверхонь, не впливаючи на його естетичний вигляд (Le Metayer-Levrel et al., 1999). Пізніше подібні випробування були проведені на цементному розчині за допомогою *B. sphaericus* для покращення біоосадження.

Бактерії закупорюють пори з утворенням біоплівки, що має активні ферменти (уреаза, карбоангідраза) для подальшого залучення позитивно заряджених іонів металів з навколишнього середовища і таким чином створюють біоосадження через власний негативний заряд у клітинній стінці (Hammes and Verstraete, 2002).

Achal et al. (2011) при своїх дослідженнях продемонстрував зменшення проникності у зв'язку з осадженням шару кристалів карбонату кальцію за допомогою *S. pasteurii* в бетонних кубах розміром 150 мм. При проведенні вимірювання проникності води у верхній та бокових сторонах куба було визначено, що проникність води бокових стінок є вищою ніж з верхньої частини (в 4 рази нижча порівняно з контрольним зразком) саме через гравітаційне осадження.

Проникність іонів хлориду оброблених матеріалів

Розповсюдження іонів хлориду в залізобетоні може завдати шкоди армуванню. Хлоридна корозія є одним з основних механізмів погіршення якості, що впливає на будівельні конструкції. Сталева арматура, закладена в бетон, захищена від корозії лише за рахунок високої лужності бетону. Однак,

лужність бетону може бути нейтралізована через навколишнє середовище через карбонізацію. У такій ситуації, якщо потрапляють хлориди до сталевого армування підвищується ризик її корозії.

Щоб уникнути цієї дилеми, деякі дослідники оцінили альтернативи хлориду кальцію як джерела кальцію. Нітрат кальцію був успішно використаний як ефективне джерело кальцію для *S. pasterii* (Qian et al., 2009). Крім того, оскільки хлорид кальцію призводить до великого утворення аміаку, а відповідно і збільшує ризик корозії армування, Neville (1996) запропонував використовувати лактат кальцію, оскільки його метаболічне перетворення не призводить до утворення великої кількості аміаку. Лактат кальцію, використаний *Bacillus cohnii*, призвів до того, що на поверхнях тріщин випадає велика кількість осаду CaCO_3 розміром 20–80 мкм (Jonkers et al., 2010).

Qian та ін., (2009) при проведенні досліджень щодо покращення захисту армуючі елементів, готували розчини з різним значенням рН на основі H_2SO_4 для перевірки кислотостійкості осадження кальциту за допомогою *B. pasterii* на кубках геометричним розміром у 30 мм. Отриманні результати продемонстрували збільшення стійкості до поверхневої проникності речовин через осадження кальциту на поверхні досліджуваних зразків, котре індуковане бактеріальною уреазою, при постійній обробці кислотним розчином ($\text{pH} > 1,5$).

Тому можна припустити, що подібна обробка може покращувати кислотостійкість елементів армування залізобетонних конструкцій, що особливо важливо в прибережних районах (Qian et al., 2009).

Ху та ін. (2014) порівняли здатність лактату кальцію та глютамату кальцію до осадження карбонат кальцію, що індукований *B. cohnii*, і спостерігали більшу товщину шару CaCO_3 , що осаджується з використанням глютамату кальцію, ніж у лактату кальцію.

Наявність біомаси в значній мірі сприяє й загальному зменшенню газопроникності в цементних розчинах, що призводить до підвищення стійкості до карбонізації (De Muynck et al., 2008). Збільшення стійкості до карбонізації було обумовлено товщиною карбонатного шару (30-50). Вони припустили, що захисний ефект від біологічного осадження до карбонізації можна покращити

шляхом додаткової обробки бактеріями та джерелом кальцію або збільшенням концентрації іонів кальцію. De Muynck та ін. (2008) вимірювали опір проникнення хлориду в зразках, оброблених біологічними осадженням, за допомогою тесту прискореної міграції. МІОК призводить до меншого коефіцієнту міграції хлоридів (10-40%) у порівнянні з контрольними зразками. Окрім цього за рахунок підвищеного опору до хлоридної міграції було досягнуто ефекту акрилового покриття силанів і силіконів

