

УДК: 666.9

DOI: 10.20535/IWCCMM2024302721

ЗАЛІЗОБЕТОННІ КОНСТРУКЦІЇ: ДОПОМІЖНІ ЦЕМЕНТУЮЧІ МАТЕРІАЛИ. ОГЛЯД

Анатолій Клименко,

к.т.н, с.н.с., старший дослідник,
КНДІСЕ, Мін'юст України,
Aklimenko@meta.ua

Світлана Коваленко,

молодший науковий співробітник,
ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України,
kovalenko@paton.kiev.ua

Юрій Коваленко,

доктор філософії (Ph.D), асистент,
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
kovalenko.yurii@iill.kpi.ua

Анотація. Залізобетонні конструкції все більше охоплюють сфери впливу будівництва об'єктів промисловості та інфраструктури кожної країни. Але їх використання супроводжується й поглибленням проблем щодо працездатності, найвагоміша серед яких – структурна деградація під впливом умов експлуатації, а саме: погіршення механічних характеристик та характеристик міцності, розтріскування бетону, корозія сталевих арматур. Термін служби залізобетонних конструктивних елементів визначається якістю бетону та стійкістю проти корозії арматури, пов'язуючи між собою в залежність механічні властивості, руйнування та втомну довговічність. Все це обумовило визначення коло основних проблемних питань, серед яких найактуальніша – вдосконалення компонентного складу бетону. В статті узагальнено основні моменти та наведено результати роботи, отримані науковцями щодо цього питання.

Ключові слова: допоміжні цементуючі матеріали, залізобетонні конструкції, працездатність конструктивних елементів, розтріскування бетонів.

Abstract. Reinforced concrete structures increasingly cover the spheres of influence of the construction of industrial facilities and infrastructure of each country. But their use is accompanied by the deepening of performance problems, the most serious of which is structural degradation under the influence of operating conditions, namely: deterioration of mechanical and strength characteristics, cracking of concrete, corrosion of steel reinforcement. The service life of reinforced concrete structural elements is determined by the quality of the concrete and the corrosion resistance of the reinforcement, linking the mechanical properties, destruction and fatigue life. All this determined the definition of the main problematic issues, among which the most urgent is the improvement of the component composition of concrete. The article summarizes the main points and gives the results of the work obtained by scientists on this issue.

Key words: supplementary cementitious materials, reinforced concrete structures, performance of structural elements, cracking of concrete.

Сьогодні залізобетонні конструкції (ЗБК) впевнено лідирують як найбільш вживані, розповсюджені та перспективні будівельні матеріали завдяки здатності утворювати монолітну міцну тверду зв'язувальну матрицю між компонентами з характерними високими показниками допустимих навантажень, втомної довговічності, запасу міцності, достатньої для обмеження руйнівних зусиль, зосібна щодо пружної деформації завдяки бетону та напружень при розтягу завдяки застосуванню арматури, стійкості, а також витривалості в умовах експлуатації. Водночас сталеве армування конструкцій може зумовлювати як використання міцності сталі на розрив, так і її пластичності, виправданої та найбільш актуальної характеристики щодо сейсмостійких конструкцій. Серед загальноживаних переваг конструкцій ЗБК слід відзначити доступність, універсальність, простоту у роботі, легкість до формоутворення та багатопрофільну адаптивність до потреб будівництва (від найпростіших форм декоративного оздоблення до сучасних інноваційно-складних за дизайнерсько-архітектурним рішенням будівель, промислових та стратегічних об'єктів).

Цемент, заповнювачі та вода – основні компоненти бетону, структурні складові при виробництві якого еволюціонували від використання роман-цементу (пуцолану) та негашеного вапна до винаходу звичайного портландцементу (ЗПЦ), фібробетонів, використання асфальту (функцію цементу виконує бітум), введення допоміжних матеріалів (полімерних, цементних в'язучих, легких дріб-них заповнювачів, ультрадисперсних порошків, інгібіторів корозії, пласти-фікаторів тощо), а також армування (сталеві /базальтові/скло/лінгоцелюлозні та форто-фероволокна, поліпропіленові фібри тощо) [1-38].

