

ВПЛИВ ДОБАВОК ПЛАСТИФІКУЮЧЕ-ПРИСКОРЮЮЧОЇ ДІЇ НА КІНЕТИКУ НАБОРУ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ПРИ ЗНАКОЗМІННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

INFLUENCE OF PLASTICIZING-ACCELERATING ADDITIVES ON THE KINETICS OF CONCRETE STRENGTH AT ALTERNATING TEMPERATURES

Трефлер Р. Ю. асп. ORCID [0000-0001-8478-8090], **Русин Б. Г.** к.т.н., доц., ORCID [0000-0002-2021-3906] (Національний університет “Львівська політехніка”)

Trefler R. PhD student ORCID [0000-0001-8478-8090], **Rusyn B.** PhD., assistant prof. ORCID [0000-0002-2021-3906] (Lviv Polytechnic National University)

У статті наведено результати досліджень впливу суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу та прискорювачів тверднення на кінетику набору міцності бетону в умовах знакозмінних температур. Методом математичного планування експерименту проведено оптимізацію складів бетонів модифікованих добавками пластифікуюче-прискорюючої дії.

The article presents the results of a comprehensive study on the influence of polycarboxylate-based superplasticizers and non-chloride hardening accelerators on the strength development kinetics of concrete under alternating temperature conditions, which are typical for the cold seasons. The difference between these types of additives is depicted: the polycarboxylate ether-based superplasticizer demonstrated a significant water-reducing effect, improving workability and strength by enhancing cement particle dispersion and hydration. However, it slightly delayed the early strength gain. The addition of the hardening accelerator compensated for this effect by promoting rapid hydration of clinker minerals and slightly lowering the freezing point of the mix water. The findings confirm that the combination of polycarboxylate superplasticizers and hardening accelerators is an effective technological solution for enhancing the strength development kinetics of concrete in fluctuating and low-temperature environments. Such an approach promotes faster early strength development, facilitating earlier formwork removal and load application. At the same time, it allows for reduced cement usage and lowers the energy requirements for heating concrete during cold-weather construction. Winter concreting presents

significant technological challenges, including the risk of freezing water within the concrete matrix. One of the most critical factors is the prevention of water freezing inside the concrete matrix and ensuring the achievement of a minimum critical strength as early as possible. Therefore, it is necessary to use heated mixing water to maintain the initial temperature of the concrete mix above +5 °C. Proper curing conditions should also be ensured throughout the early hardening period.

Ключові слова: бетон, полікарбоксилатний суперпластифікатор, прискорювач тверднення, знакозмінні температури, структуроутворення, міцність.

concrete, polycarboxylate superplasticizer, hardening accelerator, temperature, structure formation, strength

Аналіз останніх досліджень. Одним з важливих напрямків будівництва є забезпечення оптимальної технології виготовлення бетону, зокрема в холодний період року. Зимове бетонування вимагає спеціальних заходів у зв'язку з певними ризиками, що виникають під час проведення робіт в умовах від'ємних температур, таких як значне сповільнення набору міцності, гальмування гідратації та кристалізації води в тілі бетону, що в подальшому може призвести до руйнування структури неповністю сформованого цементного каменю, деформації конструкції та посиленого утворення тріщин [1, 2]. Тому в умовах пошуку найбільш передових технологічних рішень перед добавками для бетонів стоїть завдання показати їх максимальну ефективність на 3-х рівнях: технологічному, технічному та економічному [3,4]. На даний час гостро стоїть необхідність раціональної витрати цементу та економії електроенергії при прогріві бетону в умовах знакозмінних та від'ємних температур. При цьому постає завдання забезпечення кінетики набору міцності бетону на достатньому рівні, дотримуючись високих темпів будівництва та оборотності опалубки [5-7]. Одним з основних завдань при зимовому бетонуванні є недопущення замерзання води в бетоні та забезпечення досягнення критичної міцності на рівні 5-10 МПа і продовження її набору без втрати кінцевих характеристик [8]. Процес тверднення бетону залежить від багатьох факторів, зокрема температури навколишнього середовища та використання хімічних добавок [9]. Умови тверднення можуть змінюватися внаслідок коливань температур, що впливає на швидкість гідратації цементу та формування структури цементного каменю. При від'ємних температурах можлива повна зупинка гідратації бетону або замерзання води, саме тому необхідно забезпечити виготовлення бетонних сумішей з використанням теплої води, при цьому після вкладання в опалубку їх температура має бути не нижче 5 °C [10]. Застосування суперпластифікаторів та прискорювачів тверднення дозволяє регулювати кінетику набору міцності бетону за від'ємних та знакозмінних температур.

