

Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи
на тему:
**«ПІДВИЩЕННЯ АДГЕЗІЇ БЕТОНУ ПРИ
РЕКОНСТРУКЦІЇ»**

Виконав:	С.О. Курбала
студент групи 601-БТ	
спеціальності 192 – будівництво та	
цивільна інженерія, ОП «Технології	
будівельних конструкцій, виробів і	
матеріалів»	
Керівник	О.М. Гукасян
Завідувач кафедри	О.В. Семко
Рецензент	Ю.О. Побухова

Полтава 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	5
1.1. Адгезія цементного тіста	5
1.2. Структура затверділого каменю	7
1.3. Процес твердіння портланд цементу	11
1.4. Гідратація портландцементу	12
1.4. Цементне тісто	13
1.5. Процес тужавіння та тверднення	14
1.6 Міцність цементного каменю	19
1.7. Вплив водо цементного відношення на міцність цементного каменю	23
1.8. Мікроструктура цементного каменю в залізобетонних виробках	23
1.9. Хімічні чинники, що впливають на тужавіння портландцементу	24
1.10. Висновки до огляду літератури	32
РОЗДІЛ 2. МЕТА РОБОТИ	34
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	35
3.1. Планування експерименту	35
3.1. Методика проведення досліду	37
РОЗДІЛ 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	43
4.1 Портландцемент	43
4.2 Хімічні добавки	43
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	45
5.1. Вплив компонентної добавки на адгезію цементного каменя	45
5.2. Вплив компонентної добавки на адгезію цементного каменя при склеюванні зволжених поверхонь	45

5.3. Вплив добавок на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих поверхонь, цемент М400	49
5.4. Вплив добавок на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих поверхонь, цемент М500	52
5.5. Заключення та рекомендації	56
5.6. Технічна характеристика оптимального складу для склеювання бетонних зразків	57
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	58
6.1. Бетонні роботи	58
6.2. Порядок виконання робіт	59
6.3. Організація робочих місць	65
6.4. Заходи безпеки під час роботи з хімічними добавками та бетонною сумішшю	67
ВИСНОВКИ	68
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА	69

ВСТУП

У ХХ столітті наука про цемент і бетон досягла значних успіхів. Дослідження процесів тверднення цементу розширили знання про склад і структуру продуктів гідратації, зокрема гіросилікатів кальцію, які відіграють ключову роль у формуванні цементного каменю та наданні йому характерних властивостей [1, 2].

Результати цих досліджень дозволили встановити взаємозв'язок між основними властивостями цементу та бетону, а також виявити закономірності тверднення бетону залежно від виду та якості початкового цементу. Цінність цементу як будівельного матеріалу визначається його механічною міцністю у затверділому стані [2, 3].

Швидкість тверднення цементу, початкова та кінцева міцність цементного каменю залежать досить численної кількості факторів, з яких особливу роль відіграє застосування різних добавок до бетонної суміші. Використання добавок є одним із найтехнологічніших, гнучких та доступних способів поліпшення властивостей бетонних сумішей і бетонів. Вони дозволяють надавати матеріалам нові властивості, підвищувати їх ефективність, знижувати трудовитрати, витрати цементу, економити енергоресурси та вдосконалювати технологічні процеси [3–5].

У клейких адгезивах, які склеюються при натисканні, діють три основні сили — тужавність, когезія та адгезія, що забезпечує процес склеювання. Таким чином, дослідження впливу комплексних добавок на адгезію цементного тіста є перспективним напрямком розвитку науки про бетон [4, 6]

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Адгезія цементного тіста

Дослідження синтезу ефективних хімічних добавок, розробки технологій їх застосування та впровадження фундаментальних праць видатних учених — Юнге, Ребіндера, Бутта, Ратінова, Тейлора, Лі, Людвіга, Лохера, Грудемо, відіграватимуть важливу роль у науково-технічному прогресі в галузі бетоноведення [1, 2, 7, 9].

Адгезія, або прилипання, означає зчеплення поверхонь різнорідних тіл і досягається під час нанесення гальванічних і лакофарбових покриттів, склеювання, зварювання, а також при утворенні поверхневих плівок, наприклад оксидних чи сульфідних. Клейові композиції, що застосовуються для з'єднання різних матеріалів, діють завдяки утворенню між клеєм і склеюваною поверхнею адгезійного зв'язку [7, 10].

Вважається, що механізм адгезії у органічних і мінеральних клеїв подібний. Органічні клеї проявляють адгезію, якщо містять сполуки з полярними функціональними групами. У мінеральних клеях адгезія пов'язана з присутністю активних полярних груп у складі. Для прояву адгезії необхідний тісний контакт між склеюваним матеріалом і клеєм, який забезпечується рідиною. Рідина збільшує площу контакту і надає часткам клею «рухливості». Змочування залежить від властивостей рідини та поверхні [2, 8].

У випадку мінеральних в'язучих систем робота ведеться із твердими тілами, що мають іонні ґрати (кристали), які добре змочуються полярними рідинами, наприклад водою або водними розчинами. Саме тому широко застосовуються гідратаційні в'язучі речовини. Цементуючі властивості в'язучих систем пов'язані з утворенням гідратів, а цементами можуть бути сполуки, здатні при взаємодії з водою формувати гідрати [3, 9, 10].

В'язучі властивості слід розуміти як здатність дисперсної системи, наприклад цементного тіста, до твердіння, що супроводжується адгезією. Тверднення — це перетворення дисперсної системи на каменевидне тіло, яке неможливе без зближення часток і підвищення концентрації твердої фази,

адже утворення моноліту пов'язане з появою міжагрегатних контактів. Частки цементного тіста в такому стані називають стиснутими [1, 7].

Особливий склад новоутворень у тужавіючих дисперсних системах (гідратів) визначається здатністю полярної рідини замішування зв'язуватися з компонентами системи. Полярність дисперсійного середовища важлива не лише для ефективного змочування часток, але й для формування новоутворень специфічного складу, що загалом підвищує адгезійні властивості цементного тіста. Проте наявність такої фази у дисперсній системі ще не гарантує формування повноцінної структури тверднення [2, 6, 9].

Структуру тверднення іноді зводять до виникнення зв'язків між макрочастками під дією поверхневих валентних сил. Ці сили є короткодійними і самостійно навряд чи проявляються на агрегатному рівні, наприклад під час зрощення кристалів, без додаткових умов. Тверднення як синтез твердого тіла конденсацією дисперсних систем відбувається через явища, що протікають на агрегативному рівні, а для конденсаційних процесів на надмолекулярному рівні, незалежно від природи сил, що їх визначають, необхідне досягнення «обмеженості» системи — тобто зближення часток настільки, щоб могли проявитися більш дальнодіючі взаємодії, ніж валентні, що і забезпечує формування структури тверднення [1, 2, 9, 11].

Такі обмежені умови забезпечуються початково високою концентрацією дисперсної фази (високе значення T/P) та хімічним зв'язуванням рідини замішування, яка постачає новоутворенням полярні групи. Проте лише хімічне зв'язування рідини не гарантує достатнього зближення на агрегатному рівні. Тут важливу роль відіграє адсорбція води новоутвореннями та перехід води в плівковий стан. Для цього новоутворення повинні мати високу дисперсність, що забезпечує фізичне зв'язування води [2, 8, 12].

Таким чином, виходячи з уявлення про тверднення як перетворення дисперсної твердо-рідкої системи на міцну інтерфазну структуру з різнорідних часток, структура тверднення формується лише тоді, коли дисперсна система досягає стану обмеженості. У цьому стані можливі взаємодії різної природи та виникають контакти на агрегативному та надмолекулярному рівнях.

Ураховуючи роль полярного середовища і полярних груп у твердінні та адгезії, можна сформулювати умови прояву склеювальних (в'язучих) властивостей системи [3, 5, 10, 13].

Дисперсні системи проявляють в'язучі властивості за умови, що рідина заміщування є полярною, а утворена фаза містить полярні групи, такі як аквакомплекси, сольватоккомплекси або інші функціональні полярні групи. Це визначає хімічний аспект тверднення і дозволяє прогнозувати властивості в'язучих систем, оскільки забезпечує можливість прояву як тверднення, так і адгезії. Хімічний аспект цієї умови полягає у формуванні в системі комплексних з'єднань складного складу (гідратів). Включення полярних молекул і груп у структуру кристала не лише підвищує адгезію, а й надає кристалам специфічної активності порівняно з кристалами без таких груп [1, 4, 9, 14].

Хімічне та фізичне зв'язування розчинника та створення обмежених умов у системі сприяє прояву активності на агрегатному рівні, що забезпечує тверднення цементного тіста [2, 6, 8]. Комплексоутворення (гідрато- або сольватоутворення) у гетерогенних взаємодіючих і тверднучих системах є принциповим, оскільки воно:

а) за рахунок зв'язування рідини переводить систему в обмежені умови, підвищує концентрацію дисперсної фази завдяки новоутворенням з великою питомою площею поверхні в умовах дефіциту рідини;

б) істотно впливає на взаємодію часток дисперсної фази, що містять полярні групи, і на виникнення контактів різної природи, включно з кристалізаційними;

в) залежно від розташування води чи інших полярних груп у структурі комплексу та від ступеня їх поляризації під дією катіонного та аніонного полів змінюються властивості комплексу, що безпосередньо відображається на фізико-механічних властивостях цементного каменю [3, 5, 6, 9, 12, 13].

1.2. Структура затверділого каменю

У структурі затверділого цементного каменю характерними є

кристалізаційні контакти, які мають валентну природу і виникають під дією ненасичених поверхневих валентних сил. Відомо, що контакти на агрегатному рівні можуть формуватися лише при достатньо повільному розвитку процесу, тому саме відсутність кристалізаційних контактів визначає тривалість захоплення і твердіння. З цієї точки зору кристалізаційні контакти, ймовірно, є вторинними і з'являються вже після початкового твердіння [1–3, 15].

Валентні поверхневі сили, необхідні для утворення кристалізаційних містків між кристалами або їх зрощень, є ближньодіючими, а адсорбційні шари перешкоджають їх прояву. Для виникнення контакту на агрегатному рівні потрібні більш дальнодіючі сили, які дозволяють часткам дисперсної фази зближуватися, після чого вже проявляються валентні поверхневі сили. Кристалізаційна теорія не враховує природу цих сил [2, 4, 16].

Кристали можуть зростатися лише за умови правильної взаємної орієнтації, однак ймовірність того, що дрібні кристали розташуються до поверхні зростаючого кристала у потрібній орієнтації, надзвичайно мала. Крім того, дрібні кристали на межі розділу мають дуже короткий час життя. Це обмежує можливість зрощення кристалів, які вже сформувалися, а зрощення кристалів з неправильною орієнтацією відбувається лише у виняткових випадках. Ситуація покращується, якщо кристали, що ростуть у системі, орієнтовані правильно, але ймовірність зіткнення неправильно орієнтованих кристалів все одно значно вища [3, 5, 17].

Коагуляційні контакти є первинними на агрегатному рівні, але вони не визначають властивості тужавіння системи, зокрема втрату її тиксотропності, і тому не відповідають за другий етап структуроутворення. Ймовірно, існують проміжні контакти іншої природи, відмінні від коагуляційних та кристалізаційних, які відіграють ключову роль у формуванні структури цементного каменю [9, 18].

Момент формування структури тверднення у водосольових в'язучих системах збігається з переходом значної частини хімічно вільної води у плівковий структурований стан через адсорбцію, що призводить до зниження діелектричної проникності системи. Це можна вважати загальною властивістю

тверднучих систем. При значному розбавленні цементного тіста до концентрації приблизно 1/3 здатність до твердіння втрачається. При цьому падіння діелектричної проникності не спостерігається, хоча гідратування все ще відбуваються [2, 5, 12].

Механізм тверднення можна пояснити наступним чином: зв'язування рідини спричинює утворення фази з полярними групами, що забезпечує перехід дисперсної структури у камінь. Перехід значної частини води у плівковий стан пов'язаний із високою питомою площею поверхні новоутворень і супроводжується падінням діелектричної проникності. Рухливість структурних елементів гідратів у момент їх утворення сприяє формуванню інтенсивної дипольної структури [11, 15, 18].

Процес структуроутворення у цементному тісті проходить у два етапи: первинне формування структури (гідросульфатоалюмінатного каркасу) і вторинне – формування гідросилікатного гелю. Первинна структура існує близько трьох діб, після чого починається перехід до вторинної структури, де головну роль відіграє щільний гель гідросилікату. А.А. Байков зазначав, що утворення кристалізаційних контактів відповідає перетворенню метастабільного гелю гідросилікату у більш стійкий стан. Повільне зрощення сфер гелів забезпечує формування кристалізаційних контактів між агрегатами [9, 18, 19].