Проте, планетарні кліматичні зміни, погіршення умови експлуатації та необхідність ремонту постійно вимагають прогресування підходів щодо вдосконалення компонентного складу вже існуючих сумішей поруч з пошуком новітніх задля збільшення ресурсу працездатності нових та продовження для

вже існуючих об'єктів, адже якість складу бетону визначає його довговічність, отже експлуатаційні характеристики всієї конструкції в цілому.

Удосконалення компонентного складу бетону

На сьогодні запропоновано декілька напрямків досліджень щодо вдосконалення композиційного складу бетонів: допоміжні цементуючі матеріали (ДЦМ); інгібітори корозії сталевих арматур; геополімерні бетони. Завдяки своїй здатності змінювати хімічний склад розчину, застосування інгібіторів та ДЦМ (золи винесення, пуцоланових матеріалів, вапняку, метакаоліну, відходів мармурового порошку, меленого гранульованого доменного шлаку (МГДШ) тощо), крім підвищення довговічності бетонних конструкцій, дозволяє частково замінити звичайний ПЦ, що позитивно впливає на загальний екологічний стан та оточуюче середовище.

Розтріскування ЗБК суттєво погіршує експлуатаційні властивості, працездатність та зменшує термін служби через розвиток корозійних процесів внаслідок проникнення агресивних речовин (хлоридів, сульфатів, води тощо), чого можна уникнути, досягнувши позитивного ефекту індивідуальним використанням та комбінування сумішей ДЦМ проти ЗПЦ, за рахунок зростання величини контролюючого показника – питомого опору системи [1-16]. Так, змішування цементу з золою винесення та/або доменним шлаком гальмує корозійний процес та наступного його впливу на погіршення властивостей бетону щодо імітації протиобмерзання в умовах сольового навантаження [1], а застосування інгібіторів корозії ефективно запобігає розвитку локальних та загальних корозійних процесів сталевих арматур [16]. Додавання ДЦМ покращує тривалу міцність, довговічність [2, 3, 12, 17, 18] та стійкість проти кислотного впливу [6, 7], що крім іншого обумовлено гальмуванням швидкості проникнення через здрібнення розміру пор бетону [2], а також сприяє зменшенню усадки бетону [5].

Використання суміші ЗПЦ з МГДШ, золою винесення, конденсованим кремнеземом та потрібною сумішшю зменшує швидкість корозії (мінімум на 50%) та вплив ефекту тріщиноутворення за рахунок контролюючого фактору у

вигляді питомого опору всієї системи проти наявності кисню у ЗПЦ [4]. Додавання вапнякового порошку призводить до утворення гемо- та моно-карбонату та стабілізації етtringіту, який за відсутності вапняку перетворюється в моносольфат [9]. Так, введення 5% вапняку збільшує об'єм гідратів, хімічну усадку та міцність на стиск, водночас цей ефект посилюється за рахунок утворення додаткового оксиду алюмінію в результаті реакції з золою виносення при її додаванні. Комбінування гранульованого мікрокремнезему з твердим суперпластифікатором сприяє зростанню міцності, поверхневого електричного опору та стійкості щодо проникності для суспензії мікрокремнезему та гранул [10]. За даними досліджень, для бетону М40, виготовленого з ПЦ марки 53, найкращий коефіцієнт заміщення МГДШ щодо досягнення результату співставлення зі звичайним бетоном за міцністю на стиск складає 25% [13]. Використання суміші МГДШ з метакаоліном покращує властивості затверділого бетону шляхом ущільнення його мікроструктури [14].