Вплив на стійкість конструкції

На сьогодні МІОК широко не застосовується і в найближчій перспективі не розглядається як глобальна перспектива для виробництва альтернативних будівельних матеріалів. Однак додавання біоцементу (за рахунок МІОК) у вигляді додаткових компонентів до таких будівельних матеріалів як вапно, пісок чи портландцемент може дати змогу покращити ефективність за такими параметрами як стійкість, збільшення міцності та довговічність конструкції (Hooton and Bickley, 2014). Окрім цього необхідно відзначити, що подібне використання біоцементу може дати змогу зменшити кількість використовуваних будівельних матеріалів та призвести до зменшення викидів вуглекислого газу при виробництві подібних будівельних матеріалів.

Методика оцінки життєвого циклу (ОЖЦ) (ISO 14040, 2006), що дає змогу належним чином оцінити вплив на навколишнє середовище, популярна як один з первинних показників стійкості продукції та процесів. Також надходили повідомлення щодо досліджень виявлення впливу на навколишнє середовище технологій отримання цементу та бетону (Huntzinger and Eatmon, 2009, Knoeri et al., 2013, Li et al., 2014, Petek Gursel et al., 2014, Silva et al., 95, Van den Heede and De Belie, 2012).

Методика оцінки життєвого циклу може сприяти у допомозі дослідити навколишнє середовище щодо впливу МІОК. Однак на сьогодні перспектива застосування цієї методики має ряд певних обмежень, а саме таких як: відсутня точна межа визначення системи, недостатній життєвий цикл системи для обрахунків, обмежене розуміння показників життєвого циклу і терміну системи.

Саме тому необхідні додаткові дослідження та відповідні результати навіть для оцінки впливу сечовини та кальцію хлориду при проведенні МІОК, а також необхідний час для впровадження МІОК у промислові масштаби виробництва та застосування для більш детального розуміння масштабування процесу.

Також потрібно відзначити, що функціональні одиниці для оцінки життєвого циклу повинні використовуватися з точки зору продуктивності (наприклад, параметрів міцності та довговічності), а не терміном чи кількістю (наприклад, об'єм).

Використання промислових відходів або ж побічних продуктів як джерела кальцію, сечовини та поживних речовин для росту бактеріальних культур може значно зменшити екологічний та економічний вплив МІОК. Саме для цього необхідно приділити належну увагу при дослідженні оцінки життєвого циклу.

Висновки

Технологія МІОК має значний потенціал як для подальших вдосконалень, так і застосування. Але відсутність масштабного промислового виробництва на сьогодні не дає змоги виявити та вивчити проблеми, котрі виникають, та вдосконалити цю технологію.

Одним з ключових викликів, що виникає, є побоювання зі сторони державних органів та фахівців будівельної галузі щодо впливу біологічних процесів та мікроорганізмів, які використовуються при МІОК як на біосферу, так і на людину. Це говорить про психологічний бар'єр, який потрібно усувати за рахунок просвітницької діяльності між науковцями та будівельниками.

Також необхідно відзначити, що МІОК при застосуванні у будівельній галузі, може використовуватися у широких географічних та екологічних зонах. Отже при впровадженні технології на це також необхідно зважати та адаптувати до нових умов, тому стандартні протоколи оцінки життєвого циклу та протоколи перевірки і тестування повинні постійно оновлюватися з належними критеріями прийнятності.

Для забезпечення технології МІОК при промисловому виробництві також піднімається питання забезпечення використовуваних бактеріальних культур належними поживними середовищами.

Література

Удимович, В.М. (2021) Молочнокислі бактерії як продуценти уреаз. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 27 (3), 25-31.

Удимович, В.М. (2021) Застосування біоцементациї в контексті вирішення екологічних питань. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 27 (4), 63-82.