Сучасне уявлення про гідратаційне тверднення в'язучих систем передбачає рідкофазний механізм гідратації та визначає фізико-хімічні умови утворення конденсаційно-кристалізаційних структур. Ключовою умовою є пересичення водного середовища продуктами гідратації, що виникає внаслідок розчинення безводних в'язучих. Підвищення міцності дисперсної структури досягається регулюванням величини та тривалості пересичення шляхом зміни дисперсності вихідного в'язучого, введенням добавок, електролітів і регулюванням співвідношення швидкостей розчинення та кристалізації, що особливо важливо для утворення контактів зрощення [1, 4, 6, 20].

Для виникнення кристалізаційних контактів необхідне поєднання пересиченого середовища та механічних зусиль, що утримують кристали у

фіксованому положенні. Такі зусилля можуть виникати внаслідок зовнішнього тиску або тиску, що формується під час спрямованого росту кристалів у вже сформованій кристалізаційній сітці. Сучасні погляди свідчать, що зародки нової фази утворюються у пересиченому розчині через флукуаційне ущільнення розчиненої речовини: на поверхні підкладок формуються двомірні зародки, а в об'ємі розчину – тривимірні [17, 21].

Клінкерні мінерали під час гідратації схильні до полімеризації та формування колоїдів. Гідрогель у системі цемент–вода є гетерогенною сумішшю декількох фаз, при цьому фаза C–S–H майже повністю займає гел, тоді як СН та САН представлені переважно частками колоїдного розміру[9, 18].

Кінетика гідратації клінкерних мінералів здебільшого описується S-подібною асиметричною кривою, на якій виділяються періоди прискорення та уповільнення реакцій. Термокінетичні закономірності гідратації C3A і C4AF суттєво відрізняються. Для C3A характерний відсутній індукційний період, що свідчить про швидке утворення великої кількості зародків, які формують практично безперервний фронт реакцій[20, 22]. Зі збільшенням температури характер кінетики C3A не змінюється, на відміну від C4AF, для якого тривалість індукційного періоду різко скорочується і при 60°С він зникає.

Дослідження впливу катіонів сульфатних солей на гідратацію мінералів цементного клінкеру виявили певні закономірності. Для C3S спостерігалось різке зростання першого екзотермічного ефекту при введенні гідролізуючих сульфатів, які створюють кисле середовище. Вплив катіонів на величину першого екзотермічного ефекту можна упорядкувати таким чином: $Fe^{3+} > Al^{3+} > Ni^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+, Na^+$ [23].

Реакції в індукційний період впливають на подальший хід процесу. Гідролізуючі солі зменшують величину другого екзотермічного ефекту, тоді як сульфати лужних металів, практично не змінюючи перший екзотермічний ефект, значно підвищують швидкість гідратації у основному періоді. При дослідженні кінетики гідратації C3S у розчинах сульфатів різної концентрації було встановлено, що відносна кількість сульфату, що прореагував, зменшується із зростанням концентрації електроліту, а величина рН

середовища суттєво не впливає на перший екзотермічний ефект.

Дію електролітів слід оцінювати як за їхнім впливом на рідку фазу, що змінює розчинність в'язучого, так і за здатністю утворювати малорозчинні продукти (гідросульфоалюмінати, гідрохлоралюмінати тощо). Водночас гідролізуючі солі значно сповільнюють реакції у основному періоді [20, 23].

1.3. Процес твердіння портланд цементу

Портландцемент, витриманий при кімнатній температурі, відноситься до другої групи цементів, активність яких майже повністю зумовлена утворенням колоїдних продуктів, тобто тоберморитового гелю. Існують припущення, що максимальна міцність досягається або при формуванні найбільшої кількості кристалічного тоберморита, або при оптимальному співвідношенні кристалічних і колоїдних компонентів. Відповідно, тверднення цементу прямо пропорційно пов'язане із утворенням кристалічних та колоїдних продуктів, або продуктів обох типів[24].

Процес затвердіння гідравлічних в'язучих матеріалів реалізується шляхом формування гелеподібної структури, що на ранніх етапах характеризується пластичною консистенцією та високим вмістом води. Актуальні наукові дослідження свідчать, що цю гелеподібну фазу доцільно розглядати як сукупність високодисперсних, взаємопов'язаних кристалічних утворень[18, 25].

Початковою стадією взаємодії цементу з водним середовищем є утворення дисперсної системи. Для формування цементного тіста оптимальним вважається водоцементне співвідношення в діапазоні 0,3–0,7, що забезпечує розуцільнену паковку твердих частинок. Унаслідок гідратації на поверхні кожної цементної гранули формується шар гідратних продуктів, який на даній фазі переважно має колоїдні розміри (10–1000 Å) [26].

За даними різних авторів, співвідношення C/S і H/S може коливатися відповідно від 1,5 до 3 та від 1 до 3,84. Загалом встановлено, що збільшення C/S веде до підвищення H/S. Розбіжності пояснюються різними умовами гідратації та методами визначення вільної гідроксидної кальцію, зв'язаної води

та ще не прореагованих силікатів кальцію [24, 27].

Що стосується складу фаз, то C–S–H-фази можуть включати сторонні іони. Було встановлено, що до 1/6 SiO₂ може бути заміщено сульфатом, алюмінієм або залізом. При цьому 74% алюмінію, 50% заліза і 100% сульфату можуть заміщувати SiO₂, а решта алюмінію і заліза здатні заміщувати іони кальцію. Щелочі, оксид магнію та хлорид-іони також можуть входити до складу C–S–H-фази, змінюючи морфологію, співвідношення C/S та H/S і, як наслідок, міцність матеріалу. Магній може міститися в невеликих кількостях у кристалах 11 Å тоберморита, а сульфат у структурі гідросилікатів може бути зв'язаний так, що іон S⁶⁺ заміщує групу Si⁴⁺ + 2H⁺ [18, 27, 28].

1.4. Гідратація портландцементу

Хімічне походження цементного тіста та фізико-хімічні процеси його утворення мають ключове значення та вплив на його властивості, які відіграють ключову роль в технології бетону. Після початку взаємодії цементу з водою протягом короткого часу відбуваються швидкі хімічні реакції, після чого настає більш тривалий період слабкої активності, що називають періодом спокою або скратим. При кімнатній температурі він зазвичай триває 40–120 хвилин залежно від властивостей цементу [29, 30].

Фізичні характеристики свіжого тіста залежать від способу приготування. При обережному перемішуванні тісто залишається більш жорстким, ніж при інтенсивному механічному перемішуванні. Сухий цемент, який часто злежався, не диспергує рівномірно при простому зволоженні, тому для отримання однорідного тіста з мінімальною жорсткістю потрібне ефективне механічне перемішування [31].

Велике значення має тривалість перемішування. Якщо вона менше 30 секунд, тісто швидко тужавіє після припинення перемішування. Стейнор назвав це явище «коротким тужавінням» і пояснив його склеюванням зерен цементу гелем на поверхні. Навіть при достатньому перемішуванні залишається ризик виникнення «хибного тужавіння», тому в лабораторних умовах рекомендують перемішувати тісто з паузами, тривалість яких

визначають дослідним шляхом для кожного цементу [30, 32].

У польових умовах проблема «короткого тужавіння» практично не виникає, оскільки маса заповнювачів у бетономішалці забезпечує ефективно гомогенізування тіста, хоч і менш інтенсивне, ніж у лабораторних умовах [31].

Для з'ясування взаємозв'язку між структурою та механічною міцністю важливо визначити роль кристалічних елементів у тісті. Дані літератури суперечливі. Одні автори стверджують, що добре кристалізовані тоберморитові пластинки підвищують міцність, тоді як волокнисті або викривлені листочки знижують гідравлічні властивості. Інші вказують на високу міцність у тісті з колоїдними структурами, а ще інші пов'язують її з волокнистою структурою гідратів, де падіння міцності відбувається через рекристалізацію [18, 27, 33].

Очевидно, що такі фактори, як початкове співвідношення вода/цемент, пористість, умови перемішування та режим тверднення, впливають на кінцеву міцність не менше, ніж форма і розміри часток гелю. Тому для подальшого розуміння процесів тверднення важливо сформулювати теоретичні положення щодо ролі форми та розмірів часток гелю [29, 33, 34].

1.4. Цементне тісто

З часу конгресу в Токіо проведено багато досліджень морфології та мікроструктури C–S–H у цементному тесті, проте вони дають обмежену інформацію про її кристалохімічну структуру. C–S–H зустрічається у кількох різновидах, причому основну увагу зазвичай приділяють «внутрішнім» продуктам гідратації, які утворюються у порах цементного тесту. Проте екстраполяція властивостей внутрішніх продуктів на всю фазу C–S–H не завжди коректна. C–S–H (I) може не бути тісно пов'язаний з якимось конкретним компонентом затверділого тесту, іноді утворюючись як проміжний продукт. Голкоподібні структури, ймовірно, є погано кристалізованою формою C–S–H (II) [18, 27, 35].

Найбільш надійною гіпотезою щодо матеріалу, що заповнює сітку з голок, є та, що запропонована на конгресі в Токіо. Згідно з нею, структура

цього матеріалу складається з листів складу CaO_2 , на поверхнях яких атоми кисню утворюють частини силікатних іонів різного ступеня конденсації, OH^- , SO_4^{2-} і Al- та Fe-вмісні комплекси, розташовані неупорядковано. Ці шари можуть бути розділені молекулами H_2O і додатковими іонами кальцію, при цьому не виключається можливість скріплення проміжків силікатними ланцюгами. Внутрішні продукти гідратації можуть мати схожу структуру, але не обов'язково той же хімічний склад, який ближчий до безводної фази, що вони заміщують [27, 28, 36].

Для матеріалу, що заповнює сітку, і внутрішніх продуктів гідратації відношення C/S може коливатися від 0,5 до дуже високих значень. Важко провести чітку межу між C-S-H та погано кристалізованим $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з випадковими силікатними іонами. Високі значення C/S, знайдені Дайамондом, не свідчать про значну частку кристалічного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у цементному тесті. На основі цього підходу вважається некоректним використовувати терміни «тоберморитовий гель» або «тоберморит» [27, 35, 37].

Швидкість гідратації C_3S суттєво впливає на властивості цементного тесту. Прискорюють гідратацію хлориди, броміди, сульфати, нітрати, хромати лужних і лужноземельних металів, а сповільнюють її $\text{Ca}(\text{OH})_2$, фториди, фосфати та солі катіонів, що утворюють нерозчинні гідроксиди. Більшість органічних добавок також уповільнює процес. Прискорення гідратації при домішках пояснюється скороченням індукційного періоду за рахунок інтенсивнішого утворення зародків, тоді як гальмування виникає через уповільнення утворення зародків. Затравки прискорюють гідратацію, але не мають впливу на кінцеву міцність C_3S [29, 32, 38].

Основні продукти гідратації клінкерних мінералів включають гідросилікати кальцію, гідроалюмоферити, гідросульфалюмоферити кальцію та вільний гідроксид кальцію [18, 24, 39].

1.5. Процес тужавіння та тверднення

Механізм тужавіння та твердіння цементу характеризується наступним чином. При взаємодії з водою, цементні частинки ініціюють формування

перенасиченого розчину, з якого відбувається преципітація гелевої кристалічної фази. Ключове значення, працює як дифузійний транспорт молекул води до міжфазної межі або безпосередньо всередину кристалічної ґратки, що обумовлює подальші локалізовані хімічні перетворення. У випадку, якщо внутрішнє ядро цементної частинки залишається непрореагованим і ізольоване сформованими продуктами гідратації, проникнення води до нього можливе виключно шляхом дифузії крізь утворений гідратний бар'єр [29, 40, 41].

Ступінь гідратації під час тужавіння:

- C_3A – найшвидший серед 4-х клінкерних мінералів, 10–30% за 3 хв.
- Феритні фази – 8–20% за 3 хв.
- Аліт – декілька % за 3 хв., близько 10% через 5 годин, 40–70% за добу, 80–100% за 28 діб [24, 29, 42].

Додавання гіпсу підвищує ступінь початкової гідратації C_3S і, при оптимальному вмісті [30, 43].

Під час пластичного стану цементної суміші відбувається поступове ущільнення внаслідок зменшення загального об'єму системи «цемент + вода» під час гідратаційних процесів. З переходом маси до твердого стану спостерігається незначна експансія, зумовлена формуванням гелеподібної структури навколо частинок цементу, яка набухає та чинить тиск на оточуюче середовище. Об'єм гелевої фази поступово зростає, заповнюючи міжзерновий простір [18, 35, 44].

