

БЕТОНИ З ПІДВИЩЕНИМИ АДГЕЗІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ РЕМОНТУ ШТУЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

У статті викладені основи розробки та практичні дослідження властивостей бетонів на активованій в'язучій речовині для ремонту і захисту бетонів транспортних споруд у підводній зоні з метою подовження терміну їх служби. Встановлено вплив параметрів високоінтенсивної гідравлічної активації цементної системи на технічні показники бетонної суміші, фізичні та механічні властивості бетону і контактної зони.

В статье представлены основы разработки и практические исследования свойств бетонов на активированном вяжущем веществе для ремонта и защиты бетонов транспортных сооружений в подводной зоне с целью продления срока их службы. Установлено влияние параметров высокоинтенсивной гидравлической активации цементной системы на технические показатели бетонной смеси, физические и механические свойства бетона и контактной зоны.

The article presents the fundamentals of development and practical studies of the properties of concretes, based on an activated astringent, for the repair and protection of the concretes of transport structures in the underwater zone, with a view of prolonging their service term. Established is the influence of cement system highly-intensive hydraulic activation parameters on technical performances of the concrete mixture, the physical and mechanical properties of concrete and the contact area.

Довговічність бетону транспортних споруд та відновлених елементів залежить від ряду факторів, характер яких обумовлений, з одного боку, технічною якістю проектних рішень та організацією проведення будівельних та ремонтних робіт, з іншого боку, умовами експлуатації, за яких виникає передчасне руйнування масиву бетону споруди та відновлених елементів, а також зниження їх несучої здатності. Ці руйнації пов'язані з агресивним впливом навколишнього середовища та надмірних динамічних навантажень. Тому найбільшим руйнівним впливам піддаються елементи споруд, які експлуатуються у складних гідрогеологічних умовах, під водою. Пошкодження у цій зоні пов'язані з порушенням цілості бетону і відновлених елементів при агресивному впливі води складного хімічного складу, яка діє у визначеному динамічному режимі, і є найбільш небезпечними і важко усуваються.

У зв'язку з цим значна частина транспортних споруд, що експлуатуються, потребує капітального ремонту і захисту з метою продовження терміну їх служби. Тому усунення руйнацій, які прогресують на стадії виявлення, потребує прийняття радикальних заходів з вибору сумісних до старого бетону матеріалів для ремонту і засобів відновлення монолітності споруд.

Комплексна оцінка технічного стану транспортних споруд дозволила виділити характерні види і причини порушення цілісності транспортних споруд і їх елементів та призначити ефективні

матеріали і засоби для видалення дефектів. При цьому основним критерієм якості ремонтних робіт є міцне і довговічне зчеплення ремонтного матеріалу з бетонною основою та їх сумісність.

Із проблемою зчеплення нового бетону зі старим будівельники зіткнулися в перші роки зведення бетонних і залізобетонних споруд. Серйозного наукового дослідження це питання набуло з 20-х років нашого сторіччя у працях вітчизняних та закордонних вчених А. П. Васильєва, Ц. Г. Гінзбурга, С. О. Дмитрієва, Л. А. Ігоніна, Є. В. Лавріновича, А. Лосьє, В. М. Мікульського, І. А. Савримовича, М. Б. Урьєва [1], М. С. Хуторянського, Р. Фере, Р. Г. Девіса, Н. Леві, К. Хагера, Е. Ненінга та ін. Значний вклад у розвиток напрямку технології ремонтних робіт з питань підвищення якості ремонту (зчеплення і сумісності ремонтного матеріалу зі старою поверхнею) внесли наукові дослідні праці сучасних фахівців В.О. Вознесенського, Є. Г. Годеса, В. І. Дмитревського, П. В. Кривенка, С. М. Курочкіна, О. М. Пшінько [2], Н. М. Руденко [2], Р. В. Рунової, В. Л. Чернявського, Д. Р. Моргана, Е. Н., Емберсона, Г. К. Мейса, В. Вілкінсона, М. Пегіона, М. Марозеки та ін.

Аналіз фізико-хімічної природи і умов формування якісного контактного шару обумовили спеціальні вимоги до ремонтного матеріалу і технології проведення ремонтних робіт, які забезпечують цілісність бетону споруди і сумісну роботу матеріалів при складних умовах експлу-

атації. Доведено, що цементні бетони традиційної технології приготування для ремонту бетону у підводній зоні малоефективні і недовговічні через комплекс експлуатаційних впливів. Для вирішення поставленої задачі треба використовувати комплексний підхід, з урахуванням властивостей бетону основи – старого бетону, для оптимізації фізико-механічних і адгезійних характеристик нового бетону для їх довговічної сумісної роботи.

