

УДК 624.21

Борисевич М. О., <https://orcid.org/0000-0003-1391-4437>Волошко Ю. С., <https://orcid.org/0000-0001-6703-2718>Борисенко М. А., <https://orcid.org/0000-0001-97723536>

Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»),  
м. Київ, Україна

## АНАЛІЗ АМЕРИКАНСЬКОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ МОРОЗОСТІЙКИХ ДОБАВОК В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

### *Анотація*

**Вступ.** У статті розглянуто досвід США щодо використання морозостійких добавок у залізобетонних конструкціях транспортних споруд. Проаналізовано технології підвищення довговічності бетону в умовах циклічного заморожування та відтавання, наведено приклади застосування у мостах штатів Міннесота, Мічиган та Аляска. Представлено результати досліджень ефективності різних типів добавок та їхній вплив на експлуатаційні характеристики конструкцій. Визначено можливості адаптації американського досвіду в Україні.

**Проблематика.** Основною проблемою залізобетонних конструкцій транспортних споруд у холодних регіонах є їхня недостатня стійкість до циклів заморожування-відтавання. Вода, яка проникає у пори бетону, під час замерзання розширюється та створює внутрішні напруження, що призводить до утворення тріщин, відшарування поверхні та поступової втрати його міцності. У США ця проблема особливо актуальна для мостів і дорожніх покриттів у північних штатах, де кількість циклів заморожування-відтавання може перевищувати сто на рік. Розв'язанням зазначеної проблеми є застосування морозостійких добавок, які зменшують водопроникність бетону та підвищують його довговічність.

**Матеріали й методи.** Для підвищення морозостійкості бетону американські інженери використовують різні типи добавок: повітровтягувальні агенти, які формують мікропори; мінеральні добавки (зола-винесення, доменний шлак, мікрокремнезем), які ущільнюють структуру цементного каменю; а також сучасні наномодифіковані матеріали. Методи дослідження включають лабораторні випробування на цикли заморожування-відтавання, вимірювання водопроникності бетону, аналіз мікроструктури та довготривалі експлуатаційні спостереження на реальних транспортних спорудах.

**Результати.** Дослідження показали, що застосування повітровтягувальних добавок забезпечує морозостійкість бетону на рівні 300 – 400 циклів заморожування-відтавання. Використання мікрокремнезему дозволяє знизити водопроникність бетону на 40 – 45 %, що значно зменшує ризик утворення тріщин. Комплексні добавки (поєднання повітровтягувальних агентів із шлаковими матеріалами) демонструють найвищу ефективність — до 500 циклів без втрати міцності. Практичні приклади мостів у Міннесоті, Мічигані та Алясці підтверджують, що такі технології подовжують строк служби споруд на десятки років.

**Висновки.** Американський досвід доводить, що застосування морозостійких добавок є ключовим чинником у забезпеченні довговічності транспортних споруд у холодному кліматі. Використання різних типів добавок дозволяє адаптувати бетонні суміші до конкретних умов експлуатування, зменшити витрати на ремонт і підвищити надійність інфраструктури. Для України актуальним є впровадження подібних технологій із урахуванням місцевих ресурсів (зола-винесення, шлаки) та вдосконалення нормативної бази для контролю морозостійкості бетону.

**Ключові слова:** внутрішні напруження, водопроникність бетону, доменний шлак, залізобетонна конструкція, зола-винесення, міст, мікрокремнезем, морозостійкість, мінеральна добавка, наномодифіковані матеріали, транспортна споруда, тріщина.

### Вступ

Довговічність транспортних споруд значною мірою визначається здатністю бетонних і залізобетонних конструкцій зберігати експлуатаційні властивості в умовах агресивного кліматичного впливу. У регіонах із сезонними переходами температур через нульову позначку одним із головних факторів деградації матеріалу є циклічне заморожування та відтавання. Повторне насичення бетону вологою з подальшим її замерзанням супроводжується об'ємним розширенням води, що спричиняє розвиток внутрішніх напружень у цементному камені, утворення мікрodefektів, руйнування поверхневого шару та поступову втрату несучої здатності конструкцій. У результаті скорочується міжремонтний період експлуатації споруд і зростають витрати на підтримання транспортної інфраструктури в працездатному стані.