Цементний гель первісно формується в метастабільному стані: волокнисті кристалічні утворення або окремі частинки мають значний об'єм та містять більшу кількість води порівняно зі стабільною конфігурацією. Цей гель схильний до усадки та вивільнення частини води. У водних умовах усадка не є вираженою внаслідок безперервної гідратації негідратованих цементних частинок [27, 36, 45].

При висиханні затверділого цементу відбувається незворотна усадка та зниження вмісту води, що пов'язано з переходом гелю до більш стабільної модифікації. Наступне розширення при зволоженні та повторне абсорбування

води набувають зворотного характеру і циклічно спостерігаються під час чергування періодів зволоження та висихання. Пролонговане перебування у вологому середовищі здатна ініціювати повільний ріст кристалів та подальшу модифікацію структури [35, 37, 46]. Цементний гель є одним із головних складових цементного тіста. Іншим елементом виступає залишковий простір, який спочатку заповнений водою та не зайнятий гелем. Цей простір прийнято називати капілярними порами. Саме властивості гелю, ступінь його «розбавлення» капілярними пустотами, а також поведінка води в порах і капілярах визначають ключові характеристики бетону [18, 27, 47].

Затверділе цементне тісто являє собою багатофазну систему, що включає продукти гідратації, частинки цементу, які не вступили в реакцію, рідку фазу та воду, адсорбовану в порах [24, 29].

Процес гідратації цементу має змінну кінетику та механізм, які залежать від стадії реакції. Виділяють п'ять основних етапів:

- **I стадія** – миттєва реакція при контакті з водою;
- **II стадія** – прихований період із дуже низькою швидкістю реакції;
- **III стадія** – інтенсивне протікання реакції з поступовим прискоренням;
- **IV стадія** – зниження швидкості після піку активності;
- **V стадія** – ще більше уповільнення процесу [29, 32, 40].

Умовно весь процес поділяють на три періоди: індукційний (I–II стадії), період прискорення (III стадія) та період загасання (IV–V стадії) [29, 30].

Згідно з теорією тверднення через розчинення, індукційний період відповідає часу, що передує утворенню зародків продуктів гідратації. У рамках топохімічної теорії цей період пояснюється формуванням захисної оболонки на поверхні зерен цементу, які ще не прореагували [32, 41, 48].

При гідратації аліту та беліту – основних фаз цементного клінкеру – реакція відбувається за схемою:



Продукти реакції часто описують як гідросилікати кальцію загальної формули:



де співвідношення $X=\text{CaO}/\text{SiO}_2$ та $Y=\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ змінюється [24, 27, 49].

- **C–S–H I** ($X = 0,1\dots 1,5$) має структуру у вигляді деформованої плівки;
- **C–S–H II** ($X > 1,5$) характеризується волокнистою гофрованою [18, 35, 50].

Зі зростанням температури та концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у рідкій фазі основність гідросилікатів кальцію дещо підвищується. Всі вони належать до сімейства тоберморитових фаз. Існує думка, що змінна основність цих сполук зумовлена утворенням сумішей C–S–H I та C–S–H II [27, 36, 51].

Є також дані, що в процесі гідратації основність гідросилікатів кальцію зменшується через зміну концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у рідкій фазі. При цьому утворення $\text{Ca}(\text{OH})_2$ під час гідратації $\beta\text{-C}_2\text{S}$ та особливо C_3S майже не впливає на міцність цементного каменю. Однак наявність гідроксиду кальцію у твердій фазі та його здатність утворювати пересичені розчини визначають рН середовища, стійкість гідратних сполук і їх основність, а також властивості подвійних солей, що кристалізуються за участі добавок [29, 41, 52].

Різні безводні силікати та алюмінати кальцію мають неоднакову здатність реагувати з водою при нормальних температурах. Так, C_3S і C_3A активно взаємодіють із водою та характеризуються високою гідравлічною активністю. $\beta\text{-C}_2\text{S}$ реагує значно повільніше, а $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ практично інертний [24, 42, 53].

Портландцемент, витриманий за нормальної температури, належить до другої групи цементів, дія яких здебільшого обумовлена утворенням колоїдних продуктів, тобто тоберморитового гелю. Дослідження показують, що найбільшу міцність можна досягти або при максимальному утворенні кристалічного тоберморита, або при оптимальному поєднанні кристалічних і колоїдних складових. Таким чином, тверднення цементу пов'язане з утворенням обох типів продуктів [24, 35, 49].

Ще в 1893 році Михаеліс пояснив тверднення гідравлічних цементів формуванням гелю. Новоутворений гель спочатку пластичний і містить багато

води, а сучасні дослідження показують, що його можна розглядати як масу дуже дрібних, зрощених між собою кристалів [18, 36, 54].

При змішуванні цементу з водою утворюється дисперсна система. Щоб отримати тесто, потрібно співвідношення вода/цемент 0,3–0,7, що забезпечує нещільну упаковку зерен. На поверхні кожного зерна під час взаємодії з водою формується тонкий шар новоутворень гідратів, здебільшого колоїдного розміру (10–1000 Å) [26, 29, 35].

Згідно з різними дослідженнями, співвідношення C/S та H/S коливається відповідно від 1,5 до 3 і від 1 до 3,84. Загалом підтверджено, що збільшення C/S веде до зростання H/S. Розбіжності пов'язані з умовами гідратації та методами визначення вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$, зв'язаної води і ще не прореагованих силікатів кальцію [27, 35, 55].

C–S–H-фази можуть включати сторонні іони: до $1/6 \text{SiO}_2$ здатне заміщуватися сульфатом, алюмінієм або залізом. При цьому до 74% алюмінію, 50% заліза та 100% сульфату можуть заміщувати SiO_2 , а решта алюмінію та заліза — іони кальцію. Щелочі, оксид магнію та хлорид-іони можуть входити до C–S–H-фази, змінюючи її морфологію, співвідношення C/S і H/S і, як наслідок, міцність. Магній може міститися у невеликих кількостях у кристалах тобермориту, а сульфат може заміщувати Si^{4+} у структурі гідросилікатів, формуючи $\text{S}^{6+} + 2\text{H}^+$ [27, 35, 56].

Гідросилікати кальцію мають кристалічну тоберморитоподібну структуру і можуть бути як добре закристалізованими, так і погано закристалізованими. При температурі нижче 100°C зазвичай утворюються слабо кристалізовані новоутворення.

У затверділому цементному тісті гідросилікати зустрічаються з різним ступенем закристалізованості, який залежить від кількості порового розчину та розчинених у ньому іонів. На початку «періоду спокою» тісто представляє собою щільну суспензію частинок у пластівцеподібному стані [18, 36, 57].

Гідросилікати кальцію відіграють ключову роль у гідратації портландцементу і включають як добре закристалізовані, так і менш структуровані сполуки [24, 35, 49].

1.6 Міцність цементного каменю

Цінність цементу як будівельного матеріалу визначається передусім його механічною міцністю у затверділому стані. Міцність – ключова властивість цементного каменю, яка постійно зростає, забезпечуючи довговічність виробів. Вона залежить від багатьох факторів:

- мінералогічного складу клінкеру;
- тривалості твердіння;
- водоцементного відношення;
- ступеня ущільнення цементного тіста;
- тонкості помелу цементу;
- способу підготовки тіста;
- умов твердіння (вологість, температура, тиск, хімічний склад середовища, вплив радіації, електромагнітних і гравітаційних полів, вид та кількість добавок) [24, 47, 58].

Гідратація цементу просувається дуже поступово: через 24 години шар новоутворень досягає 0,5 мкм, через 7 діб – 1,7 мкм, а через 28 діб – 3,5 мкм. Якщо висота одного «шару» кристала приблизно 500 Å, то за першу добу формується 10 шарів, за 7 діб – 35 шарів (≈ 4 шари за добу), а за 28 діб – 70 шарів ($\approx 1,5$ шари за добу) [18, 35, 59].

Питома поверхня новоутворень зростає з часом: через 1 добу – 40 м²/г, через 7 діб – 126 м²/г, через 28 діб – 251 м²/г, що сприяє прояву адгезійних властивостей цементного тіста [27, 35, 60].

Властивості гідратів C3S і C2S значною мірою визначають характеристики цементу. Питома поверхня алітових цементів після повної гідратації стабілізується, а у белітових цементів із низькотемпературною обробкою з часом трохи зменшується [24, 29, 61].

Під час гідратації мінералів і цементу структура каменю змінюється, і разом із цим змінюються його механічні властивості. Основною характеристикою цементного каменю є велика питома поверхня новоутворень,

що забезпечує міцність на початкових етапах завдяки поверхневим силам. Проте ці сили можуть підтримувати міцність лише до певної межі. Руйнування зазвичай відбувається між кристалогідратами – лусками, де сили Ван-дер-Вальса значно менші, ніж у голчастих кристалах, які утворюють ці луски. Полімеризація гідрокристалів кальцію збільшує число атомів у молекулах і підвищує сили Ван-дер-Вальса, але це впливає лише на взаємодію між голчастими кристалами, а не між лусками [18, 35, 59].

Велику роль у міцності грає також текстура каменю – взаємна орієнтація і розмір кристалічних блоків. Цементний камінь має блочно-шарувату структуру: він складається з окремих блоків-агрегатів, шари яких утворені з лускатих полікристалів. Така будова легко розшаровується при згині та розтягу. При стиску шари зближуються і ущільнюються камінь, що тимчасово підвищує його міцність [35, 62]. Однак у блоках, де шари паралельні напрямку навантаження, можливе їхнє зміщення, що призводить до швидкого руйнування – «вибухового» руйнування, яке часто спостерігають під час випробувань цементу та бетону [47, 58, 63].

Міцність цементу як будівельного матеріалу залежить передусім від його складу, тонкості помелу, температури твердіння та застосування добавок. Однак кінцева міцність затверділого цементного тіста більшою мірою визначається його пористістю. Дослідження показали, що при пористості менше 40 % міцність зразків практично залежить лише від обсягу пор, а не від складу цементу чи способу виготовлення. Аналогічні результати спостерігалися і при підвищених температурах твердіння (100–250 °C).

Водночас кінцева міцність цементу залежить не тільки від пористості, а й від складу і умов гідратації. Цементи з високим вмістом трьохкальцієвого силікату тверднуть швидше, але досягають меншої кінцевої міцності, ніж цементи з більшим вмістом двокальцієвого силікату, через меншу кількість гідросилікатів кальцію. Другорядні компоненти, такі як луки, прискорювачі або уповільнювачі гідратації, також впливають на міцність [29, 30, 61].

Повільна гідратація створює більше простору для росту кристалів і формує довговолонисті гідросилікати кальцію, які краще зчеплюються між

собою, на відміну від коротких волокон, що утворюються при швидкій гідратації. Щоб довгі волокна ефективно зміцнювали структуру, пори між зернами цементу мають бути достатньо малими, тобто водоцементне відношення має бути низьким. Міцність цементного тесту формується більше завдяки адгезії, силам Ван-дер-Ваальса та взаємному зчепленню продуктів гідратації, ніж через первинні хімічні зв'язки [35, 59, 64].

Механізм гідратації трьохкальцієвого силікату включає кілька етапів:

- Адсорбція молекул води на поверхні силікату через слабкі і зворотні зв'язки.
- Хемосорбція води з утворенням міцних і незворотних зв'язків, що створює потенційні зародки під час індукційного періоду.
- Перетворення потенційних зародків на критичні і їх зростання.
- Подальша гідратація через дифузію води і поліконденсацію силікатних тетраедрів.
- Дослідження за допомогою термолюмінесценції показали, що захоплені електрони відіграють важливу роль на етапах хемосорбції і формування критичних зародків [29, 30, 65].

Щоб зрозуміти залежність між структурою цементного тіста і його механічною міцністю, важливо встановити, чи впливає форма кристалічних елементів (наприклад, волокон) на розвиток міцності [66]. Дані літератури з цього питання суперечливі: деякі автори стверджують, що тісто з добре кристалізованими тоберморитовими пластинками має більшу міцність, тоді як волокнисті або викривлені структури знижують гідравлічні властивості; інші відзначають, що міцність зростає при висококолоїдних структурах; є й ті, хто пов'язує високу міцність з волокнистою структурою продуктів гідратації, а падіння міцності – з рекристалізацією. Водночас на кінцеву міцність впливають і інші фактори: водоцементне відношення, пористість, умови перемішування та режим тверднення [18, 35, 59, 63].

Процес твердіння цементу поділяють на три стадії:

Рання стадія – через декілька хвилин після замішування на поверхні зерен

цементу утворюються кристали еtringіту та гідроксид кальцію; протягом першої години з'являються тонкі шари гідросилікатів кальцію. Волокнисті гідросилікати переплітаються і заповнюють пори, зміцнюючи цементний камінь [30, 43, 67].