Проти класичного бетону, заміна на порошок вулканічної пемзи (10% та 20%) з додаванням поліпропіленового волокна (до 0,50%) зумовлюють незначне збільшення міцності на стик та зменшення сорбційної здатності за рахунок вмісту пемзи щодо бетонних сумішей з часткою заміни цементу 10% пемзою та 0,20% волокна, а відповідні до добавок частки заміни у 10% та 0,50% оптимізують значення уявної міцності на розтяг і згин [18]. Додавання волокна до сумішей збільшує уявну міцність на розтяг і вигин, але зменшує осадження.

Ефективним пуцолановим матеріалом є кремнезем – при гідратації це-менту реагує з портландитом $\text{Ca}(\text{OH})_2$, утворюючи більшу кількість гідратів силікату (С-S-H) та алюмінату кальцію (С-A-H), які сприяють зменшенню пористості та ущільнюванню структури бетону [19]. Щодо ефективної кількості кремнезему в бетоні, авторами зазначалися: частки заміщення цементних матеріалів від 8% до 10% [20] та до 30% [11], котрі здатні прискорювати гідратацію цементу, скорочувати час початкового/кінцевого схоплювання завдяки утворенню додаткових центрів С-S-H, а також покращувати реологічні властивості (пластичну в'язкість, межу плинності); збільшення частки до 15%

покращує аутогенічну усадку бетону та короткотривалі механічні властивості (міцність на стиск, модуль пружності на розтяг), знижує основну рухливість та ступінь розширення [21]; за значень 6% та 10% швидкість втрати міцності при 600 °С зменшується відповідно на 6,7% та 14,1%, а оптимальне дозування кремнезему та цемент/вода складає відповідно 6% та 0,35 [22]; частки заміщення від 8% до 12% [15, 23, 24], з досягненням найвищої міцності на стиск і розрив через 28 днів, за оптимального значення 10% зменшенням пористості (об'ємна частка нешкідливих і менш шкідливих пор складає < 200 нм) забезпечує найнижчу проникність, а отже найкращу стійкість проти дифузії корозійноактивних речовин; збільшення частки заміщення до 10% на мікрокремнезем (вміст SiO₂ 86,3%) та мікрокремнезем високої чистоти (вміст SiO₂ 96%) зменшує осад на 27,0% та 33,6%, концентрацію кисню в бетоні – на 13,7% та 25,5%, загальну пористість – на 41,4% та 57,3% відповідно, ущільнюючи мікроструктуру за рахунок зменшення частки макропор (>1000 нм) з одночасним збільшенням частки мезо- (100–1000 нм) та капілярних пор (0–100 нм), збільшує його кубічну міцність на стиск та розколювання – на 26,7% та 40,7% і 44,7% та 57,4% відповідно [25]. Проте, додавання диспергатора на основі полікарбосилатного ефіру (дозування від 0,6% до 2,4% по масі в'язучого) до ЗПЦ зменшує в'язкість та межу плинності, міцність на стиск протягом першого дня через вплив ефекту розведення цементу та пригнічення кінетики його гідратації на ранній стадії [11]. Крім того, в умовах змінного змочування (модельний розчин морської води, натурні випробування в приливній зоні) бетонні суміші з часткою заміщення 7% та 10% на кремнезем, як і суміші з МГДШ, виявили більш високу втрату міцності проти ПЦ, а зі збільшенням кремнезему зростало капілярне водо-поглинання з погіршенням характеристик зразків щодо всіх умов впливу [26].

Комбіноване використання мікрокремнезему та ультрадисперсного TiO₂ (загальним рівень заміни 5%, 10% та 15%) покращує експлуатаційні властивості як класичного цементного, так і фібробетону (сталева фібра у кількості 0,5% від об'єму бетону), з досягненням найкращих значень за показниками

стійкості/міцності (на стиск, розтяг, вигин, удар), водопоглинання та сорбції при оптимальній суміші 9,5% та $0,5\text{TiO}_2$ [27].