Світова інженерна практика свідчить, що традиційне підвищення міцності бетону не забезпечує необхідної стійкості до морозного впливу. Сучасні підходи орієнтовані на проектування довговічності матеріалу шляхом керування його мікроструктурою, водопроникністю та поровою системою. У цьому контексті особливий інтерес становить досвід Сполучених Штатів Америки, де значна частина мостів, естакад і дорожніх покриттів експлуатується в умовах інтенсивних навантажень заморожування-відтавання, що в окремих регіонах перевищують сотню циклів на рік. Американські нормативні та технологічні підходи передбачають комплексне використання повітровтягувальних агентів, активних мінеральних компонентів і сучасних модифікаторів структури цементного каменю, спрямованих на зменшення водопроникності та підвищення стійкості бетону до внутрішніх напружень.

Попри значну кількість досліджень, присвячених морозостійкості бетону, питання системної адаптації зарубіжного досвіду до умов України залишається недостатньо опрацьованим. Існуючі підходи переважно зосереджені на досягненні нормативного показника морозостійкості, тоді як сучасна міжнародна практика базується на комплексному управлінні довговічністю конструкцій протягом усього життєвого циклу.

У зв'язку з цим метою даної роботи є аналіз американського досвіду застосування морозостійких добавок у залізобетонних конструкціях транспортних споруд, оцінювання ефективності різних типів модифікаторів бетону та визначення можливостей їх адаптації до кліматичних, технологічних і ресурсних умов України.

Наукова новизна дослідження полягає у систематизації сучасних підходів до забезпечення морозостійкості бетону з позицій проектування довговічності транспортної інфраструктури, а практичне значення у формуванні передумов впровадження технологій, спрямованих на підвищення експлуатаційної надійності українських транспортних споруд.

### Основна частина

Теоретичні засади забезпечення морозостійкості бетону. Морозостійкість бетону характеризує його здатність зберігати фізико-механічні властивості під дією багаторазових циклів заморожування та відтавання в умовах водонасичення. Руйнування матеріалу внаслідок морозного впливу пов'язане з фазовими перетвореннями води в поровому просторі цементного каменю. Під час замерзання об'єм води збільшується приблизно на 9 %, що спричиняє розвиток локальних гідростатичних і кристалізаційних напружень.

За відсутності достатнього компенсаційного об'єму ці напруження перевищують міцність цементної матриці, що призводить до утворення мікротріщин, луцення поверхні та прогресуючої деградації конструкції (рис. 1).



Рисунок 1 — Механізм морозного руйнування бетону

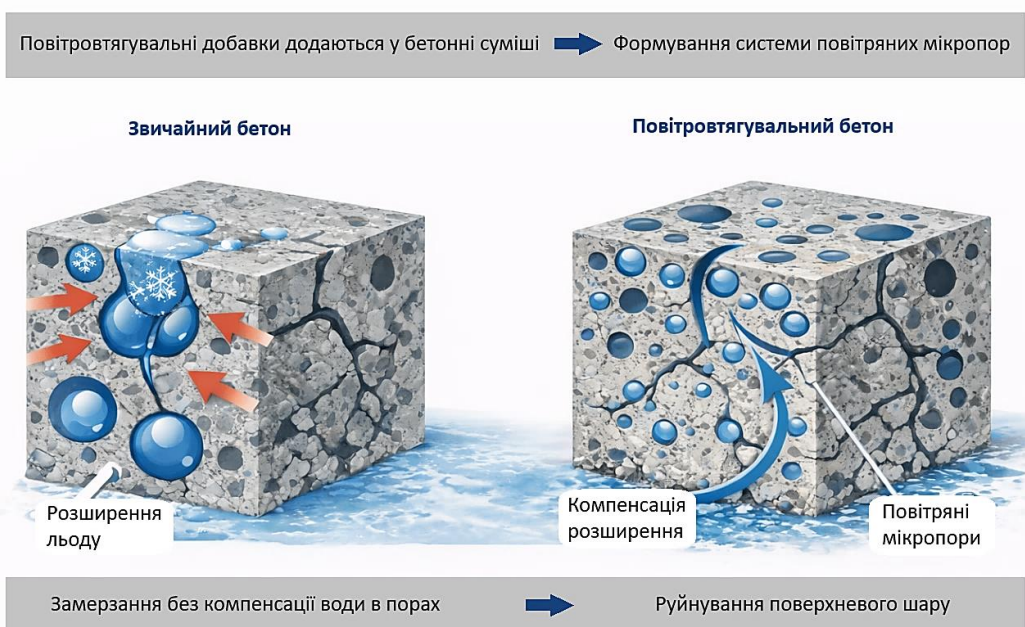
Визначальним фактором морозостійкості є структура порового простору бетону, зокрема співвідношення капілярних і замкнених повітряних пор. Зниження водопроникності матеріалу та оптимізація розподілу вологи розглядаються як основні механізми підвищення довговічності бетону в холодному кліматі.