Середня стадія (1–24 години) – відбувається гідратація чотирьохкальцієвого алюмофериту, еtringіт переходить у моносольфат; його роль у структуроутворенні обмежена раннім твердненням [24, 42].

Вплив умов на міцність – зниження температури уповільнює процес тверднення, але сприяє формуванню довших волокон гідросилікатів і збільшує кінцеву міцність. Підвищення температури, тонкий помел або прискорювачі скорочують тривалість тверднення і призводять до утворення великої кількості зародків у порожнинах, але волокна залишаються короткими, що зменшує довгострокову міцність. Добавки-уповільнювачі сповільнюють ранню міцність, але підвищують її на пізніх стадіях [30, 43, 68].

Міцність цементного каменю значною мірою залежить від морфології, кількості, рівномірності розподілу та орієнтації волокнистих продуктів гідратації. Оскільки міцність зростає в процесі гідратації, існує певний зв'язок між мірою гідратації та механічними властивостями, але внесок кожного цементного з'єднання у загальну міцність різний. Так, C3A, C2AF і C3S гідратуються швидко, але основним носієм міцності є C3S, тоді як C2S гідратується повільніше, проте постійно сприяє розвитку міцності [24, 29, 61].

Прості залежності, наприклад прямопропорційність або квадрат кількості гідратованого цементу, не пояснюють спостережувані факти. Пауерс запропонував виражати міцність через відношення гель/пори – об'єм гідратованого цементу до суми цього об'єму та об'єму капілярів. Це відношення, схоже на раніше запропоновані іншими авторами, дозволяє отримувати досить точні залежності для окремих цементів і термінів гідратації, хоча міцність при однаковому відношенні гель/пори може відрізнятися для різних цементів або цементних розчинів [58, 63, 69].

Хорошу кореляцію показує також залежність від міцності портландцементу для бетону на кількості пов'язаної води в схопленому

цементі. Ця вода визначалась як та, що утримується нагріванням до 110°C, але втрачається при 550°C, і вимірювалася безпосередньо у цементному тісті [59, 70].

1.7. Вплив водо цементного відношення на міцність цементного каменю

Існують різні характеристики щодо впливу водо-цементного відношення (В/Ц) на швидкість гідратації та формування мікроструктури цементного каменю, і вони іноді суперечливі. У початковий період ступінь гідратації С3S і С2S майже однакова при В/Ц від 0,3 до 0,7, а пізніше ступінь гідратації зростає зі збільшенням В/Ц. За даними Ф. Лохера, до семиденного віку гідратація досягає мінімуму при В/Ц = 0,8, при цьому зменшення В/Ц підвищує основність утворюваних гідросилікатів [29, 30, 71].

Властивості цементного каменю залежать від щільності упаковки зерен, міцності зв'язку між ними та кількості новоутворень. Надлишок води зменшує густину цементного тіста, збільшує товщину плівок новоутворень і сприяє появі крупнокристалічних маломіцних утворень у порах. Це уповільнює тужавлення та знижує міцність [47, 58, 63, 72].

Таким чином, для оптимального твердіння цементного тіста потрібно мінімальне необхідне В/Ц, достатнє для повної гідратації та максимального ущільнення суміші [35, 73, 74].

1.8. Мікроструктура цементного каменю в залізобетонних виробках

Цементний розчин і бетон є штучними конгломератами, основними елементами яких є заповнювачі та цементний камінь, що їх зв'язує. Властивості такого конгломерату залежать від його макро- та мікроструктури. Мікроструктура бетону визначається розміщенням цементного каменя, дрібного та крупного заповнювачів, а також пор, заповнених розчином або повітрям [47, 58, 63].

Дрібні та крупні заповнювачі утворюють каркас бетону, зменшуючи осідання. Якість і кількість заповнювача суттєво впливають на міцність і інші

властивості бетону. Відкриті пори погіршують якість: знижують водонепроникність, збільшують водопоглинання, зменшують морозо- та корозійну стійкість. Закриті пори, навпаки, покращують експлуатаційні характеристики та довговічність бетону [58, 74, 76].

При виготовленні бетону можна регулювати його макроструктуру, змінюючи вихідні матеріали, склад суміші та технологічні режими. Макроструктура бетону включає мікроструктуру цементного каменю, контактні зони із заповнювачем та арматурою, а також пори — тобто ділянки, що забезпечують склеювання конгломерату [59, 63, 77].

За Б. В. Дерягіним, міцність склеювання визначається двома чинниками: адгезією — міцністю на контакті твердіючих поверхонь, і когезією — міцністю самого цементного каменю [18, 35, 64].

Дослідження П. А. Ребіндер показали, що основним фактором міцності бетону є зчеплення цементного каменю з заповнювачем. Адгезійні сили виникають завдяки хімічно активним продуктам гідратації цементу, наявності щільної колоїдної фази в контактному шарі та мінімальній зміні об'єму цього шару під час твердіння [27, 59, 78].

Процеси структуроутворення в цементно-водних суспензіях відбуваються головним чином у шарах між зернами заповнювача [35, 63, 77].

Заповнювачі можуть хімічно взаємодіяти з цементом і слугувати активними домішками для утворення нових фаз [61, 79].

Сьогодні вважають, що адгезійні сили в цементному камені зазвичай перевищують когезійні. Це пояснюється тим, що кристалізація новоутворень відбувається насамперед на поверхні не гідратованих зерен. Кристали займають більший об'єм, ніж вихідні складові, тому не гідратовані зерна завжди перебувають у стані стиснення [35, 59, 64].

1.9. Хімічні чинники, що впливають на тужавіння портландцементу

При перших практичних спробах використання портландцементу виявилось, що швидкість його тужавіння може значно відрізнитися в різних зразках. Час схоплювання, тобто проміжок часу від моменту змішування

цементу з водою до моменту, коли тісто набуває здатності витримувати певний умовно прийнятий тиск, є загалом довільною величиною. Проте він може служити зручним показником для порівняння здатності різних цементів до тужавіння. Загалом, чим вищий вміст глинозему та окису заліза в цементі, тим швидше настає початок тужавіння, оскільки ці сполуки тужавіють швидше. Саме цей фактор пояснює швидке схоплювання старого роман-цементу [43, 80, 81].

Раніше портландцемент тужавів повільніше через сукупність кількох причин. Він мав порівняно грубий помел і містив значну кількість вільної вапна, яка сповільнює процес тужавіння. До того ж у клінкері накопичувався сірчаноокислий кальцій у вигляді сульфату кальцію, що також уповільнює тужавіння. Клінкер, випалений в обертових печах, обпалювався краще і містив менше сульфатів, а подальше удосконалення помольного обладнання сприяло прискоренню тужавіння цементу. Найпоширенішою добавкою для регулювання тужавіння, що вводилася під час помолу клінкеру, є гіпс [42, 43, 82].

У свій час для уповільнення тужавіння цемент поглинав приблизно 1% води, після чого досить було додати трохи гіпсу, не більше 1%, щоб досягти бажаного уповільнення тужавіння. Пізніше цей метод припинили застосовувати [43, 80].

Сьогодні терміни тужавіння сучасного портландцементу регулюються введенням певної кількості гіпсу під час помолу клінкеру. Оптимальна кількість гіпсу зазвичай відповідає 1–3% SO_3 . Стандарти більшості країн встановлюють гранично допустимий вміст гіпсу в готовому цементі. Введення гіпсу у встановлених межах дозволяє регулювати терміни тужавіння та позитивно впливає на міцність цементу, тоді як надлишковий гіпс може викликати незначне розширення тужавіючого цементу [30, 43, 83].

Вплив гіпсу на процес тужавіння цементу не є пропорційним його кількості. Навіть невелике перевищення рекомендованої дози може суттєво змінити терміни схоплювання цементного тіста. У той же час, наявність гіпсу у вільному стані в клінкері або додавання його до цементу підсилює уповільнюючу дію цієї добавки [43, 82, 84].

Для уповільнення тужавіння можуть використовуватися й інші форми сульфату кальцію. Напівводний гіпс, $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, уповільнює схоплювання цементу більш різко, ніж звичайний гіпс. Подібний ефект спостерігається і при застосуванні розчинного ангідриду. Це пояснюється швидшим розчиненням таких матеріалів та підвищеною концентрацією сульфату кальцію в пересиченому розчині, що утворюється. Для запобігання утворенню пересичених розчинів, як зауважує Шахтшабель, до напівгідрату можна додати невелику кількість гіпсу, частки якого виконують роль зародків кристалізації [30, 82, 85].

Поза межами впливу сульфату кальцію, існує спектр інших сольових компонентів, здатних модифікувати процеси тужавіння портландцементу. Деякі з цих сполук демонструють ретардуючий ефект на початкові стадії схоплювання, тоді як інші виступають у ролі акселераторів. Примітно, що деякі солі виявляють дуалістичний вплив: у низьких концентраціях вони можуть сповільнювати тужавіння, тоді як у високих — прискорювати його. Аналіз доступних літературних джерел з цього питання часто виявляє суперечливість даних, а ефективність дії конкретної сольової добавки значною мірою детермінується хіміко-мінералогічним складом цементу [29, 30, 86]. Проте вплив цих добавок різниться для різних видів цементу. У деяких випадках введення понад 3% хлористого кальцію може спричинити майже миттєве тужавіння. Хлористий натрій впливає слабкіше: в одних випадках він прискорює процес схоплювання, в інших — уповільнює його [43, 87].

Лужні карбонати, так само як і вуглекислий газ, значно прискорюють тужавіння; навіть при внесенні 1–2% добавки термін початку схоплювання скорочується до декількох хвилин. Менш активним є карбонат амонію. Водночас бікарбонати часто мають уповільнюючу дію. Хлористий алюміній і хлористий магній суттєво прискорюють схоплювання, тоді як хлористий барій і хлористий стронцій надають слабший прискорюючий ефект. Додавання хлористого амонію, хлористого заліза, хлорного заліза або хлористого кобальту у кількості до 2% уповільнює тужавіння, тоді як більші дози цих солей навпаки прискорюють його [30, 43, 88].

Солі сірчаної та азотної кислот, введені у розведених розчинах до звичайного цементу з гіпсом, практично не впливають на схоплювання. Гідроокиси натрію та калію, а також силікат натрію підвищеної концентрації дещо прискорюють тужавіння. Водночас добавка цукру у вигляді 1%-ного розчину майже повністю зупиняє процес тужавіння і тверднення, хоча може викликати миттєве ущільнення, що на вигляд нагадує швидке схоплювання. Навіть невелика доза цукру — 0,05% від маси цементу — здатна призвести до того, що через добу цемент практично не матиме міцності, а через три доби набере лише близько половини нормальної [30, 43, 89].

Теорія дії уповільнювачів. При змішуванні цементу з водою утворюється розчин, який за 1–2 хвилини насичується гідратом окису кальцію та сульфатом; інколи спостерігається навіть часткове пересичення розчину цими компонентами. Початок тужавіння зумовлюється дією алюмінатів і трьохкальцієвого силікату, який починає схоплюватися через декілька годин. Гідратація різних сполук цементу відбувається майже одночасно, оскільки вона починається на поверхні твердих часток і поступово поширюється всередину. Тому значну роль відіграє відносна реакційна здатність кожного з'єднання [29, 30, 90].

Нормальний портландцемент, що містить для регулювання термінів схоплювання 4–5% гіпсу, взаємодіє з водою дуже швидко. Відомо, що вапно, сульфат і луги швидко переходять у розчин у цементному тесті з водоцементним співвідношенням 0,4–0,5. Концентрація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ незабаром досягає рівня насичення, після чого вапно продовжує розчинятися, формуючи пересичений розчин [30, 43, 91].

Продукти гідратації як трьохкальцієвого (C3S), так і двохкальцієвого (C2S) силікатів при звичайній температурі характеризуються низькою кристалічністю, надзвичайно тонкодисперсною структурою і за своїми властивостями нагадують мінерал тоберморит (за Тейлором). Аналогічний тоберморитоподібний гідрат силікату кальцію утворюється і при гідратації портландцементу [27, 35, 50].

Частина продуктів гідратації, що виникають першочергово,

відкладається на поверхні клінкерних зерен або дуже близько до них. У випадку зерен C3A та C4AF ця оболонка має склад, схожий на високосульфатний сульфоалюмінат кальцію. Для зерен C3S оболонка, ймовірно, представлена погано кристалізованим гідратом силікату кальцію з колоїдними розмірами часток. У міру розвитку гідратації ці оболонки стають змішаними, зберігаючи колоїдну природу і діючи як захисна плівка, яка спочатку уповільнює швидку взаємодію компонентів [30, 36, 92].