На відміну від річкового, кораловий піскобетон з ДЦМ (5% метакаоліну), відрізняється відмінною довговічністю та вищою міцністю на ранній стадії стиску за рахунок високої водопоглинальної здатності коралового піску, усадки при висиханні та глибини карбонізації бетону, а підвищення стійкості щодо проникнення хлоридів / сульфатів забезпечується покращенням мікро-структури за рахунок пуцоланової реакції та внутрішнього затвердіння, водночас додаткове введення 15% доменних шлаків призводить до збільшення міцності на 19% [28].

Включення відходів мармурового порошку (заміна 15% піску), метакаоліну (заміна 10% цементу) та кремнезему дозволяє зменшити глибину карбонізації бетону [29]. Часткова заміна цементу сумішшю золи винесення (поліпшує властивості бетону з періодом твердіння) з кремнеземом (поліпшує ранню міцність) покращує довговічність бетону щодо стійкості проти дифузії хлоридів та карбонізації [30], а комбінована суміш кремнезему та відходів скла (дрібний заповнювач) підвищує міцність свіжого та затверділого бетону [12, 31, 32]. Так, бетонна суміш за оптимального значення концентрації заповнювача 60% у вигляді відходів медичного скла, як часткової заміни природнього подрібненого піску, мала найщільнішу структуру з більшою кількістю гідрату силікату кальцію та характеризувалася найефективнішим покращенням механічних властивостей та довговічності [32]. При дослідженні редиспергованих полімерів (дозування від 1 до 5 мас. %) на водоутримуючу здатність та набір міцності визначено, що вінілацетат/версатат і сополімер вінілакрилату можуть зменшувати руйнівний вплив агресивного середовища на конструкції з цементу [33].

Для бетонів з надвисокими експлуатаційними характеристиками додавання легких дисперсних заповнювачів (ЛДЗ) крупно-пористої структури в умовах підвищеної вологості демонструє високу абсорбцію та легку десорбцію, зумовлюючи внутрішній ефект затвердіння, покращення якого досягається

збільшенням вмісту заповнювачів та зменшенням розміру пор [34]. Також вони забезпечують легкість та високу міцність, водночас суттєве покращення внутрішнього ефекту затвердіння досягається попереднім змочуванням водою впродовж 24 годин, а зовнішнього – термічним способом з використанням сухого жару, сумісна дія яких покращує щільність міжфазної перехідної зони та зменшує пористість, що дозволяє збільшити міцність на стиск (>155 МПа) та зменшити щільність (<2100 кг/м³) [35].

Щодо екологічного аспекту, на виробництво ПЦ припадає $\sim 5\text{...}7\%$ світових викидів CO_2 , отже цікавим буде використання відходів ливарного піску (ВЛП), який відіграє роль пустот в мінеральному заповнювачі [36] та геополімер-них бетонів [37]. Так, введення 40% ВЛП (вміст кремнезему та глинозему перевищує 80 %, співвідношення $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ складає 2,5) в комбінуванні з метакаоліном, дозволило збільшити міцність бетону, що самоущільнюється за відсутності збитків щодо інших його властивостей (міцність на стиск зросла на 17,2 % проти контрольного бетону у віці зразків 56 днів) [36]. Щодо геополімерних бетонів, то на думку авторів [37] вони, поруч з іншими ДЦМ, потенційно здатні стати стійкою альтернативою ПЦ та зменшити вплив бетонної промисловості на оточуюче середовище.

Армування бетонів

Задля покращення експлуатаційних властивостей найбільш розповсюдженим є армування бетонних конструкцій сталеву арматурою, яке супроводжується розвитком корозійного процесу під впливом проникнення агресивного середовища (хлоридів, сульфатів тощо), домінуючим контролюючим параметром якого є границя поділу сталь/бетон, оскільки ініціація корозії відбувається на нижній стороні арматури (щодо напрямлення лиття), незалежно від типу зв'язувального та співвідношення вода/бетон, проте сам корозійний процес характеризується стадійним перебігом процесів пасивації/депасивації [8].