Ключову роль у формуванні стійкої структури відіграють повітровтягувальні добавки. Вони забезпечують утворення системи рівномірно розподілених замкнених мікропор, які виконують функцію резервного простору для розширення води під час замерзання. Ефективність такого механізму визначається не лише наявністю повітря, а й параметрами порової системи – їх розміром, відстанню між порами та стабільністю структури після укладання бетонної суміші. Надлишковий вміст повітря може призводити до зниження міцності, тоді як недостатній — не забезпечує необхідної компенсації внутрішніх напружень. Схематичний вплив повітровтягування на структуру бетону наведено на **рис. 2**.

Іншим напрямом підвищення морозостійкості є застосування активних мінеральних добавок, таких як зола-винесення, доменний гранулований шлак і мікрокремнезем. Ці матеріали беруть участь у пуцоланових реакціях, ущільнюючи цементний камінь і зменшуючи частку відкритих капілярних пор. Зменшення водопроникності обмежує доступ вологи до внутрішніх шарів бетону, що істотно знижує інтенсивність морозного руйнування. Поєднання повітровтягування з мінеральними компонентами формує синергетичний ефект, який забезпечує суттєве підвищення морозостійкості порівняно з використанням окремих добавок.

Сучасні дослідження спрямовані на застосування наномодифікованих матеріалів, здатних змінювати структуру цементного каменю на субмікронному рівні. Введення нанокремнезему або наноглин сприяє формуванню більш щільної матриці, зменшенню кількості дефектних зон і підвищенню опору проникненню води. Такий підхід розглядається як перспективний напрям забезпечення довговічності бетонів, які працюють у складних кліматичних та експлуатаційних умовах.

Отже, теоретична концепція морозостійкості сучасного бетону базується на керуванні його мікроструктурою, водопроникністю та здатністю компенсувати внутрішні напруження, які виникають під час циклічних температурних впливів.



**Рисунок 2** — Вплив повітровтягувальних добавок на бетон

Практичний досвід застосування морозостійких добавок у США. Тривалий досвід експлуатації транспортної інфраструктури Сполучених Штатів сформував комплексний підхід до забезпечення довговічності бетонних конструкцій у холодному кліматі. Значна частина мостів і транспортних споруд функціонує в умовах інтенсивних циклів заморожування-відтавання, що обумовило розвиток технологій керування мікроструктурою бетону.

У штаті Міннесота, де клімат характеризується тривалими зимовими періодами та активним застосуванням протижеледних реагентів, морозостійкість бетону стала одним із ключових критеріїв проєктування мостів. Під час реконструкції мосту I-35W у Міннеаполісі було застосовано бетон із контрольованим повітровмістом і зниженим водоцементним співвідношенням, що забезпечило високу стійкість захисного шару до лущення. Аналогічні підходи використали при модернізації мостових переходів через річку Міссісіпі, де довготривалі спостереження показали зменшення інтенсивності поверхневих пошкоджень у порівнянні з традиційними бетонними сумішами.

Додатковим прикладом є дорожні естакади автомагістралі Interstate 94, на яких застосування повітровтягувальних агентів у поєднанні зі шлакопортландцементами дозволило значно підвищити опір бетону до циклічного насичення вологою та температурних коливань.

У штаті Мічиган, розташованому в зоні впливу Великих озер, основним фактором руйнування бетону є поєднання високої вологості та багаторазових переходів температури через нуль. Під час реконструкції мостів регіону Great Lakes Basin активно застосовувалися суміші з мікрокремнеземом і золю-вінесення. Результати експлуатаційного моніторингу показали істотне зменшення проникнення хлоридів і підвищення стійкості захисного шару арматури.