Швидкість гідратації C3S на початковій стадії висока, потім знижується до відносно низького рівня, після чого знову зростає до моменту початку схоплювання. Це означає, що приблизно у період схоплювання оболонка втрачає здатність стримувати реакцію. Аналогічний гальмівний вплив проявляється і для C3A та C4AF, тоді як гідратація C2S початково повільна і залишається майже лінійною протягом тривалого часу; регулюючий вплив дифузії води починає відігравати роль лише при значній товщині шару гелю. Таким чином, гранична середня швидкість гідратації значною мірою визначається дифузією води через вже утворені гелевидні продукти [29, 32, 41].

Механізм прискореної дії. Різні безводні силікати та алюмінати кальцію мають різну здатність взаємодіяти з водою при нормальних температурах. Портландцемент, що твердне при звичайних умовах, відноситься до гідралічних цементів, міцність яких в основному формується за рахунок утворення тоберморитного гелю [24, 35, 50].

Першим результатом змішування цементу з водою є формування дисперсної системи. Для отримання замісу необхідне водоцементне співвідношення (В/Ц) у межах 0,3–0,7, що забезпечує нещільну упаковку зерен цементу. Взаємодія з водою призводить до утворення на поверхні зерен тонкого шару новоутворень гідратів, розмір яких зазвичай колоїдний (10–1000 Å) [26, 29, 35].

Ці поверхневі шари новоутворень частково займають об'єм за рахунок зерен, частково — рідини. Розчин швидко насичується іонами Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} та лугами. У міру розвитку реакції оболонки новоутворень розширюються і перекривають один одного, утворюючи гель у просторі між зернами, що й

відповідає процесу схоплювання. Подальша гідратація призводить до більш щільного розташування часток між клінкерними зернами, перетворюючи матеріал на масу зіткнених один з одним часток [30, 35, 59].

Особливість такого гелю полягає у нерівномірності щільності упаковки та наявності пор. У ньому присутні кристалічні частки розміром понад 1 мкм, що формуються у порах під час рекристалізації. Кристалізація новоутворень відіграє важливу роль у наростанні міцності цементного каменю [35, 59, 93].

Дослідники висловлюють різні точки зору щодо ролі кристалічних новоутворень: деякі вважають, що максимальна кількість кристалів забезпечує низьку міцність, інші — що існує оптимальне співвідношення кристалічних та колоїдних складових. Отже, процес тверднення цементного тесту пов'язаний як з утворенням кристалічних продуктів, так і з колоїдних або комбінованих структур [18, 35, 59].

За даними Цур-Штрассена, формування добре кристалізованої тоберморитної фази значно прискорюється у цементному тесті, яке містить значну кількість луку [80, 94].

Лохер. Утворення гідросилікатів кальцію

За даними Лохера, гідросилікати кальцію вперше формуються в цементному тісті у вигляді волокнистих частинок. На ранніх стадіях їхня довжина становить приблизно 0,1 мкм, а діаметр — 100–200 Å [27, 35, 50].

На початковому етапі гідратації кількість гідратних фаз відносно невелика, тому в просторі між зернами цементу можливе вільне зростання гідросилікатів кальцію у формі довгих волокон. Одночасно формуються стовпчастий еtringіт та тонкі пластинки гідроксиду кальцію. Довгі волокна гідросилікатів кальцію утворюють просторову сітку, яка забезпечує міцне зчеплення між різними фазами гідратів [30, 35, 67].

Якщо на початку гідратації зміст фаз гідратів досягає рівня, при якому з'являються перші слабкі контакти між ними, щільність цементного тіста збільшується, і воно починає схоплюватися. У процесі подальшої реакції міцність структури поступово зростає [29, 32, 59].

Гідросилікати кальцію мають ключове значення для гідратації більшості

цементів, включаючи портландцемент. Вони включають як добре кристалізовані сполуки, так і слабо кристалізовані речовини. Усі вони практично нерозчинні у воді. При гідратації силікатів кальцію за температури нижче 100 °С зазвичай утворюються слабо кристалізовані продукти; саме такі новоутворення формуються при гідратації портландцементу у вигляді тесту при кімнатній температурі [27, 35, 50].

Реакція гідратації починається відразу після змішування цементу з водою. Уже через кілька хвилин розчин між зернами цементу стає перенасиченим відносно іонів сульфату та гідроксиду, що виділяються під час гідролізу аліту (C3S). Оскільки аліт є основним мінералом портландцементу, процес гідратації проходить у кілька етапів [29, 30, 90]:

Період твердіння – розчинення мінералів цементу у воді та утворення перенасичених нестійких систем. До першої групи гідратних новоутворень належить гідросилікат кальцію, який формується з аліту й беліту [24, 35].

Колоїдація (тужавлення) – формування новоутворень у колоїдній системі, тобто гелю. На цьому етапі навколо зерен утворюються оболонки з новоутворень, які перешкоджають проникненню води до частинок клінкеру [30, 36, 92].

Утворення $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – відбувається як з аліту, так і з беліту. Паралельно новоутворення переходять у термодинамічно стійку форму, змінюючи сили взаємодії між часточками. У структурі цементного каменю формуються великі кристалічні частки, що створюють каркас, який пронизує основну масу гелеподібного гідросилікату кальцію [41, 47, 59].

Таким чином, формування волокнистих гідросилікатів кальцію, їх поєднання з іншими гідратами та поступова кристалізація створюють міцну і стабільну структуру цементного каменю [35, 59, 64].

Далі настає явище контракції, або стягування, що характеризується ущільненням цементного каменю. У цей період кількість вільної води зменшується, цементне тісто загущується, а бетонна суміш втрачає рухливість. Цей етап прийнято називати періодом тужавлення, який відповідає третьому етапу процесу твердіння [58, 63, 69].

Зі зростанням механічної міцності, що обумовлено ущільненням структури та збільшенням частки її кристалічної фази, цей період супроводжується явищем кристалізації — перетворенням колоїдної гелеподібної фази у кристалічну структуру [35, 59, 93].

Процес твердіння та гідратації триває протягом тривалого часу, проте його інтенсивність поступово знижується. Наприкінці цього періоду гідратні оболонки навколо цементних зерен стають досить щільними, і проникнення води до центру зерен припиняється. У цей момент наростання міцності цементного тіста в бетоні завершено. Внаслідок цього частина цементних зерен у центрі залишається не гідратованою — приблизно 30–35 % від маси цементу [58, 78, 95].

Будь-яка добавка до цементу може діяти як прискорювач тверднення, якщо вона утворює нерозчинне з'єднання з вапном, що виділяється під час гідролізу цементу. Формування нових фаз сприяє ущільненню цементного каменю, а утворення нерозчинних сполук підсилює взаємодію з іншими компонентами і прискорює подальший гідроліз мінералів цементу, тобто стимулює гідратацію [24, 30, 96].

Деякі добавки, особливо **полімерні**, покращують фізико-механічні властивості цементного каменю, виконуючи ущільнюючу та зміцнюючу функцію під час формування кристалічної структури, а також сприяють утворенню нових нерозчинних фаз [76, 97].

Кінетика процесу **кристалоутворення** з пересиченого іонного розчину та властивості отриманих кристалів залежать не лише від мінералогічного складу, дисперсності та форми часток речовини, але й значною мірою від наявності домішок, зокрема хімічних добавок [29, 35, 94].

Вплив домішок на процес визначається їхнім хімічним складом, концентрацією, температурою середовища та іншими зовнішніми чинниками. Домішки можуть [30, 41, 59]:

- Інтегруватися у **кристалічну решітку початкової речовини**.
- Адсорбуватися на внутрішніх та зовнішніх поверхнях кристалів.

- Знаходиться у вигляді **самостійних кристалів** в кристалічному продукті, утворюючи механічну суміш.
- У перших двох випадках домішки змінюють **фізико-хімічні властивості початкових речовин**, а в третьому — впливають на **фізико-механічні властивості продуктів кристалізації**.

1.10. Висновки до огляду літератури

В'язучими властивостями володіють дисперсні речовини, які при взаємодії з водою або іншою рідиною замішування здатні утворювати гідратні сполуки, такі як аквакомплекси або сольватоккомплекси [35, 59, 98].

Портландцемент складається з чотирьох основних мінералів клінкеру, здатних взаємодіяти з водою з утворенням гідросилікатів, гідроалюмінатів, гідроферитів і гідроксиду кальцію [24, 30, 78].

Швидкість гідратації мінералів не є постійною, вона періодично змінюється: спостерігаються етапи прискорення та уповільнення процесу [29, 32, 90].

Причини уповільнення гідратації:

- Перенасичення рідкої фази відносно вапна сповільнює гідратацію C3S [30, 43, 91].
- Гідратні продукти спочатку відкладаються на поверхні клінкерних зерен і формують щільну водонерозчинну плівку, яка перешкоджає проникненню розчинених іонів до центру зерна [36, 92, 93].

Утворення цементного тіста та гелю: при замішуванні цементу з водою спочатку утворюється цементне тісто. У процесі гідратації виникають гідратні фази колоїдних розмірів, що формують **тоберморитовий гель**; під час коагуляції цей гель забезпечує **тужавлення тіста** [27, 35, 50].

У **коагуляційній структурі** формується дрібнозернистий кристалічний каркас, що складається з еттрінгіту та гідросилікатів кальцію [30, 59, 67].

Гідросилікати кальцію можуть бути різними за структурою: низькоосновні CSH I та високоосновні CSH II. Деякі з них наближаються до природного тобермориту, але при кімнатних умовах у цементному тісті

формуються слабкозакристалізовані структури [35, 50, 93].

Прискорення кристалізації гідросилікатів забезпечують спеціальні «затравки» — готові центри кристалізації. У ролі таких затравок можуть виступати заздалегідь гідратований цемент, алюмосилікати (наприклад, пелігорскіт), або аквакомплекси сульфатів лужних та трьохвалентних металів (квасці) [41, 64, 94].

Головні властивості цементного каменю — це міцність, яка визначається багатьма чинниками, серед яких: умови твердіння, ступінь кристалічності та форма і розміри кристалів [58, 63, 78].

Процеси твердіння та властивості цементного каменю можна ефективно регулювати введенням комплексних хімічних добавок [76, 96, 97].

Адгезійні властивості мають речовини, що містять полярні молекули [18, 35, 64].

Найвища адгезійна міцність досягається тоді, коли кристали алюмінатів або силікатів кальцію цементного тіста зростаються із кристалами поверхні, що склеюється [59, 64, 77].

РОЗДІЛ 2. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи: Встановити склад цементної системи, придатної для склеювання бетонних елементів або проведення реставраційних робіт, на основі показників міцності відриву цементного шва.

Об'єкт дослідження: Зразки цементних балок, склеєні цементним тістом марок ПЦ400 та ПЦ500, з можливим додаванням хімічних добавок.

Предмет дослідження:

Міцність цементного шва при відриві;

- Водо-цементне відношення цементного тіста;
- Ступінь зволоження поверхонь, що склеюються;
- Товщина склеюваного шва.

Основні завдання дослідження:

Розробити оптимальний метод склеювання двох бетонних зразків.

Дослідити залежність міцності цементного каменю на відрив від водо-цементного відношення та товщини шва.

Проаналізувати вплив додавання хімічних добавок на адгезійні властивості цементного шва.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Планування експерименту

Планування експериментів та вибір вихідних даних

Планування експериментів та вибір вихідних даних з використанням математико-статистичних методів доцільно проводити при розгляді двох змінних. Це необхідно для побудови залежностей, які дозволяють коректувати склад цементного розчину під час склеювання досліджуваних зразків. Такі методи особливо актуальні при організації виробництва за новою технологією та у випадку застосування автоматизованих систем керування технологічним процесом.

Мета використання математико-статистичних методів

Вони полягають у встановленні математичної залежності між властивостями будівельного розчину та витратою матеріалів. Отримана залежність дозволяє визначати та призначати оптимальні склади цементного розчину для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик.

Методика побудови математичних залежностей

Побудова здійснюється на основі спеціальних лабораторних дослідів, результати яких уточнюються у виробничих умовах.

Послідовність проведення лабораторних дослідів:

Уточнення оптимізуючих параметрів (міцності, заданих характеристик, спеціальних вимог тощо) відповідно до поставленої задачі;

Вибір факторів, які визначають змінність оптимізуючих параметрів;

Розрахунок експериментальних складів цементного розчину;

Визначення меж варіювання факторів.

Вибір факторів та рівнів їх варіювання

В якості факторів можуть виступати: витрата води, витрата цементу, витрата заповнювачів та інші параметри, що залежать від конкретних умов задачі. Значення фактора у головному вихідному складі приймається за головний (середній або нульовий) рівень.

При проведенні дослідів фактори можуть варіюватися:

- **На трьох рівнях:** нижньому, середньому (головному) та верхньому, де відхилення від середнього однакове й називається інтервалом варіювання;

- **На двох рівнях:** верхньому та нижньому.