Суперпластифікатори на основі етерів полікарбоксилатів суттєво знижують водоцементне відношення та підвищують рухливість бетонної суміші, при цьому діють через два основні механізми: електростатичне відштовхування та стеричний ефект. В результаті цементні частинки рівномірно розподіляються в суміші, зменшуючи водопотребу та покращуючи гідратацію. Разом з тим, спостерігається певне уповільнення початкового тверднення через адсорбцію на частинках цементу [11, 12]. Тому доцільно поєднати етери полікарбоксилатів з прискорювачами, які понижують температуру замерзання рідкої фази та є ефективними на ранньому етапі структуриутворення.

Мета та завдання роботи. Дослідження впливу суперпластифікаторів на основі етерів полікарбоксилатів та прискорювачів тверднення на кінетику набору міцності бетонів класу C20/25 з рухливістю сумішей P4 при знакозмінних температурах.

Матеріали і методи досліджень. Бетонні суміші виготовляли з використанням портландцементу СЕМ II/A-M(S-LL) 42,5 R ПрАТ «Миколаївцемент». Як дрібний та крупний заповнювач застосовували пісок Миколаївського родовища ($\rho_{\text{нас}}=1420 \text{ кг/м}^3$, $M_k=1,4$) та гранітний щебінь фракції 5-20 мм відповідно. В роботі використовували добавки: STACHEMENT 2052 - суперпластифікатор на основі етерів полікарбоксилатів, що відрізняється значною водоредукцією, швидким ростом міцності та подовженим терміном зберігання рухливості, а також BETODUR A4 - безхлоридний прискорювач твердіння бетону, що не знижує втрату рухливості суміші протягом 2 год та пришвидшує ранній набір міцності бетону. Для визначення впливу витрати добавок пластифікуюче-прискорюючої дії на міцність бетонів при знакозмінних температурах приймали їх дозування в кількості 0; 0,7 та 1,4% від маси портландцементу.

Результати досліджень. Витрата портландцементу для всіх складів важких бетонів становила 310 кг/м^3 . Для базового складу та з додаванням прискорювача співвідношення компонентів Ц:П:Щ складало 1:2,05:3,71. В/Ц=0,74. Для складів з використанням суперпластифікатора та його комбінації з прискорювачем співвідношення Ц:П:Щ складало 1:2,35:3,71 (В/Ц=0,61). Бетонні суміші виготовлені при початковій температурі 8°C таким чином, щоб після витримання 90 хв на холоді і подальшому перемішуванні була збережена рухливість S4 - осадка конуса порядку 20-21 см. Як показано на рис.1, в процесі тверднення бетону температура змінювалась в діапазоні від -14°C до 12°C . Набір міцності відбувався протягом лютого та перших днів березня 2025 року. При цьому максимальна температура піднімалась до 12°C в останні 4 дні. Температура в ранній період тверднення знаходилась у межах від -3°C до 2°C .