На окремих ділянках автомагістралі US-23 використання комплексних добавок дозволило мінімізувати розвиток тріщин усадки та знизити втрати маси поверхні бетону після багаторічної експлуатації в умовах впливу солей.

Особливі умови експлуатації характерні для штату Аляска, де транспортні споруди працюють за низьких температур, високої вологості та значних сезонних деформацій ґрунтів. Показовим прикладом є тунель Антон Андерсон, у якому застосовано бетон із комбінованими добавками, які забезпечують одночасно морозостійкість і знижену водопроникність. Додаткові дослідження показали стабільність властивостей бетону навіть у зонах періодичного замерзання талих вод.

Подібні технології застосовувалися і на мостових переходах поблизу Анкориджа, де використання мінеральних добавок дозволило зменшити ризик поверхневого руйнування конструкцій, спричиненого чергуванням відлиг і різких похолодань.

Сучасні дослідницькі програми в зазначених штатах також спрямовані на впровадження наномодифікованих бетонів, які демонструють підвищену стійкість до проникнення вологи та агресивної дії протижелезних реагентів. Поєднання традиційних повітровтягувальних технологій із наномодифікацією цементного каменю формує новий етап розвитку морозостійких бетонів для транспортної інфраструктури.

Таким чином, досвід Міннесоти, Мічигану та Аляски підтверджує, що ефективність морозостійких технологій визначається комплексним підходом, який включає оптимізацію складу бетону, контроль порової структури та врахування реальних умов експлуатації споруд.

Таблиця 1

*Ефективність морозостійких добавок у США*

Тип добавки	Основний механізм дії	Підвищення морозостійкості (цикли заморожування-відтавання)	Зниження водопроникності, %	Типові об'єкти застосування	Приклади застосування
Повітровтягувальні агенти	Формування замкнених мікропор, компенсація розширення льоду	300–400	15–20	Мости, естакади, дорожні покриття	Міннесота
Зола-винесення	Пуцоланова реакція, ущільнення цементного каменю	250–350	25–30	Автомагістралі, мостові плити	Мічиган
Доменний гранульований шлак	Зменшення капілярної пористості, підвищення щільності	300–400	30–40	Масивні мостові конструкції	Міннесота, Мічиган
Мікрокремнезем	Ущільнення мікроструктури, зниження водопроникності	350–450	40–45	Зони дії реагентів, мостові настили	Мічиган
Комплексні добавки	Синергетичний ефект: контроль порової структури та водопроникності	400–500	50–55	Тунелі, стратегічні транспортні об'єкти	Аляска
Наномодифіковані добавки	Модифікація структури цементного каменю на нанорівні	>500	55–65	Високо-навантажені інфраструктурні споруди	Аляска

Переваги та обмеження застосування морозостійких добавок. Практичні результати свідчать, що використання морозостійких добавок істотно підвищує довговічність залізобетонних конструкцій і зменшує потребу у частих ремонтних роботах. Оптимізація порової структури дозволяє бетону витримувати значну кількість температурних циклів без суттєвого зниження міцності, що забезпечує економічний ефект завдяки зменшенню експлуатаційних витрат.

Додатковою перевагою є екологічний аспект застосування мінеральних добавок. Використання золи-винесення та металургійних шлаків сприяє утилізації промислових відходів і зменшенню вуглецевого сліду будівельної галузі.

## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

Разом із тим ефективність технологій значною мірою залежить від дотримання технологічної дисципліни. Неправильне дозування добавок, порушення режимів ущільнення або транспортування бетонної суміші можуть призвести до втрати сформованої порової структури та зниження морозостійкості. Суттєвим стримувальним фактором залишається також висока вартість наномодифікованих матеріалів.

Важливим викликом є необхідність адаптації технологій до конкретних кліматичних умов, оскільки результати, отримані в північних штатах США, не завжди можуть бути безпосередньо перенесені в інші регіони без коригування складу бетонної суміші та методів контролю.