Для спрощення запису та подальших розрахунків:

- верхній рівень позначається як **(+1)**,
- середній рівень – **(0)**,
- нижній рівень – **(-1)**.

Таке позначення відповідає переведенню факторів у кодovий (нормалізований) масштаб.

$$X_i = \frac{(X_i - X_{i0})}{\Delta X_i}, \quad (3.1)$$

де X_i – значення i -го фактора в новому кодовому масштабі;

X_j – значення i -го фактора в натуральному масштабі;

X_{i0} – основний рівень i -го фактора;

ΔX_i – інтервал зміни i -го фактора.

Часто при записі плану проведення експерименту цифру «1» опускають, і кодовий запис рівнів факторів позначають просто як «+», «0» та «-».

Досліди (або дослідні записи) проводяться відповідно до кількості факторів та конкретних умов розв'язуваної задачі. План проведення експериментів зазвичай оформлюють у вигляді матриці, приклад якої наведено в таблиці 3.1.

Примітка. Під час проведення дослідних замісів відповідно до вибраного плану в **матриці 1** та **матриці 2** досліди, що відповідають нульовій точці (усі фактори на основному рівні), були рівномірно розподілені між іншими дослідями, повторюючись через кожні 3–5 замісів.

Відповідно до завдання передбачалося частково замінити дрібний заповнювач відходом виробництва – **дефекатом**, у пропорціях від маси піску, які наведені в таблиці.

Матриця проведення експериментів

№ досліджу	Матриця планування (x _i)		Квадрати перемінних (x ² _i)		Взаємодія (x _i x _j)		Властивості будівельного розчину (вихід)				
	x ₁	x ₂	x ² ₁	x ² ₂	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	R _{ст7}	R _{ст28}	ρ _m	n	v
1	+	+	+	+	+	+					
2	-	+	+	+	-	-					
3	+	+	+	+	-	+					
4	-	+	+	+	+	-					
5	+	-	+	+	+	-					
6	-	-	+	+	-	+					
7	+	-	+	+	-	-					
8	-	-	+	+	+	+					
9	+	0	+	0	0	0					
10	-	0	+	0	0	0					
11	0	0	0	+	0	0					

Отримані результати досліджень оброблялися за допомогою методів **математичної статистики** складене відповідне **алгебраїчне рівняння** яке дає можливість описувати взаємозв'язок між вихідними факторами та досліджуваними властивостями будівельного розчину.

$$Y = b_0 + X_1b_1 + X_2b_2 + X_1^2b_1^2 + X_2^2b_2^2 + X_1X_2b_1b_2 \quad (3.2)$$

Результати випробувань та їх пояснення наведені в розділі 5.

3.1. Методика проведення досліджу

Адгезійні властивості цементного каменю зазвичай оцінюють за показниками **міцності на розрив** [99, 101].

Згідно з даними літератури, найкраща адгезія цементного тіста спостерігається до бетонної поверхні [100, 102]. Тому для проведення експерименту заздалегідь були виготовлені **цементні балочки** з водоцементним відношенням **В/Ц = 0,42** (Рис. 3.1 та 3.2), які тверднули у лабораторних умовах протягом 7 діб.

Для дослідження адгезійних властивостей цементного каменю як без добавок, так і з добавками, була розроблена матриця математичного планування двохфакторного експерименту.

Таблиця 3.2 Матриця планування експерименту з змінними факторами.

Змінні фактори:

X₁ - В/Ц цементного тіста: 0,3; 0,35; 0,4

X₂ – товщина шару цементного тіста, мм: 1; 3; 5

Таблиця 3.2

Матриця планування експерименту з змінними факторами

№ досліджу	Рівні змінних факторів		Значення змінних факторів	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	+1	+1	0,4	5
2	+1	-1	0,4	1
3	-1	+1	0,3	5
4	-1	-1	0,3	1
5	+1	0	0,4	3
6	-1	0	0,3	3
7	0	+1	0,35	5
8	0	-1	0,35	1
9	0	0	0,35	3
10	0	0	0,35	3
11	0	0	0,35	3



Рис. 3.1. Досліджувані зразки



Рис. 3.2 Загальний вигляд цементних балочок для визначення адгезійних властивостей.

Для склеювання бетонних балок використовували **чисте цементне тісто** при зазначеному значенні **В/Ц**, а також тісто з різними добавками:

- а) **квасци + ЗАС**;
- б) **квасци + ЗАС + бішофіт**;
- в) **квасци + ЗАС + бішофіт + NaNO_2** .

Цементне тісто готували шляхом ретельного **перемішування та перетирання суміші** 275 г цементу з відповідною кількістю води, визначеною згідно з **В/Ц** (Табл. 3.3).

Оскільки цементний камінь є досить **пористим матеріалом**, його питома поверхня здатна вбирати воду з клею або цементного тіста, що призводить до зменшення ефективного водо-цементного відношення. Тому перед склеюванням **цементні балочки замочували у воді на 10–15 хвилин**, щоб мінімізувати втрату вологи.

Цементне тісто накладали **рівномірним шаром** на поверхню обох балочок, після чого їх з'єднували і залишали у спокої до повного затвердіння тіста (Рис. 3.3).

РОЗДІЛ 4.ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Портландцемент

Для проведення експериментальних досліджень використовувався портландцемент марки **М400**, що відповідає вимогам **ДСТУ Б В.2.7-46:2010** та **ДСТУ EN 197-1:2015** (EN 197-1:2011, IDT). Середні характеристики цементу М400 наведені в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Усереджені характеристики цементу М400

Якісні характеристики Тип цементу, виробник	Вміст SO ₃ , %	Тонкість помолу		Строки тужавлення, г, хв		Границя міцності при стиску, МПа	
		Залишок на ситі №008,%	Не нормується	Початок	Кінець	7 діб	28 діб
Нормативні вимоги	не більше 3,5	не більше 15	Не нормується	не раніше 00:60	не пізніше 10:00	не менше 20	не менше 40
ПЦ П/Б-Ш-400	1,9	7,0	3050	3:05	4:40	26,8	40,9

Характеристика портландцементу М400, використаного в дослідженнях:

- Масова частка портландцементного клінкеру: 65–79 %.
- Масова частка гранульованого доменного шлаку: 21–35 %.
- Масова частка оксиду магнію в клінкері: 1,2–1,8 %.
- Рівномірність зміни об'єму: витримав встановлені нормативи.
- Ознаки помилкового тужавіння: відсутні.
- Клас використання за даними радіаційного контролю: I.

4.2 Хімічні добавки

Хімічні добавки, використані в експериментах:

Нітрит натрію (NaNO₂)

- Зовнішній вигляд: кристали білого кольору з жовтуватим відтінком.

- Форми випуску: твердий та рідкий розчин (вміст NaNO_2 близько 28 %).
- Вимоги: відповідає ДСТУ EN 934-2:2018 «Нитрит натрия.

Технические условия».

Карбонат калію (K_2CO_3)

- Зовнішній вигляд: порошок або комочки білого кольору.
- Розчинність: розчинний у воді, гігроскопічний, нерозчинний у спирті та ефірі.

- Вимоги: відповідає ДСТУ EN 196-2:2015 «Калій углекислый.

Технические условия».

Гідроксид натрію (NaOH)

- Зовнішній вигляд: білі лусочки, шматки або циліндричні палочки з кристалічною структурою на зломі.

- Властивості: сильно гігроскопічний, добре розчинний у воді та спирті, швидко поглинає вуглекислий газ і воду з повітря, поступово перетворюється у вуглекислий натрій.

- Вимоги: відповідає нормам ДСТУ.

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1. Вплив компонентної добавки на адгезію цементного каменя

Як відомо з літературних джерел, адгезія цементних систем визначається методом відриву. Висока адгезія цементного тіста до поверхні іншого матеріалу забезпечується проникненням цементної суспензії у пори основи. Після затвердіння формується міцний контакт, руйнування якого вимагає не лише подолання сил зчеплення між цементом та основою, але й когезійних сил самого матеріалу [100, 102].

З огляду на це, для вивчення адгезійних властивостей цементу із добавками були виготовлені цементні балочки розміром 4×4×16 см (рис. 2.1, розділ «Методика дослідження»), які тверділи на повітрі протягом 7 діб.

Для склеювання готувалося цементне тісто на основі портландцементу М400 та М500. Склад та кількість добавок до цементу були прийняті відповідно до даних магістерських робіт Джиркінса Ентоні та Черицької Лілії: залізо-натрійові квасци – 1,8 %, затравки алюмосилікатів – 0,5 %, бішофіт – 1,5 %. Водоцементне відношення тіста становило 0,3–0,34 (табл. 2.2, розділ «Методика дослідження»). Склеєні балочки зберігалися на повітрі протягом 7 діб і випробовувалися на відрив за схемою, наведеною на рис. 2.3 (розділ «Методика дослідження»).

5.2. Вплив компонентної добавки на адгезію цементного каменя при склеюванні зволжених поверхонь

Результати випробувань наведені в таблицях 5.1 та на рисунках 5.1–5.3. Вони свідчать про дуже низьку міцність на відрив у діапазоні 0,2–0,85 МПа. Це пояснюється високою пористістю матеріалу балочок – цементного каменя, яка досягає 53 %. Така значна кількість пор активно відсмоктує воду із цементного тіста, що значно погіршує умови формування адгезійного контакту [100, 101].

З урахуванням цього фактору експериментальні дослідження були повторені. Цементні балочки перед склеюванням попередньо занурювалися у воду та витримувалися протягом 24 годин. Після такої підготовки балочки знову

склеювалися та випробовувалися на відрив. Нові результати (табл. 5.2, рис. 5.4–5.6) показали істотно іншу картину: у цьому випадку спостерігається значне зростання міцності на відрив.

Таблиця 5.1

Вплив компонентної добавки на адгезію цементного каменя при склеюванні зволжених поверхонь

№ досліджу	X ₁	X ₂	Наявність добавок	Сила відриву, кгс	Адгезія, МПа	Площа відриву, см ²
	В/Ц	Товщина, мм				
1	0.32	5	Квасці 1,8% ЗАС – 0,5% Бішофіт 1,5%	119	0,35	34
2	0.34	1	Квасці 1,8% ЗАС – 0,5% Бішофіт 1,5%	55	0,2	27,5
3	0.3	5	Квасці 1,8% ЗАС – 0,5% Бішофіт 1,5%	107	0,25	42,8
4	0.3	1	Квасці 1,8% ЗАС – 0,5% Бішофіт 1,5%	60	0,1	57,0
5	0.34	3	Квасці 1,8% ЗАС – 0,5% Бішофіт 1,5%	115	0,25	46,1
6	0.3	3	Квасці 1,8% ЗАС – 0,5% Бішофіт 1,5%	0,5	0,27	38,5
7	0.32	5		180	0,3	61
8	0.32	1		56	0,103	54
9	0.32	3	Квасці; ЗАС; бішофіт+NaNO ₂ 0,25%	230	0,95	24,2
10	0.32	3		142	0,85	16,72
11	0.32	3		146	0,98	14,89

Згідно з математичним плануванням експерименту отримано рівняння регресії:

$$Y_{міц.} = 75,81 - 11,75X_1 + 21,55X_2 + 2,7X_3 - 4,53X_1^2 + 3,93X_2^2 - 3,23X_1X_3;$$

$$FP < FT (6,1 < 19,3)$$

Оскільки $F_p < F_t$ ($6,1 < 19,3$), рівняння є придатним для опису залежності адгезійної міцності в межах досліджуваних факторів.

Вплив змінних факторів на адгезію цементного каменю при склеюванні зволжених поверхонь показано на рисунках 5.1–5.3.

Аналіз графіків свідчить, що найбільший вплив на адгезію має водоцементне відношення та товщина шару склеювання. Найвищі значення міцності на відрив спостерігаються при товщині шва близько 3 мм і водоцементному відношенні близько 0,35. При мінімальних значеннях факторів також максимальна адгезія досягається при товщині шару 3 мм, а вплив водоцементного відношення залишається менш вираженим.