Achal, V., Li, M., Zhang, Q. (2013) Biocement, recent research in construction engineering: status of China against rest of world. *Advances in Cement Research*, 26, 281-291.

Achal, V., Mukherjee, A., Basu, P.C., Reddy, M.S. (2009). Strain improvement of *Sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 36, 981-988

Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M.S. (2011) Microbial concrete – a way to enhance the durability of building structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 730-734.

Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M.S. (2011) Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38, 1229-1234.

Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M.S. (2010) Biocalcification by *Sporosarcina pasteurii* using corn steep liquor as nutrient source. *Industrial Biotechnology*, 6, 170-174.

Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M.S. (2010) Isolation and characterization of urease producing and calcifying bacteria from cement. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20, 1571-1576.

Achal, V., Pan, X., Zhang, D., Fu, Q.L. (2012) Biomineralization based remediation of As(III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli*. *Journal of Hazardous Materials*, 201-202, 178-184

- Achal, V., Pan, X., Zhang, D., Fu, Q.L. (2012) Bioremediation of Pb-contaminated soil based on microbially induced calcite precipitation. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 22, 244-247.
- Achal, V., Pan, X. (2014) Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by *Bacillus sp.* CR2. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174, 307-317.
- Afifudin, H., Hamidah, M., Hana, H., Kartini, K. (2011) Microorganism precipitation in enhancing concrete properties. *Applied Mechanics and Materials Vols*, 99-100, 1157-1165
- Bang, S.S., Galinat, J.K., Ramakrishnan, V. (2001) Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, 28, 404-409.
- Bond, G.M., Egeland, G., Brandvold, D.K., Medina, M.G., Simsek, F.A., Stringer, J. (1999) Enzymatic catalysis and CO₂ sequestration. *World Resource Review*, 11, 603-619.
- Burne, R.A., Chen, Y.Y. (2000) Bacterial ureases in infectitious diseases. *Microbes and Infection*, 2, 533-542.
- Castanier, S., Le Metayer-Levrel, G., Perthuisot, J.-P. (1999) Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view. *Sedimentary Geology*, 126, 9-23.
- Chen, P.-Y., McKittrick, J., Meyers M.A. (2012) Biological materials: functional adaptations and bio inspired designs. *Progress in Materials Science*, 57, 1492-1704.
- Chen, Y., Okudan, G.E., Riley, D.R. (2010) Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings. *Automation in Construction*, 19, 235-244.
- Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., Shahin, M.A. (2013) Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, 50, 81-90.
- Cheng, L., Cord-Ruwisch, R. (2012) *In-situ* soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation. *Ecological engineering*, 42, 64-72.

- De Muynck, W., Belie, N., Verstraete, W. (2010) Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological engineering*, 36, 118-136.
- De Muynck, W., Cox, K., De Belie, N., Verstraete, W. (2008) Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 875-885.
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., Verstraete, W. (2008) Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 38, 1005-1014.
- De Muynck, W., Leuridan, S., Van Loo, D., Verbeken, K., Cnudde, V., De Belie, N. (2011) Influence of pore structure on the effectiveness of a biogenic carbonate surface treatment for limestone conservation. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, 77, 6808-6820.
- De Muynck, W., Verbeken, K., De Belie, N., Verstraete, W. (2009) Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone. *Journal of Ecological Engineering*, 36, 99-111.
- DeJong, J.T., Mortensen, M.B., Martinez, B.C., Nelson, D.C. (2010) Biomediated soil improvement. *Journal of Ecological Engineering*, 36, 197-210.
- DeJong, J.T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., Van Paassen, L. (2013) Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. *Geotechnique*, 63(4), 287-301.
- Frankel, R.B., Bazylinski, D.A. (2003) Biologically induced mineralization by bacteria. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54, 95-114.
- Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D., Pal, S. (2005) Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 35, 1980-1983.
- Hammes, F., Boon, N., Clement, G., de Villiers, J., Siciliano, S.D., Verstraete, W. (2003) Molecular biochemical and ecological characterisation of a bio-catalytic calcification reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 62, 191-201.
- Hammes, F., Verstraete, W. (2002) Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 1, 3-7.