Перспективи адаптації американського досвіду в Україні. Кліматичні умови України характеризуються значною кількістю переходів температури через нуль, що обумовлює актуальність підвищення морозостійкості бетонних конструкцій транспортної інфраструктури. У цьому контексті адаптація американського досвіду є перспективним напрямом модернізації галузі. Концептуальну модель адаптації технологій показано на **рис. 3**.



**Рисунок 3** — Адаптація досвіду США в Україні

Одним із ключових резервів є використання доступних вітчизняних мінеральних ресурсів — золи-винесення теплових електростанцій і доменних шлаків металургійних підприємств. Їх застосування дозволяє підвищити щільність цементного каменю та одночасно вирішити екологічні проблеми утилізації промислових відходів.

Необхідною умовою впровадження сучасних технологій є покращення нормативної бази, орієнтованої на показник морозостійкості, контроль водопроникності бетону, параметрів повітряної структури та довговічності конструкцій упродовж життєвого циклу.

Перспективним напрямом також є впровадження наномодифікованих матеріалів у стратегічних об'єктах транспортної інфраструктури — мостах, тунелях та аеродромних покриттях. Водночас ефективна адаптація технологій потребує підготовки інженерних кадрів і поширення сучасних методів контролю якості бетонних сумішей.

Таким чином, інтеграція американських технологічних підходів із використанням місцевих матеріальних ресурсів створює передумови для суттєвого підвищення довговічності та надійності транспортних споруд України.

### Висновки

Дослідження практики застосування морозостійких модифікаторів бетону у транспортному будівництві США свідчить про їхню ключову роль у забезпеченні довготривалої експлуатаційної надійності інфраструктурних об'єктів у регіонах із інтенсивними циклами заморожування та відтавання. Комплексне використання повітровтягувальних агентів, активних мінеральних компонентів і наномодифікаторів дозволяє цілеспрямовано керувати мікроструктурою цементного каменю, зменшувати водопроникність і знижувати рівень внутрішніх напружень, які виникають під час фазових переходів води. Реалізовані проекти мостів і тунелів у штатах Міннесота, Мічиган та Аляска демонструють стабільність експлуатаційних характеристик конструкцій протягом тривалих періодів без суттєвого розвитку деградаційних процесів.

Окрім технічних переваг, застосування морозостійких добавок формує відчутний економічний ефект. Подовження міжремонтних інтервалів і зниження потреби у відновлювальних роботах сприяють оптимізації витрат на експлуатацію транспортних мереж. Особливого значення це набуває для держав із розгалуженою дорожньо-мостовою інфраструктурою, де фінансування ремонтних програм є обмеженим. Додатковим позитивним аспектом виступає залучення промислових побічних продуктів — золи-винесення та металургійних шлаків, які одночасно підвищують експлуатаційні властивості бетону та відповідають принципам ресурсоефективності й циркулярної економіки.

Разом із перевагами впровадження таких технологій пов'язане з низкою інженерних та організаційних викликів. Вартість високотехнологічних модифікаторів, підвищені вимоги до технологічної дисципліни виробництва бетонних сумішей і необхідність адаптації складів до локальних кліматичних та експлуатаційних умов потребують системного підходу. Американська практика підтверджує, що максимальна ефективність морозостійких технологій досягається лише за поєднання нормативного регулювання, лабораторного контролю та належної підготовки інженерно-технічного персоналу.

Для України інтеграція зазначених підходів створює значний потенціал підвищення довговічності транспортних споруд. Використання доступної сировинної бази, гармонізація національних стандартів із міжнародними вимогами та впровадження сучасних матеріалознавчих рішень здатні забезпечити перехід до більш ефективної моделі експлуатації інфраструктури. У перспективі це сприятиме модернізації будівельної галузі, підвищенню надійності стратегічних об'єктів та формуванню інноваційно орієнтованої системи інженерного забезпечення транспортного комплексу України.