Аналіз літературних джерел і попередні експерименти показали, що для вирішення проблеми найбільш ефективним для якісного ремонту є використання попередньої високоінтенсивної гідравлічної активації цементної системи бетонів, яка забезпечує поліпшення технологічних властивостей бетонних сумішей і підвищені фізико-механічні та експлуатаційні показники. Фізико-хімічна єдність матеріалів та висока прониклива спроможність активованого цементного тіста у пори, тріщини і пустоти старого бетону забезпечує якісне та довговічне зчеплення при відносній дешевизні і недефіцитності вихідних матеріалів.

Авторами проведено вибір вихідних матеріалів. Визначено основні фізико-механічні та технологічні характеристики ремонтного матеріалу на активованому в'язучому і без активації. Спеціально розроблена методика визначення величини зчеплення нового бетону зі старим на відрив.

Доведено, що якість зчеплення визначається сумісністю роботи основного шару з ремонтним. Цьому питанню було приділено особливу увагу. Для прогнозування та оптимізації цієї важливої характеристики було обрано метод скінченноелементного аналізу, який реалізується за допомогою сучасного програмного забезпечення «ANSYS 5.6-5.7».

На підставі виконаних досліджень розроблені геометрична і скінченноелементна моделі тришарового елемента і доведена адекватність оцінки контактної міцності на відрив технологічним умовам. Структура контактної зони складається з трьох складових: 1 – старий бетон; 2 – ремонтний бетон; 3 – контактний (проміжний) шар (товщиною 20...70 мкм).

Шляхом заміни контактної зони пружними вставками і поступового їх видалення вдалося змоделювати процес тріщиноутворення та руйнування контактної зони. При порівнянні дослідних даних з розрахунковими розглядалися поле осьової напруги, поле максимальної головної напруги, поле інтенсивності та поле продольних деформацій. Достовірність отриманих даних та їх відхилення від дослідних

знаходяться в межах 8 %. Це свідчить про достатню адекватність отриманих моделей. У результаті досліджень одержана серія комп'ютерних рисунків, на основі аналізу яких встановлено, що прикладення напруги має локалізований характер (принцип Сен-Венана). При збільшенні напруги від місця прикладення стрижня вона поступово передається до сусідніх ділянок контактної зони. Деформації у контактній зоні зростають пропорційно приросту напруги до визначеної межі, коли не спостерігається зростання деформацій. У залежності від складу ремонтного бетону максимальна напруга в контактній зоні складає 4,5...6,5 МПа; ці значення напруги зафіксовано як руйнівні за реальних умов випробувань. У цьому випадку виникає гирло тріщини, яке спостерігається при видаленні половини пружних зв'язків по контуру від місця прикладення напруги у площині контакту ($r=1,75...2$ см); за реальних умов випробувань у цей момент відбувається миттєва руйнація контакту.

Контроль якості зчеплення здійснюється відносно місця відриву, з найслабкішою ланкою у ланцюгу, тобто у випадку впливу на відновлену конструкцію надмірної напруги та агресивного середовища руйнування відбудеться у бетоні основи чи у ремонтному шарі, а може і у зоні контакту цих двох шарів, в залежності від того, в якій площині знаходиться елемент з найменшою здатністю витримувати прикладені напруги. У лабораторних умовах розрізняють чотири типи характерних видів руйнацій при випробуванні на відрив: 1 – когезійне по ремонтному матеріалу; 2 – когезійне по старому бетону; 3 – чисто адгезійне; 4 – змішане. Перші два характеризують якість матеріалів та технологію ремонтних робіт, типи 3–4 – адгезійні здібності ремонтного бетону. При оптимізації зчеплення з використанням у якості ремонтних матеріалів бетонів на активованій в'язучій речовині спостерігається руйнування частково в межах трьох зон (складових) – змішане: такий тип руйнування вважається оптимальним для досягнення довговічності контакту та адгезійної міцності, тобто міцність при вигині та на відрив контактної зони наближається до міцності старого бетону.