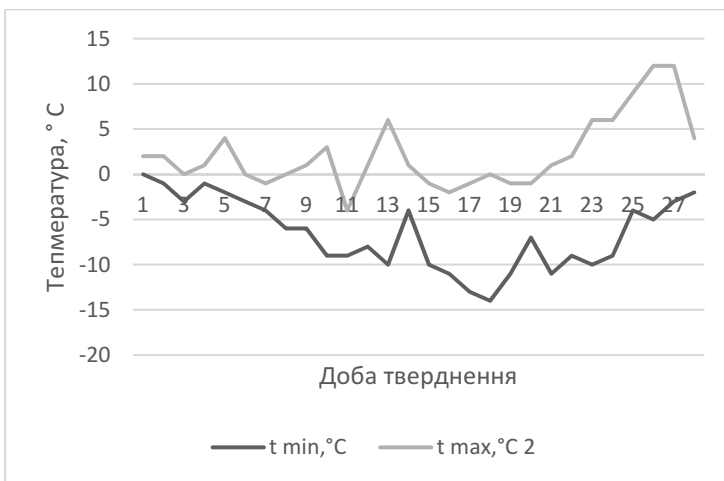


Рис. 1. Графік зміни температури під час тверднення бетонів

Встановлено ефекти дії добавок у бетонних сумішах і бетоні при його твердненні в холодний період року. Як видно з рис.2, міцність бетону без добавок через 3 доби тверднення становить 6,5 МПа. При використанні 1,4% добавки прискорювача міцність зростає до 9,06 МПа, що на 39% більше ніж бетону без добавок. При використанні 1,4% суперпластифікатора міцність бетону зростає до 12,18 МПа, що на 87% більше ніж міцність контрольного складу. Поєднання суперпластифікатора та прискорювача дозволило отримати міцність 13,82 МПа через 3 доби тверднення в умовах знакозмінних температур, що понад вдвічі більше від контрольного складу. Через 7 діб тверднення контрольний бетон досяг міцності 12,07 МПа. З використанням прискорювача – 16,93 МПа, що на 40% більше ніж бетону без добавок. При додаванні 1,4% суперпластифікатора - 21,84 МПа, а при поєднанні добавок – 23,67 МПа. Значний приріст міцності при використанні добавок досягається і через 28 діб: контрольний бетон набирає міцність 22,3 МПа, а з використанням прискорювача - 27,95 МПа. Через 28 діб тверднення міцність на стиск бетону із суперпластифікатором становить 36,7 МПа (приріст 65%), а при поєднанні добавок пластифікуючої та прискорюючої дії міцність на стиск становить 39,7 МПа, що на 78% більше від контрольного складу.

Для визначення впливу параметрів бетонів модифікованих добавками пластифікуюче-прискорюючої дії проведено експериментальні дослідження відповідно до плану двофакторного трирівневого експерименту, в якості змінних факторів якого задано кількість суперпластифікатора полікарбоксилатного типу – ПК ($X_1=0; 0,7; 1,4$ мас.%) та прискорювача тверднення – ПТ ($X_2=0; 0,7; 1,4$ мас.%).

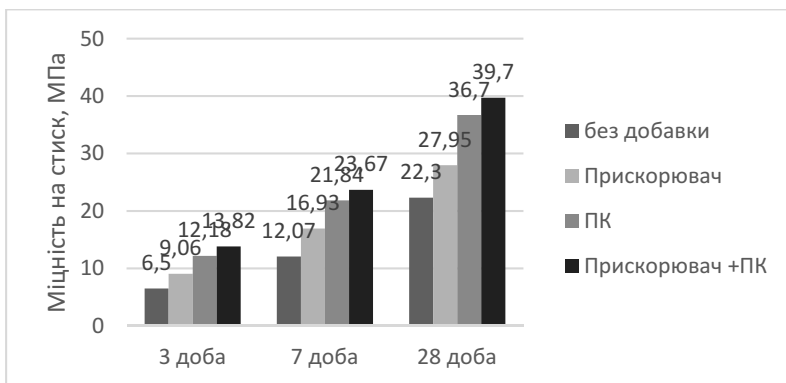


Рис. 2. Кінетика набору міцності бетону з використанням різних типів добавок

На основі графічної інтерпретації отриманих математичних моделей запроєктовано ефективні склади бетонів класу С20/25 за критеріями марочної міцності (рис. 3). Суміші бетонів при витраті добавок суперпластифікатора та прискорювача тверднення, що відповідає найвищому рівню варіювання, характеризуються наступними показниками: марка за легкоукладальністю S5 (ОК=23 см), середня густина $\rho_{\text{сер}}=2390 \text{ кг/м}^3$ та об'єм втягнутого повітря – 1,8%, тривалою збереженістю осадки конуса в часі (2 год) та низьким розчино- та водовідділенням. При цьому розширюються можливості використання розроблених сумішей бетонів у практиці будівництва, особливо при виготовленні щільноармованих конструкцій складної форми та транспортуванні сумішей бетононасосами.