### Список літератури

1. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2011. 65 с.
2. ДСТУ CEN/TS 12390-9:2019 Випробування затверділого бетону. Частина 9. Стійкість до замерзання-відтавання за допомогою антиобліднювальних солей (CEN/TS 12390-9:2016, IDT).
3. Abbas M. M., Muntean R. The Effectiveness of Different Additives on Concrete's Freeze – Thaw Durability: A Review. *Materials*, 2025, 18(5), 978. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18050978>.
4. Liu D., Tu Y., Shi P., Sas G., Elfgren L. Mechanical and durability properties of concrete subjected to early-age freeze–thaw cycles. *Materials and Structures*, 2021, Vol. 54, Article 211. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11527-021-01711-9>.
5. Obla K.H., Kim H., Lobo C.L. Criteria for Freeze–Thaw Resistant Concrete Mixtures. *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 5, No. 2, 2016, P. 119–141. DOI: <https://doi.org/10.1520/ACEM20150005>.
6. American Concrete Institute (ACI). Guide to Durable Concrete. ACI Committee 201, Publication PRC-201.2-23, 2023. ISBN: 978-1-64195-218-7.
7. U.S. Federal Highway Administration (FHWA). Freeze–Thaw Resistance of Concrete With Marginal Air Content. FHWA-HRT-06-117, Washington, D.C., 2006.

8. Zhang Q., Li C., Li G., Chen D., Wu X., Wang Y., Mao Y., Zhang K. The Effect of Modification with Nano-Alumina, Nano-Silica, and Polypropylene Fiber on the Frost Resistance of Concrete. *Buildings*, 2025, Vol. 15(21), Article 4002. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15214002>.
9. Mahmood R.A., Kockal N.U. Nanoparticles used as an ingredient in different types of concrete: A review. *SN Applied Sciences*, 2021, Vol. 3, Article 529. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04529-3>.
10. Wang L., Huang Y., Zhao F., Huo T., Chen E., Tang S. Comparison between the Influence of Finely Ground Phosphorous Slag and Fly Ash on Frost Resistance, Pore Structures and Fractal Features of Hydraulic Concrete. *Fractal and Fractional*, 2022, Vol. 6(10), Article 598. DOI: <https://doi.org/10.3390/fractalfract6100598>.
11. Rodrigue A., Duchesne J., Fournier B., Bissonnette B. Frost Resistance of Alkali-Activated Combined Slag and Fly Ash Concrete Cured at Ambient Temperature. *ACI Materials Journal*, 2022, Vol. 119(3), P. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.14359/51734600>.
12. Ma Q., Duan Z., Wang J., Yin G., Li X. Frost resistance and improvement techniques of recycled concrete: a comprehensive review. *Frontiers in Materials*, 2024, Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1493191>.

### References

1. DBN V.2.6-98:2009 *Betoni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia (DBN V.2.6-98:2009 Concrete and reinforced concrete structures. Basic principles)*/ Kyiv, 2011. 65 p. (informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
2. DSTU CEN/TS 12390-9:2019 *Vyprobuvannia zatverdilohto betonu. Chastyna 9. Stiikist do zamerzannia-vidtavannia za dopomohoiu antyoblidniuvalnykh solei (DSTU CEN/TS 12390-9:2019 Testing hardened concrete. Part 9. Freezing-proofing concrete with the help of anti-scaling salts) (CEN/TS 12390-9:2016, IDT) (Informatsiia ta dokumentatsiia)* [in Ukrainian].
3. Abbas M.M., Muntean R. The Effectiveness of Different Additives on Concrete's Freeze–Thaw Durability: A Review. *Materials*, 2025, 18(5), 978. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18050978> [in English].
4. Liu D., Tu Y., Shi P., Sas G., Elfgren L. Mechanical and durability properties of concrete subjected to early-age freeze–thaw cycles. *Materials and Structures*, 2021, Vol. 54, Article 211 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11527-021-01711-9> [in English].
5. Obla K.H., Kim H., Lobo C.L. Criteria for Freeze–Thaw Resistant Concrete Mixtures. *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 5, No. 2, 2016, P. 119–141. DOI: <https://doi.org/10.1520/ACEM20150005> [in English].
6. American Concrete Institute (ACI). *Guide to Durable Concrete*. ACI Committee 201, Publication PRC-201.2-23, 2023. ISBN: 978-1-64195-218-7 [in English].
7. U.S. Federal Highway Administration (FHWA). *Freeze–Thaw Resistance of Concrete With Marginal Air Content*. FHWA-HRT-06-117, Washington, D.C., 2006 [in English].
8. Zhang Q., Li C., Li G., Chen D., Wu X., Wang Y., Mao Y., Zhang K. The Effect of Modification with Nano-Alumina, Nano-Silica, and Polypropylene Fiber on the Frost Resistance of Concrete. *Buildings*, 2025, Vol. 15(21), Article 4002. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15214002> [in English].
9. Mahmood R.A., Kockal N.U. Nanoparticles used as an ingredient in different types of concrete: A review. *SN Applied Sciences*, 2021, Vol. 3, Article 529. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04529-3> [in English].
10. Wang L., Huang Y., Zhao F., Huo T., Chen E., Tang S. Comparison between the Influence of Finely Ground Phosphorous Slag and Fly Ash on Frost Resistance, Pore Structures and Fractal Features of Hydraulic Concrete. *Fractal and Fractional*, 2022, Vol. 6(10), Article 598. DOI: <https://doi.org/10.3390/fractalfract6100598> [in English].
11. Rodrigue A., Duchesne J., Fournier B., Bissonnette B. Frost Resistance of Alkali-Activated Combined Slag and Fly Ash Concrete Cured at Ambient Temperature. *ACI Materials Journal*, 2022, Vol. 119(3), P. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.14359/51734600> [in English].