Для якісного ремонту використовувався комплексний підхід. Ремонтна система з трьох складових розглядалася як цілісна модель, яка є сукупністю властивостей складових з урахуванням факторів, здатних вплинути на якість ремонту на стадії проектування та проведення ремонтних робіт. Тому проведено всебічний аналіз фізико-хімічної природи контактної

шару старого бетону споруд для розробки сумісних за фізико-механічними показниками бетонів з підвищеними адгезійними властивостями. Досліджено фізико-хімічні основи корозійних процесів у масиві старого бетону і контактному шарі підводної і надводної зон транспортних штучних споруд. Встановлено, що основним процесом руйнування бетону і порушення монолітності контактної зони є вплив водного середовища під напором з виносом структурного компоненту бетону – вапна. Цьому ж процесу сприяє участь продуктів метаболізму біологічних шарів у корозійному процесі старого бетону під водою. Це свідчить про необхідність підвищення непроникності ремонтного шару і контактної зони. Вважається, що частина вільного вапна (10...15 %) у цементі підлягає зв'язуванню кремнеземистим наповнювачем (10...15 % у мас. ч.) у важкорозчинні компоненти – низькоосновні гідросилікати кальцію.

Досліджено хімічний склад продуктів руйнації поверхневого шару старого бетону, який під водою характеризується підвищеним вмістом карбонатів, бактерій, органічних і мінеральних кислот та продуктів їх метаболізму, в надводній зоні приваляючим є процес карбонізації поверхні. Крім того, інтенсивність процесу руйнації та достатня проникність цементного тіста у пори і порожнини старого бетону залежить від його пористості. Дослідження показали, що поровий простір лабораторних зразків становить 20 мкм, водопоглинання – 7,5 %. Тому запропоновано проводити оптимізацію дисперсності цементного в'язучого за критерієм заповнюваності пор, який є одним з умов міцного та довговічного зчеплення

$$D_{\text{п}} \geq 2d_{\text{ц}},$$

або

$$\frac{d_{\text{п}}}{D_{\text{п}}} \leq 0,5, \quad (1)$$

де $D_{\text{п}}$ – середній діаметр пор на поверхні старого бетону, мкм; $d_{\text{ц}}$ – розмір цементних часток ремонтного бетону, мкм.

Крім структурних характеристик старого бетону, на зчеплення нового бетону зі старою кладкою впливає вік та якість поверхні старого бетону. Вплив віку старого бетону на формування контактної міцності значний до одержання бетоном 70...100 % проектної міцності, надалі вплив цього фактора незначний.

Необхідною умовою надійного зчеплення є повнота контакту нового бетону з поверхнею старого бетону. Тому на міцність зчеплення впливають фактори поверхні старого бетону: пори, порожнини, виступи, впадини, нерівності, які залежать від інтенсивності взаємодії старого бетону з навколишнім середовищем та різних видів підготовки поверхні до ремонту. Чим більше шорсткість поверхні, тим більше її активних центрів вступає у контакт з цементним тістом ремонтного бетону і зростає адгезія. Контроль стану поверхні здійснюється шляхом визначення середньої висоти Δ елементів нерівностей бетонної поверхні. Оцінка якості поверхні відбувається за еталонами шорсткості.

Проведено аналіз різних засобів підвищення адгезійної здібності цементного тіста нового бетону. Встановлені підвищення технологічних властивостей бетонної суміші та інтенсифікація процесів гідратації та структуроутворення при гідравлічному способі активації в'язучої речовини. Розроблено і досліджено фізико-механічні й експлуатаційні властивості бетонів на активованій в'язучій речовині і контактному шару. Встановлено істотне підвищення зчеплення і когезійної міцності при гідравлічній активації цементної системи (рис. 1, 2). Вказаний ефект доповнюється введенням у процесі активації в суміш органо-мінерального комплексу (ОМК), варіюванням вмісту активованого компоненту у бетонній суміші і параметрів активації. Сутність високоінтенсивної гідравлічної активації полягає у диспергації цементних часток від 20...50 до 4...10 мкм, розщепленні довголанцюгових комплексів пластифікатора і зміні морфології складу цементної системи за 5...7 хв при зіткненні взаємозатоплюваних гідравлічних потоків у спеціальному реакторі-активаторі з інтенсивністю акивації 40...50 м/с, яка в 6...7 раз більша первинної.