Більш перспективним з цієї точки зору є використання фібр як самостійно, так і в комбінації з ДЦМ. Так, щодо дослідження впливу армування на властивості бетонів з метою отримання більш пластичного високоміцного матеріалу, авторами [38] було встановлено, що комбінування кремнезему, здатного за концентрації 15% від маси цементу (водоцементне співвідношення 0,38) збільшувати механічну міцність та модуль пружності бетону, зі сталеву фібру (співвідношення сторін довжина/діаметр волокна 65 та 80, об'ємні частки волокна 0,5% та 1%), суттєво підвищує ударну в'язкість бетону, яка зростає зі збільшенням об'ємної частки волокна, а міцність сталевібробетона в загальному випадку визначається вмістом кремнезему, об'ємною часткою волокна та співвідношенням сторін волокна. Дослідження щодо впливу окремого та комбінованого впливу кремнезему (мікро- частка заміщення від 8% до 12%, нано- частка заміщення від 1% до 3%) та сталевих (загнути кінці, частка заміщення від 0,2% до 1,5%) та форта-фероволокон (частка заміщення від 0,2% до 0,8%) на механічні властивості високоміцних бетонів (фібробетонів) виявили, що останні зменшують рухливість бетонного розчину проти сталевих, які суттєво збільшують міцність на стиск за рахунок більш високих значень границі міцності та модуля пружності [39].

Як і у випадку композитів на основі синтетичних матеріалів, армування біокомпозитами (напівсухий спосіб виготовлення) на основі лігноцелюлозних волокон деревних рослин (оптимальне співвідношення волокна, ПЦ, рідке скло Na_2SiO_3 та цементний камінь 1:3,5:0,7:0,07) обумовлює задовільні механічні властивості (вигин, міцність внутрішнього з'єднання) та термічну стабільність щодо термічного розкладу та карбонізації після 28 днів тверднення проти ЗПЦ [40]. Водночас, авторами також зазначається можливість вдосконалення сумісності фіброцементу шляхом поверхневої модифікації натуральних волокон та використання більш сумісних добавок.

Ефективними є поліпропіленові фібри [18, 41]. Проте порівняння впливу сталеві (кількість 15...25 $\text{кг}/\text{м}^3$, довжина/діаметр – 50/1 мм) та поліпропіленові фібри (кількість 2...3 $\text{кг}/\text{м}^3$, довжина/діаметр – 35/0,68 мм) на

експлуатаційні властивості довело, що сталева фібра більшою мірою підвищує міцність бетону на стик, але пропілена – має кращий економічний ефект. Водночас, обидва типи дисперсної арматури однаково підвищують міцність на вигин на 27–34%, морозостійкість на 50 циклів, корозійну стійкість у кислому середовищі (у кількості 20 кг/м³ та 2,5 кг/м³), покращуючи ресурс працездатності, зменшують стійкість проти стираності на 15–35 % [41].

Також розглядається в якості потенційної стійкої альтернативи традиційним ЗБК можливість армування бетону ЛДЗ та полімерними скло-/базальтовим фіброволокном [34, 35, 42].

ВИСНОВКИ

В даній роботі, представлено огляд на основні роботи за напрямком дослідження впливу наповнювачів та допоміжних цементуючих матеріалів у питанні зменшення руйнуючого впливу корозії на цементні та бетонні вироби.

Узагальнення розглянутої проблематики дозволяє стверджувати, що в різних умовах випробування та впливу руйнуючого середовища є різні аспекти, котрі впливають на зменшення руйнуючої дії середовищ не тільки як на контрольні склади так і на модифіковані суміші, що і підтверджується широкою вибіркою робіт пов'язаних з даною тематикою. Тому питання дослідження стійкості будівельних сумішей до впливу агресивних середовищ є суттєвою областю для розробки нових складів будівельних в'язучих та модифікації існуючих відповідно до постійного розвитку ринку будівельних матеріалів та досліджень їх властивостей.