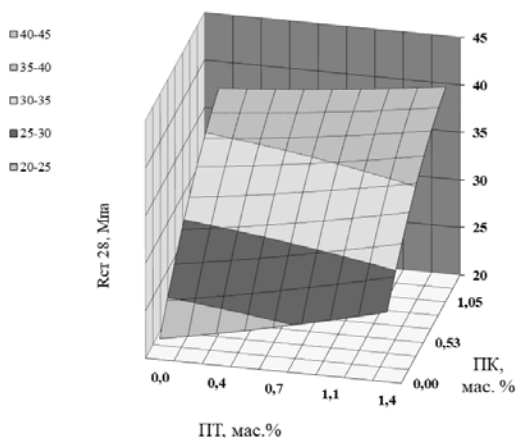


Рис. 3. Ізопараметрична поверхня міцності бетонів із добавками ПК та ПТ через 28 (б) діб тверднення

Таким чином, поєднання суперпластифікаторів та прискорювачів забезпечує найкращу кінетику набору міцності в умовах знакозмінних температур. При цьому суперпластифікатор на основі полікарбоксилатних етерів забезпечує зниження пористості та підвищення кінцевої міцності бетону. Прискорювачі тверднення збільшують швидкість гідратації цементу за рахунок активації процесів гідратації клінкерних мінералів та скорочення термінів тужавіння.

Висновки. Технологічні рішення при зимовому бетонуванні спрямовані на формування щільної структури цементуючої матриці, що досягається за рахунок пониження водоцементного відношення при використанні полікарбоксилатних суперпластифікаторів. Проте при використанні суперпластифікаторів спостерігається певне сповільнення початкової кінетики тверднення, тому найбільш доцільним є поєднання етерів полікарбоксилатів та прискорювачів, які знижують температуру замерзання рідкої фази та прискорюють кінетику набору міцності бетонів. На ранніх етапах тверднення прискорювач дозволяє отримати приріст міцності порівняно з контрольним складом до 40%, а через 28 діб - на 25%. Поєднання добавок полікарбоксилатного суперпластифікатора та прискорювача тверднення забезпечує підвищення міцності до 39,7 МПа, в той час як міцність бетону без добавок становить 22,3 МПа через 28 діб тверднення.

1. Nassif Y., Petrou M. Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, Vol. 44:161–167 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.016>
2. Nilimaa J., Zhaka V. An Overview of Smart Materials and Technologies for Concrete Construction in Cold Weather, 2023, Eng, E-ISSN 2673-4117, Vol. 4, no 2, p. 1550-1580 DOI:10.3390/eng4020089
3. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони. Львів: Вид-во ТОВ «Простір-М», 2021. 206 с.
4. Дворкін Л.І., Житковський В.В., Бордюженко О.М., Марчук В.В. Рубцова Ю.В. Бетони нового покоління. Рівне: НУВГП. 2021. 300с.
5. Дворкин, Л. (2018). Ефективна технологія високоміцних бетонів. Будівельні матеріали та вироб. (5-6(99)), 32–36. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2018-99-02>
6. Дворкін Л.І. Гідротехнічні бетони: навчальний посібник. – Київ: Каравела, 2023. 285 с.
7. Кровяков С. О., Шестакова С. Є. Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю та повітрявтягуючою добавкою. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 144–158. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144>
8. Huang D., Feng Y., Xia Q., Tian J., Li X. Research on mechanical properties and durability of early frozen concrete. A review. *Construction and Building Materials*, 2024, Vol. 425, 26 135988. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135988>
9. Дворкін Л.І., Лаповська С.Д. Будівельне матеріалознавство. Підручник. - Рівне: НУВГП, 2016.- 448с.
10. Саницький М. А., Марушак У. Д., Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів // Будівельні матеріали і вироб. 2018. №3–4. С. 36–39.
11. Rao, Uppala & N, Venkata & Kavitha, Chagarlamudi & Madhavi, Yellinedi & Ponduri, Samatha. (2024). Polycarboxylate Superplasticizers Used in Concrete: A review. *International Journal of Experimental Research and Review*. 38. 69-88. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2024.v38.007>.
12. B. Mazur, A. Kotwa Influence of Low Temperature on Concrete Properties. 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 471 032026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032026>