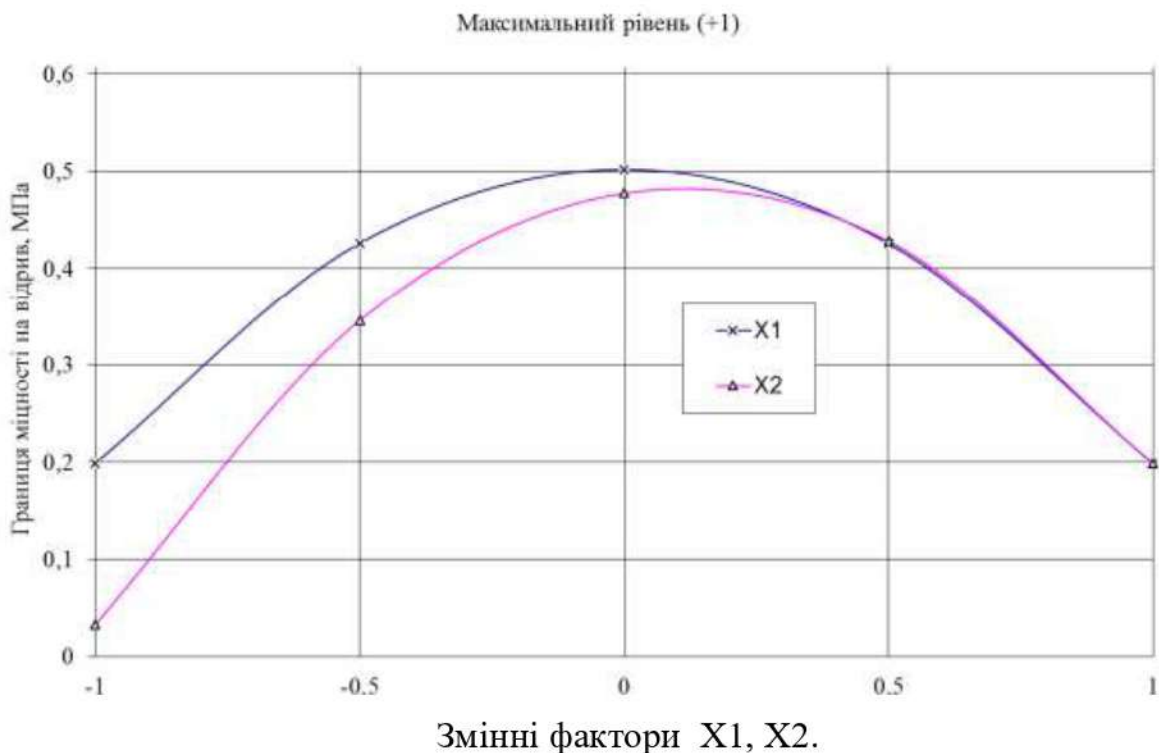
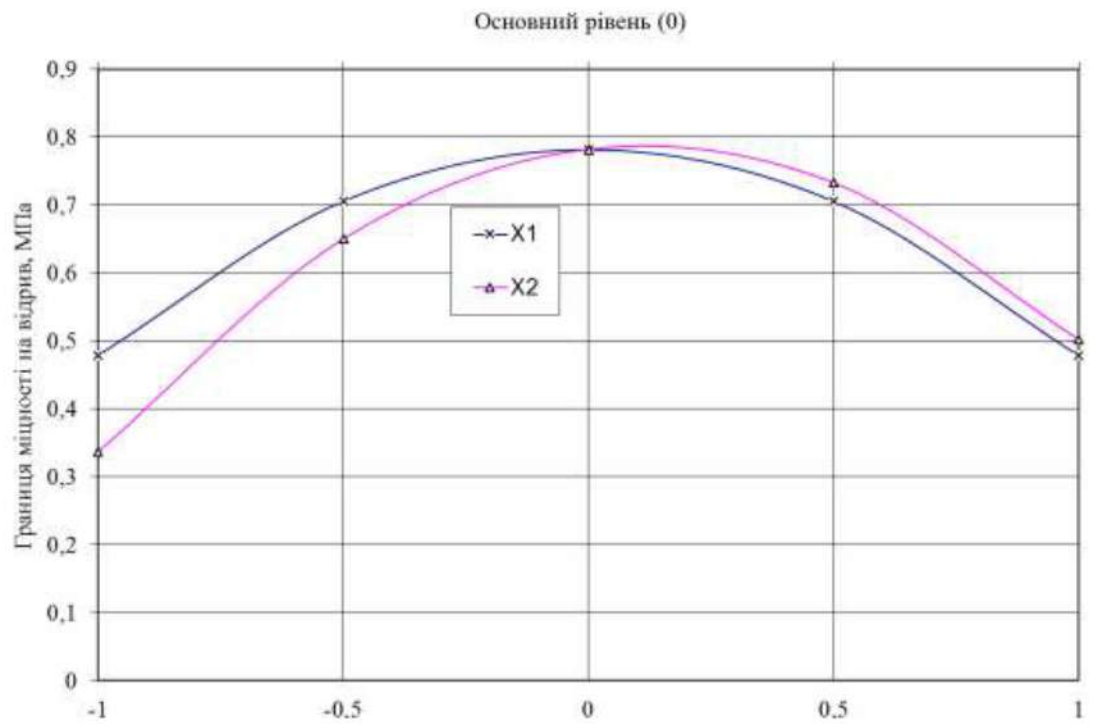
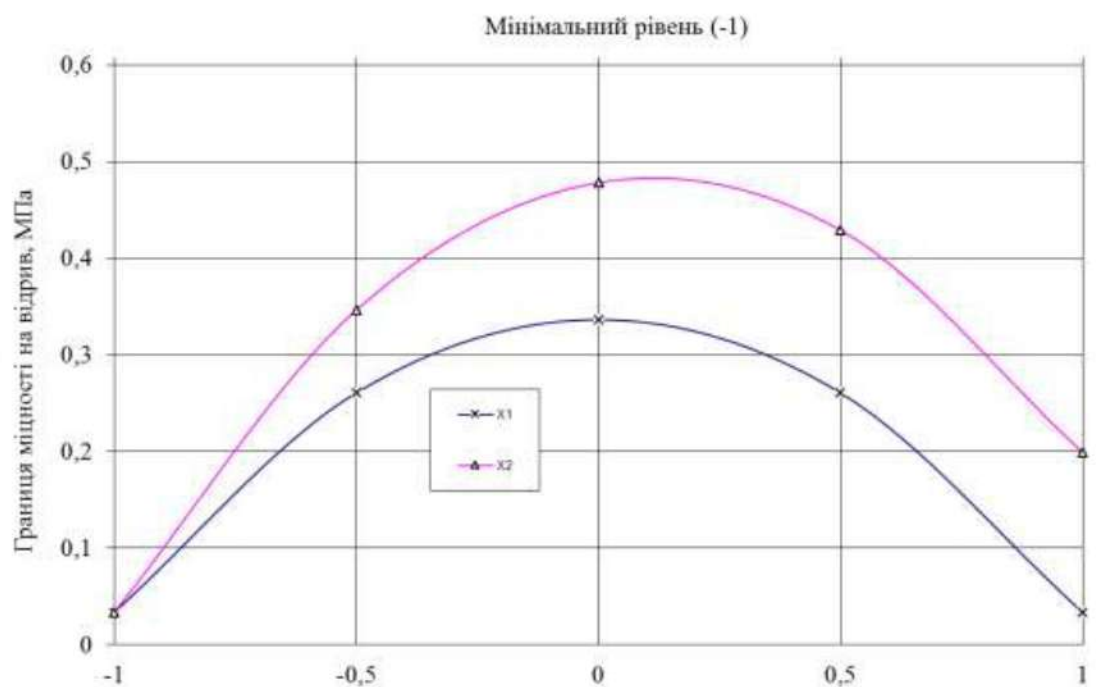


Рис. 5.1 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.



Змінні фактори X1, X2.

Рис. 5.2 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.



Змінні фактори X1, X2.

Рис. 5.3 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.

5.3. Вплив добавок на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих поверхонь, цемент М400

Результати випробувань наведені в таблиці 5.2 і на рисунках 5.4–5.6 та свідчать, що міцність при відриві становить 0,6–1,75 МПа. Порівняно з попереднім експериментом це значення істотно вище, що пояснюється заповненням пор цементного каменю водою, яка зменшила її водопоглинання і покращила умови зчеплення [29–31].

З урахуванням цього фактору цементні балочки перед склеюванням занурювали у воду та витримували 24 години. Після цього їх повторно склеювали і випробовували на відрив. Отримані результати, наведені в таблиці 5.2 і на рисунках 5.4–5.6, підтверджують суттєве зростання адгезійної міцності цементного шва [29, 30].

Згідно з результатами математичного планування експерименту отримано рівняння регресії

$$Y_{\text{міц.}} = 75,81 - 11,75X_1 + 21,55X_2 + 2,7X_3 - 4,53X_1^2 + 3,93X_2^2 - 3,23X_1X_3;$$
$$FP < FT (6,1 < 19,3)$$

яке є статистично придатним, оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше табличного ($6,1 < 19,3$).

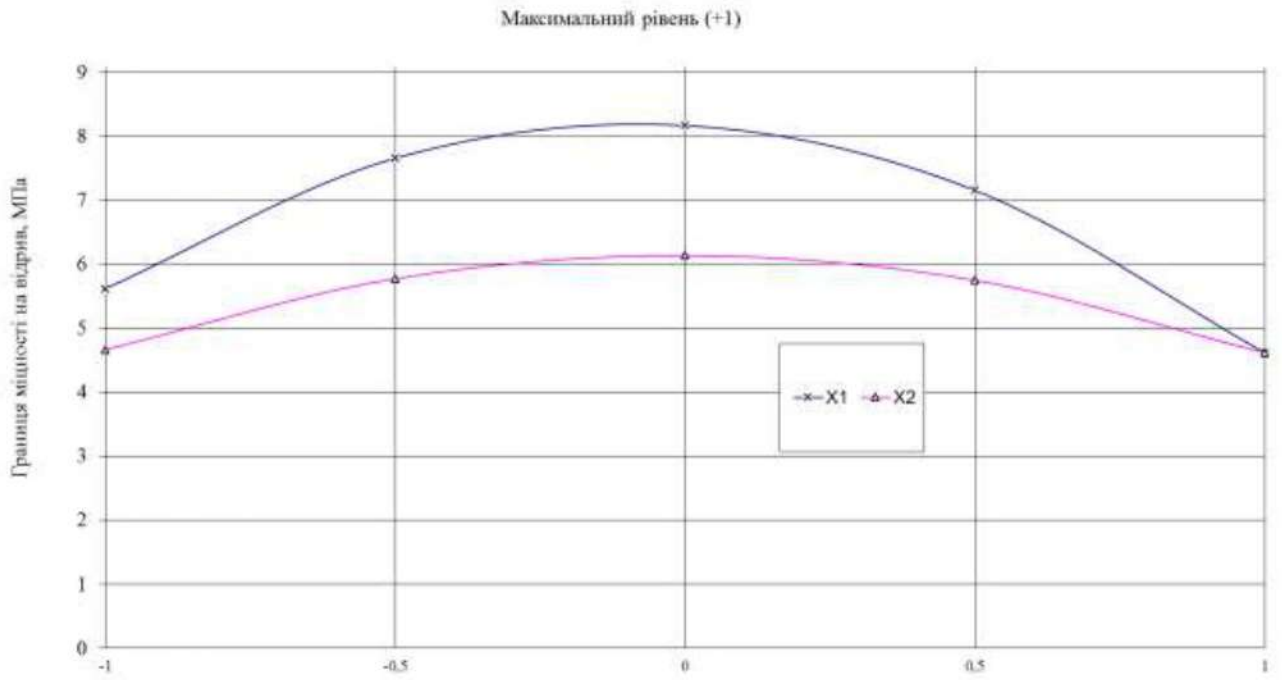
Графічна інтерпретація впливу досліджуваних факторів на адгезійну міцність цементного каменю при склеюванні зволжених поверхонь подана на рисунках 5.4–5.6. Аналіз цих залежностей показує, що вирішальну роль відіграють водоцементне відношення та товщина шару клею, особливо в зоні їх середніх значень [29–32].

За умови, що всі фактори перебувають на середньому рівні, максимальна адгезійна міцність досягається при товщині цементного шару близько 3 мм і водоцементному відношенні 0,35. Аналогічна тенденція спостерігається і при мінімальних рівнях змінних факторів: найвищі значення адгезії знову відповідають шару товщиною 3 мм, а вплив В/Ц = 0,35 проявляється дещо слабкіше, але залишається позитивним.