Список літератури:

1. Polder, R.B., Peelen, W.H.A. (2002). Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. *Cem. Concr. Compos.*, 24(5), 427-435. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00074-9)

2. Uzal, B., Turanli, L. (2003). Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. *Cem. Concr. Res.*, 33(11), 1777-1781. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00173-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00173-X)
3. Colak, A. (2003). Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. *Cem. Concr. Res.*, 33(4), 585-593. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01027-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01027-X)
4. Scott, A.N., Alexander, M.G. (2007). The influence of binder type, cracking and cover on corrosion rates of steel in chloride-contaminated concrete. *Mag. Conc. Res.*, 59(7), 495-505. <https://doi.org/10.1680/macrc.2007.59.7.495>
5. Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cem. Concr. Compos.*, 29(7), 542-549. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>
6. Rahmani, H., Ramazanianpour, A.A. (2008). Effect of binary cement replacement materials on sulfuric acid resistance of dense concretes. *Mag. Concr. Res.*, 60(2), 145-155. <https://doi.org/10.1680/macrc.2008.60.2.145>
7. Siad, H., Mesbah, H.A., Khelafi, H., Kamali-Bernard, S., Mouli, M. (2010). Effect of mineral admixture on resistance to sulphuric and hydrochloric acid attacks in self-compacting concrete. *Can. J. Civ. Eng.*, 37(3), 441-449. <https://doi.org/10.1139/L09-157>
8. Angst, U.M., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, Ø. (2011). Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. *Corrosion Science*, 53(4), 1451-1464. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.025>
9. De Weerd, K., Haha, M.B., Saout, G.L., Kjellsen, K.O., Justnes, H., Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cem. Concr. Res.*, 41(3), 279-291. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>
10. Motahari Karein, S.M., Ramezaniyanpour, A.A., Ebadi, T., Isapour, S., Karakouzian, M. (2017). A new approach for application of silica fume in concrete:

- Wet granulation. *Constr. Build. Mater.*, 157, 573-581.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.132>
11. Meng, W., Kumar, A., Khayat, K.H. (2019). Effect of silica fume and slump-retaining polycarboxylate-based dispersant on the development of properties of portland cement paste. *Cem. Concr. Compos.*, 99, 181-190.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.021>
12. Mehta, A., Ashish, D.K. (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *J. Build. Eng.*, 29, 100888.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100888>
13. Jahagirdar, A., Pathak S. (2022). Using GGBS, An Experimental Investigation of Concrete Characteristics Was Conducted (Ground Granulated Blast Furnace Slag). *IJRASET*, 10(V), 5109 - 5113.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.43606>
14. Duan, P., Shui, Z., Chen, W., Shen, C. (2013). Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *J. Mater. Res. Technol.*, 2(1), 52-59.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.03.010>
15. Nguyen, L.K., Nguyen, T.T.T., Nguyen, S.T., Ngo, T.Q., Le, T.-H., Dang, V.Q., Ho, L.S. (2023). Mechanical properties and service life analysis of high strength concrete using different silica fume contents in marine environment in Vietnam. *J. Eng. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.08.005>
16. Vaysburd, A.M., Emmons, P.H. (2004). Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: concepts or misconcepts. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 255-263. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00044-1)
17. Juenger, M.C.G., Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cem. Concr. Res.*, 78(A), 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
18. Zeyad, A.M., Khan, A.H., Tayeh, B.A. (2020). Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder

and polypropylene fibers. *J. Mater. Res. Technol.*, 9(1), 806-818.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.021>

19. Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H. (2009). Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. *Cem. Concr. Compos.*, 31(10), 769-775. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.005>

20. Neville, A. (2000). Good reinforced concrete in the Arabian Gulf. *Mater. Struct.*, 33, 655-664. <https://doi.org/10.1007/BF02480605>

21. Mazloom, M., Ramezani pour, A.A., Brooks, J.J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 26(4), 347-357. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9)

22. Behnood, A., Ziari, H. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cem. Concr. Compos.*, 30(2), 106-112.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003>

23. Khan, M.I. (2003). Isoresponses for strength, permeability and porosity of high performance mortar. *Build. Environ.*, 38(8), 1051-1056.
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00111-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00111-1)