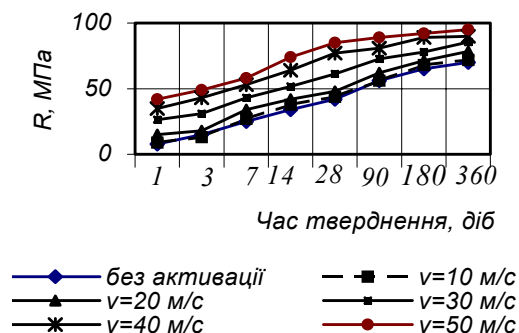


Рис. 1. Кінетика росту когезійної міцності цементного каменю різного ступеня активації

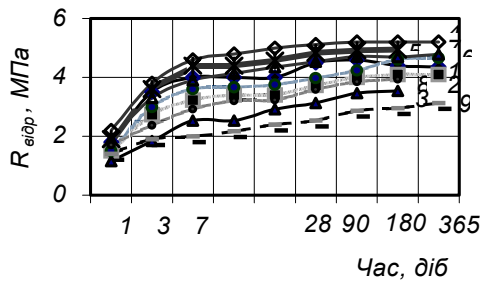


Рис. 2. Кінетика росту міцності зчеплення у часі в залежності від В/Ц цементного тіста та дисперсності цементу (m^2/g):
 1 – $S=700$, В/Ц=0,3; 2 – $S=500$, В/Ц=0,3; 3 – $S=300$, В/Ц=0,3;
 4 – $S=700$, В/Ц=0,4; 5 – $S=500$, В/Ц=0,4; 6 – $S=300$, В/Ц=0,4;
 7 – $S=700$, В/Ц=0,5; 8 – $S=500$, В/Ц=0,5; 9 – $S=300$, В/Ц=0,5

Встановлено, що проникність цементного тіста в пори старого бетону зростає при дисперсності твердої фази $S_{уд} = 500 \text{ см}^2/g$, яка характеризується переважно розміром часток 4...9 мкм при інтенсивності активації 40...50 м/с (табл. 1) і терміну активації 6...7 хв. При збільшенні часу активації кількість дисперсної фази зростає з одночасним збільшенням нормальної густини і активності цементу, потім частки цементу агрегатуються у більш крупні, що призводить до підвищення в'язкості цементної системи і зменшення зчеплення.

Таблиця 1

Зміна гранулометричного складу цементу в залежності від параметрів активації

Інтенсивність активації, м/с	Гранулометричний склад цементного в'язучого, d_c мкм, %				
	< 5	5...10	10...20	20...40	> 4
Без активації	5	10	20...25	30...35	25
20	10	15...20	20...30	20	15...20
30	15...20	25	25	20	10...15
40	20	40	30	5...10	5
50	20...25	25...35	30...35	15	10

Недостатня кількість цементного тіста в зоні контакту зменшує величину зчеплення через низьку клейку дію цементного тіста бетону жорсткої консистенції. Тому при переході від литої бетонної суміші ($OK = 20...21 \text{ см}$) до пластичної $OK = 10...14 \text{ см}$ (із відповідним ростом когезійної міцності ремонтного бетону) міцність зчеплення зменшується (рис. 3). Таким чином, існує оптимальне водоцементне відношення для досягнення

необхідної когезійної і адгезійної міцності, яке дорівнює 0,45...0,5 (рис. 4).

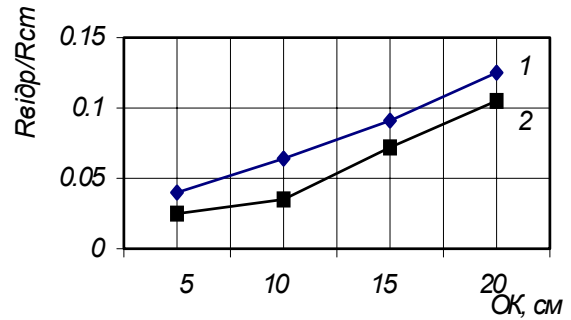


Рис. 3. Залежність відносної міцності зчеплення від консистенції ремонтного бетону і гігроскопічності поверхні старого бетону:
 1 – у воді; 2 – волога поверхня

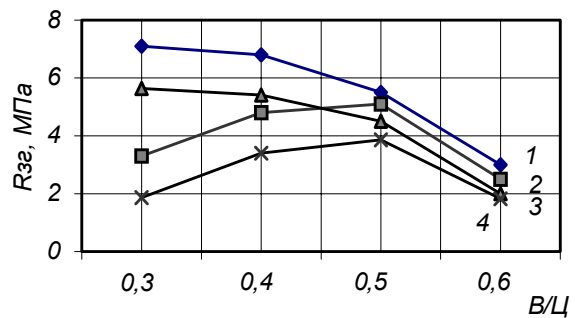


Рис. 4. Залежність когезійної та адгезійної міцності ремонтного бетону від В/Ц:
 1 – когезійна міцність бетону без активації; 2 – адгезійна міцність бетону без активації; 3 – когезійна міцність бетону після активації; 4 – адгезійна міцність бетону після активації