12. Ma Q., Duan Z., Wang J., Yin G., Li X. Frost resistance and improvement techniques of recycled concrete: a comprehensive review. *Frontiers in Materials*, 2024, Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1493191> [in English].

---

**Maksym Borysevych**, <https://orcid.org/0000-0003-1391-4437>

**Yuriy Voloshko**, <https://orcid.org/0000-0001-6703-2718>

**Maksym Borysenko**, <https://orcid.org/0000-0001-9772-3536>

*State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine*

### ANALYSIS OF AMERICAN EXPERIENCE IN THE USE OF FROST-RESISTANT ADMIXTURES IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF TRANSPORT FACILITIES

#### **Abstract**

**Introduction.** The article examines the U.S. experience regarding the use of frost-resistant admixtures in reinforced concrete structures of transport facilities. Technologies for increasing concrete durability under cyclic freezing and thawing conditions are analyzed, with examples of applications in bridges in the states of Minnesota, Michigan, and Alaska. The results of studies on the effectiveness of various types of admixtures and their impact on the performance characteristics of structures are presented. Opportunities for adapting the American experience in Ukraine are identified.

**Problem Statement.** The main problem with reinforced concrete structures of transport facilities in cold regions is their insufficient resistance to freeze-thaw cycles. Water penetrating the concrete pores expands during freezing and creates internal stresses, leading to cracking, surface scaling, and gradual loss of strength. In the U.S., this issue is particularly relevant for bridges and road pavements in northern states, where the number of freeze-thaw cycles can exceed one hundred per year. The solution to this problem lies in the use of frost-resistant admixtures that reduce concrete permeability and increase its durability.

**Materials and Methods.** To increase the frost resistance of concrete, American engineers use various types of admixtures: air-entraining agents that form micropores; mineral admixtures (fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume) that densify the structure of the cement paste; and modern nano-modified materials. Research methods include laboratory testing for freeze-thaw cycles, measuring concrete permeability, microstructure analysis, and long-term operational observations of actual transport structures.

**Results.** Studies have shown that the use of air-entraining admixtures ensures concrete frost resistance at a level of 300 – 400 freeze-thaw cycles. The use of silica fume allows for a reduction in concrete permeability by 40 – 45 %, significantly decreasing the risk of cracking. Composite admixtures (a combination of air-entraining agents with slag materials) demonstrate the highest efficiency — up to 500 cycles without loss of strength. Practical examples of bridges in Minnesota, Michigan, and Alaska confirm that such technologies extend the service life of structures by decades.

**Conclusions.** The American experience proves that the use of frost-resistant admixtures is a key factor in ensuring the durability of transport structures in cold climates. The use of various types of admixtures allows for the adaptation of concrete mixes to specific operating conditions, reduces repair costs, and increases infrastructure reliability. For Ukraine, the implementation of similar technologies is relevant, taking into account local resources (fly ash, slag) and the improvement of the regulatory framework for controlling concrete frost resistance.

**Keywords:** internal stresses, concrete permeability, blast-furnace slag, reinforced concrete structure, fly ash, bridge, silica fume, frost resistance, mineral admixture, nano-modified materials, transport facility, crack.