24. Imam, A., Kumar, V., Srivastava, V. (2018). Review study towards effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete. *Adv. Concr. Constr.*, 6(2), 145 - 152. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.145>

25. Luo, T., Hua, C., Liu, F., Sun, Q., Yi, Y., Pan, X. (2022). Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete. *Case Stud. Constr. Mater.*, 16, e01048.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01048>

26. Ganjian, E., Pouya, H.S. (2009). The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.*, 23(2), 644-652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.009>

27. Karthikeyan, B., Dhinakaran, G. (2018). Influence of ultrafine TiO₂ and silica fume on performance of unreinforced and fiber reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.*, 161, 570-576. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.133>

28. Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Yu, R., Zhang, G. (2018). Durability and microstructure of coral sand concrete incorporating supplementary cementitious materials. *Constr. Build. Mater.*, 171, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.082>
29. Ashish, D.K. (2019). Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development. *J. Clean. Prod.*, 211, 716-729. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.245>
30. Anwar, M., Emarah, D.A. (2020). Resistance of concrete containing ternary cementitious blends to chloride attack and carbonation. *J. Mater. Res. Technol.*, 9, 3198-3207. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.066>
31. Huynh, T.-P., Ho, L.S., Ho, Q.V. (2022). Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag. *Constr. Build. Mater.*, 347, 128512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128512>
32. Ho, L.S., Huynh, T.-P. (2022). Recycled waste medical glass as a fine aggregate replacement in low environmental impact concrete: Effects on long-term strength and durability performance. *J. Clean. Prod.*, 368, 133144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133144>
33. Kovalenko, Y., Tokarchuk, V., Kovalenko, S., Vasylykevych, O. (2022). Identifying the influence of redispersed polymers on cement matrix properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 118(6). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262438>
34. Shen, P., Lu, L., Wang, F., He, Y., Hu, S., Lu, J., Zheng, H. (2020). Water desorption characteristics of saturated lightweight fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 106, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103456>
35. Guo, K.-Z., Zhang, G.-Z., Li, Y., Yang, J., Ding, Q.-j. (2024). The mechanism of curing regimes on the macroscopic properties and microstructure of ultra-high performance concrete with lightweight aggregates. *J. Build. Eng.*, 82, 108236. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108236>

36. Ashish, D.K., Verma., S.K. (2021). Robustness of self-compacting concrete containing waste foundry sand and metakaolin: A sustainable approach. *J. Hazard. Mater.*, 401, 123329. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123329>
37. Noushini, A., Nguyen, Q.D., Castel, A. (2021). Assessing alkali-activated concrete performance in chloride environments using NT Build 492. *Mater. Struct.*, 54(2), 57-71. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01652-7>
38. Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ., Şahin, Y. (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Constr. Build. Mater.*, 22(8), 1874-1880. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.017>
39. Hasan-Nattaj, F., Nematzadeh, M. (2017). The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica. *Constr. Build. Mater.*, 137, 557-572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.078>
40. Hasan, K.M.F., Horváth, P.G., Alpár, T. 2021. Development of lignocellulosic fiber reinforced cement composite panels using semi-dry technology. *Cellulose*, 28, 3631-3645. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03755-4>
41. Kos, Ž., Kroviakov, S., Kryzhanovskyi, V., Hedulian, D. (2022). Strength, Frost Resistance, and Resistance to Acid Attacks on Fiber-Reinforced Concrete for Industrial Floors and Road Pavements with Steel and Polypropylene Fibers. *Materials*, 15(23), 8339. <https://doi.org/10.3390/ma15238339>
42. Abed, M., Anagreh, A., Tošić, N., Alkhabbaz, O., Alshwaiki, M., Černý, R. (2022). Structural Performance of Lightweight Aggregate Concrete Reinforced by Glass or Basalt Fiber Reinforced Polymer Bars. *Polymers*, 14(11), 2142 <https://doi.org/10.3390/polym14112142>