Позитивна дія сумісної гідромеханічної активації цементної системи з хімічною взаємодією ОК для якісного проведення ремонтних робіт під водою виражена також у зменшенні в'язкості з підвищенням інтенсивності активації до 40...50 м/с, підвищенням пластичності, текучості 25...35 с і зв'язності цементної системи, яка характеризується водовідділенням у межах $\Delta B = 1,2...1,7\%$. Коефіцієнт зберігання рухливості для ремонтних бетонів на активованому в'язучому знаходиться в межах $K = 1,10...1,5$.

Виконано дослідження пористості ремонтного бетону і контактної зони оптимальних режимів активації.

Встановлено, що структура активованого цементного каменю відзначається низькою пористістю (на 6...8 % менша в порівнянні з бетоном традиційного виготовлення) і непроникністю завдяки зменшенню середнього радіуса пор при збільшенні об'єму продуктів гідратації.

Незалежно від тепловологісних умов експлуатації та стану поверхні міцність зчеплення бетону на активованому в'язучому у порівнянні зі звичайним бетоном перевищує у віці три доби – у 3,1...3,4 рази, а у віці 28 діб – у три рази (табл. 2).

Таблиця 2

Міцність зчеплення нового бетону з поверхнею, що ремонтується

Умови тверднення	Вік зразків, діб	Міцність на відрив, МПа			
		звичайного бетону з поверхнею		бетону на активованому в'язучому з поверхнею	
		природною	очищеною	природною	очищеною
20±2 °С	3	0,42	0,64	1,20	1,45
	7	0,64	0,75	1,89	2,31
	28	1,81	2,12	3,44	5,14
+25 °С	3	0,66	0,75	1,89	2,76
	7	0,84	0,97	2,65	3,45
	28	1,84	2,13	3,89	4,75
+5 °С	3	0,52	0,73	1,30	1,70
	7	0,64	0,93	2,04	2,87
	28	1,93	2,50	3,23	4,19
У воді	3	0,96	0,98	1,94	2,30
	7	1,45	1,58	2,84	4,23
	28	2,31	2,63	4,79	5,84

Встановлено, що введення ОМК у склад цементної системи дозволяє знизити величину деформацій до рівня значень основного бетону підводної зони, тому цементний камінь контактної зони і ремонтного шару буде однаково з основним бетоном реагувати на зміни умов експлуатації.

Виконані дослідження фізико-механічних властивостей старого і ремонтного бетону до-

зволили одержати критерій сумісної роботи матеріалів і прогнозувати властивості контактної зони при різних умовах експлуатації. Встановлено, що для довговічної сумісної роботи ремонтного і основного бетону коефіцієнт міцності ремонтного бетону повинна дорівнювати чи бути більше міцності основного бетону, модуль пружності контактної зони та ремонтного бетону повинен бути трохи меншим чи дорівнювати модулю пружності основного бетону $E_c^6 \geq E_k \geq E_n^6$.

Підвищення стійкості ремонтного шару на активованій в'язучій речовині у різних середовищах забезпечується за рахунок зниження вмісту вільного вапна у цементному камені та зв'язування його у низькоосновні гідросилікати кальцію. Коефіцієнт сульфатостійкості для бетону на активованому в'язучому знаходиться у межах 0,86...0,91.

Випробуваннями на водонепроникність ремонтного бетону встановлено, що бетон на активованій в'язучій речовині відповідає марці за водонепроникністю W8...12.

За результатами проведених досліджень можна відзначити, що ремонтному шару на активованій в'язучій речовині у специфічних умовах експлуатації гарантована висока довговічність. Встановлено, що розроблені бетони можна кваліфікувати як матеріал з підвищеними експлуатаційними та адгезійними властивостями для ремонту і захисту транспортних споруд у підводній зоні.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Урьев Н. Б., Михайлов Н. В. Коллоидный цементный клей и его применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1967. – 175 с.
2. Пшинько А. Н., Руденко Н. Н. Особенности ремонта искусственных транспортных сооружений // Залізничний транспорт України. – 2001. № 2. – С. 14–16.

Надійшла до редколегії 22.11.03.