- Hooton, R.D., Bickley, J.A. (2014) Design for durability: the key to improving concrete sustainability. *Construction and Building Materials*, 67 (Part C), 422-430.
- Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D. (2009) A life-cycle assessment of Portlandcement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 668-675.
- Imbabi, M.S., Carrigan, C., McKenna, S. (2012) Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1, 194-216.
- ISO 14040. (2006) Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. *International Organization for Standardization*. Взято з <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen, E. (2010) Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological engineering*, 36, 230-235.
- Knoeri, C., Sanye-Mengual, E., Althaus, H.-J. (2013) Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 909-918.
- Knoll, A.H. (2003) Biomineralization and evolutionary history. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54, 329-356.
- Li, W., Liu, L.P., Chen, W.S., Yu, L.J., Li, W.B., Yu, H.Z. (2010) Calcium carbonate precipitation and crystal morphology induced by microbial carbonic anhydrase and other biological factors. *Process Biochemistry*, 45, 1017-1021.
- Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Oriol, G., Loubiere, J.F., Perthuisot, J.P. (1999) Applications of bacterial carbonate genesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology*, 126, 25-34.
- Mobley, H.L.T., Hausinger, R.P. (1989) Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization. *Microbiological Reviews*, 53, 85-108.
- Park, S., Park, Y., Chun, W., Kim, W., Ghim, S. (2010) Calcite forming bacteria for compressive strength improvement in mortar. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20, 782-788.

- Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A. (2014) Life-cycle inventory analysis of concrete production: a critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, 38-48.
- Phillips, A.J., Lauchnor, E., Eldring, J., Esposito, R., Mitchell, A.C., Gerlach, R. (2013) Potential CO₂ leakage reduction through biofilm-induced calcium carbonate precipitation. *Environmental Science and Technology*, 47, 142-149.
- Phung, Q.T., Maes, N., Schutter, G.D., Jacques, D., Ye, G. (2013) Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method. *Construction and Building Materials*, 47, 1488-1496.
- Qian, C.X., Wang, J.Y., Wang, R.X., Cheng, L. (2009) Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO₃ by *Bacillus pasteurii*. *Materials Science and Engineering*, 29, 1273-1280.
- Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., Bang, S.S. (2001) Remediation of concrete using microorganisms. *Aci Materials Journal*, 98, 3-9.
- Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., Ben Chekroun, K., Gonzalez Munoz, M.T. (2003) Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate biomineralization. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, 69, 2182-2193.
- Rong, H., Qian, C.X. (2012) Characterization of microbe cementitious materials. *Chinese Science Bulletin*, 57, 1333-1338.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., Bolio, H. (2011) Sustainable cement production — present and future. *Cement and Concrete Research*, 41, 642-650.
- Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K., Bang, S.S. (1999) Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 1563-1571.
- Tiano, P., Biagiotti, L., Mastromei, G. (1999) Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *Journal of Microbiological Methods*, 36, P. 139-145.
- Tobler, D.J., Maclachlan, E., Phoenix, V.R. (2012) Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies. *Ecological engineering*, 42, 270-278.

Van den Heede, P., De Belie, N. (2012) Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431-442.

Van Paassen, L., Ghose, R., van der Linden, T., van der Star, W., van Loosdrecht, M. (2010) Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 1721-1728.

Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W. (2010) Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*, 40, 157-166.

Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N. (2014) Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, 56, 139-152.

Wang, J.Y., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Verstraete, W. (2012) Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 26, 532-540.

Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A., Harkes, M.P. (2007) Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 24, 417-423.

Xu, J., Yao, W., Jiang, Z. (2014) Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 983-991.

Yadav, R., Labhsetwar, N., Kotwal, S., Rayalu, S. (2011) Single enzyme nanoparticle for biomimetic CO₂ sequestration. *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 263-271.