Таблиця 5.2

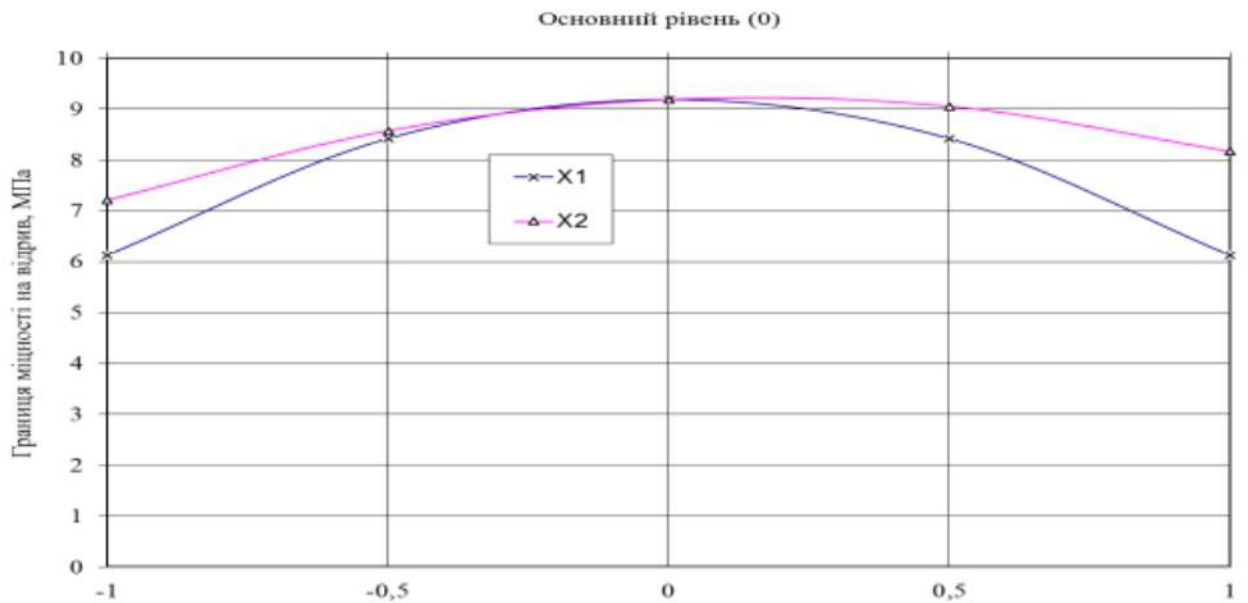
Вплив добавок на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих
поверхонь, цемент М400

№ досліду	X ₁ - ВЦ	X ₂ товщина, мм	Наявність добавки	Сила відриву, кгс	Площа поверхні см ²	Адгезія, МПа	Міцність при стискові	
							1 доба	7 діб
1	0,34	5	Квасці, ЗАС, бішофіт	216	22,5	0,96		
2	0,34	1	Квасці, ЗАС, бішофіт	175	23,6	0,74	8,19	21,3
3	0,3	5	Квасці, ЗАС, бішофіт	243	31,6	0,77	7,78	19,86
4	0,34	1	Квасці, ЗАС, бішофіт	172,5	28,7	0,61	3,63	12,13
5	0,34	3	Квасці, ЗАС, бішофіт	199	23,4	0,85	7,78	12,81
6	0,3	3	Квасці, ЗАС, бішофіт	168	27,1	0,62	3,18	8,94
7	0,32	5	Квасці, ЗАС, бішофіт	207,3	21,82	0,95	5,26	11,15
8	0,32	1	Квасці, ЗАС, бішофіт	146,7	17,9	0,82	4,97	12,71
9	0,32	3	Квасці; ЗАС; бішофіт+NaNO ₂ 0,25%	195,8	16,32	1,2	12,47	27,15
10	0,32	3	Квасці; ЗАС; бішофіт+NaNO ₂ 0,25%	260,5	14,89	1,75	14,57	28,8
11	0,32	3	Квасці; ЗАС; бішофіт+NaNO ₂ 0,25%	276,0	18,4	1,5	15,71	26,33



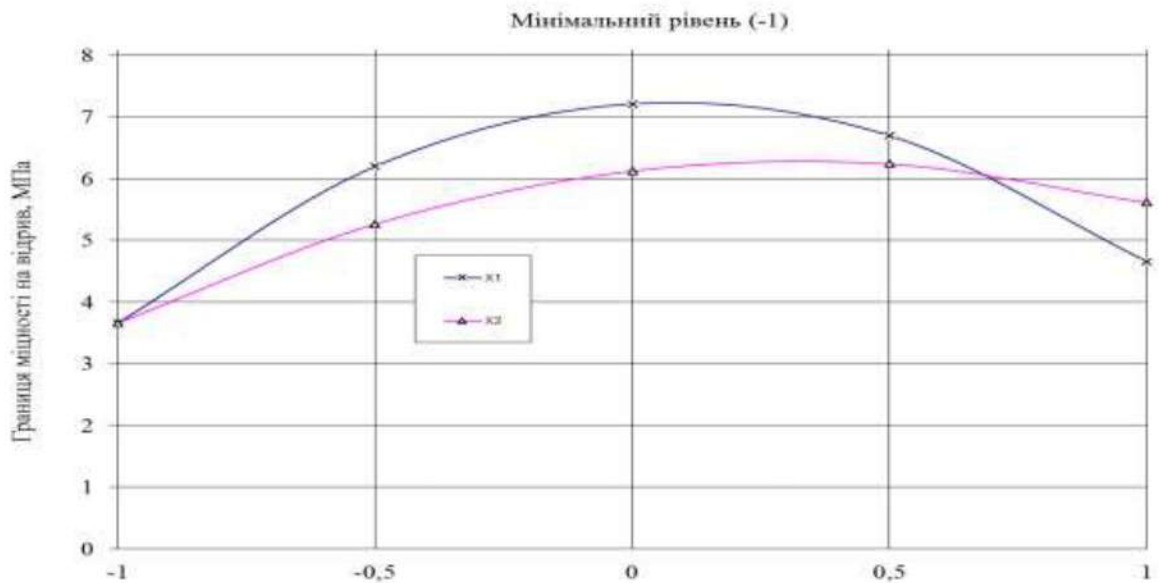
Змінні фактори X1, X2.

Рис. 5.4 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.



Змінні фактори X1, X2.

Рис. 5.5 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.



Змінні фактори X1, X2.

Рис. 5.6 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.

5.4. Вплив добавок на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих поверхонь, цемент М500

Результати випробувань, наведені в таблицях 5.3 і на рисунках 5.7–5.9, показують, що міцність з'єднання при відриві знаходиться в межах 3,5–9,3 МПа. Порівняно з попередніми серіями дослідів ці значення істотно вищі, що пов'язано з водонасиченням цементних зразків та підвищенням реакційної здатності цементного тіста. Заповнення пор водою зменшило її відсмоктування з клеючого шару, завдяки чому умови зчеплення значно покращилися [29–32].

З урахуванням цього ефекту експеримент було виконано повторно: перед склеюванням цементні балочки занурювали у воду і витримували протягом 24 годин. Після цього їх знову з'єднували цементним тістом і випробовували на відрив. Отримані результати, подані в тих самих таблицях і на відповідних графіках, підтверджують, що за таких умов формується значно міцніший шов і адгезійна міцність зростає [29–32].

Таблиця 5.3

Вплив добавок на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих поверхонь, цемент М500

№ дослідю	X ₁ - ВЦ	X ₂ товщина, мм	Наявність добавки	Сила відриву, кгс	Площа поверхні см ²	Адгезія, МПа	Міцність при стискові	
							1 доба	7 діб
1	0,34	5	Квасці, ЗАС, бішофіт	216	22,5	3,46		
2	0,34	1	Квасці, ЗАС, бішофіт	175	23,6	3,19	8,19	21,3
3	0,3	5	Квасці, ЗАС, бішофіт	243	31,6	6,94	7,78	19,86
4	0,34	1	Квасці, ЗАС, бішофіт	172,5	28,7	4,22	3,63	12,13
5	0,34	3	Квасці, ЗАС, бішофіт	199	23,4	8,1	7,78	12,81
6	0,3	3	Квасці, ЗАС, бішофіт	168	27,1	5,36	3,18	8,94
7	0,32	5	Квасці, ЗАС, бішофіт	207,3	21,82	8,45	5,26	11,15
8	0,32	1	Квасці, ЗАС, бішофіт	146,7	17,9	8,13	4,97	12,71
9	0,32	3	Квасці; ЗАС; бішофіт+NaNO ₂ 0,25%	195,8	16,32	8,54	12,47	27,15
10	0,32	3	Квасці; ЗАС; бішофіт+NaNO ₂ 0,25%	260,5	14,89	8,52	14,57	28,8
11	0,32	3	Квасці; ЗАС; бішофіт+NaNO ₂ 0,25%	276,0	18,4	9,28	15,71	26,33

Згідно з результатами математичного планування експерименту, залежність міцності зчеплення має вигляд:

$$Y_{міц.} = 75,81 - 11,75X_1 + 21,55X_2 + 2,7X_3 - 4,53X_1^2 + 3,93X_2^2 - 3,23X_1X_3;$$

$$FP < FT (6,1 < 19,3)$$

при цьому виконується умова адекватності моделі: **FP < FT (6,1 < 19,3)**.

Вплив змінних факторів на адгезію цементного каменю при склеюванні зволожених бетонних поверхонь наведено на рисунках 5.4–5.6.

Аналіз графічних залежностей показує, що визначальним фактором адгезійної міцності є водоцементне відношення. Саме його зміна істотно

впливає на величину міцності відриву. Натомість товщина клеювального шару в досліджуваному інтервалі практично не впливає на адгезію.

За середніх значень факторів максимальна адгезійна міцність досягається при $V/C = 0,35$, причому зміна товщини шару склеювання не викликає помітних змін у величині адгезії.

Аналогічна закономірність спостерігається і за мінімальних рівнів факторів: найбільша міцність зчеплення також відповідає $V/C = 0,35$, тоді як товщина шару склеювання не є визначальним чинником.

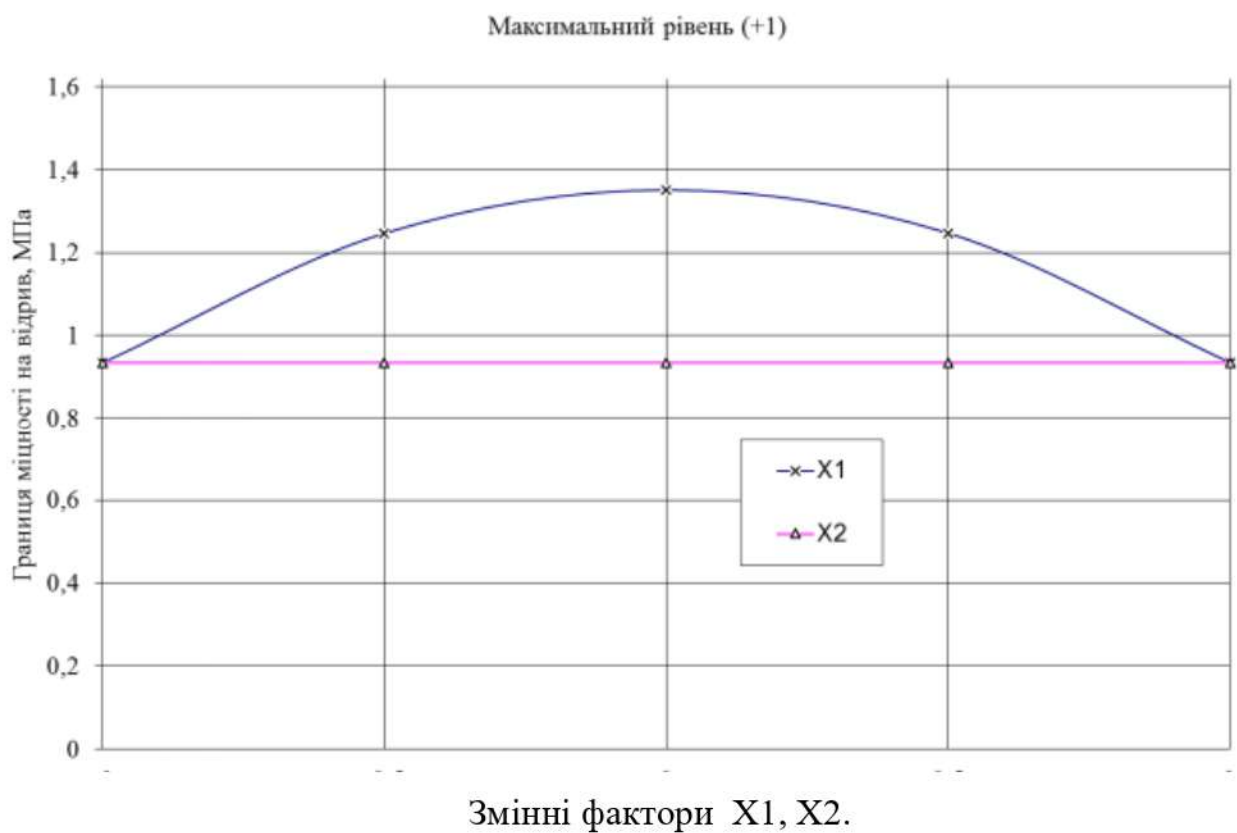
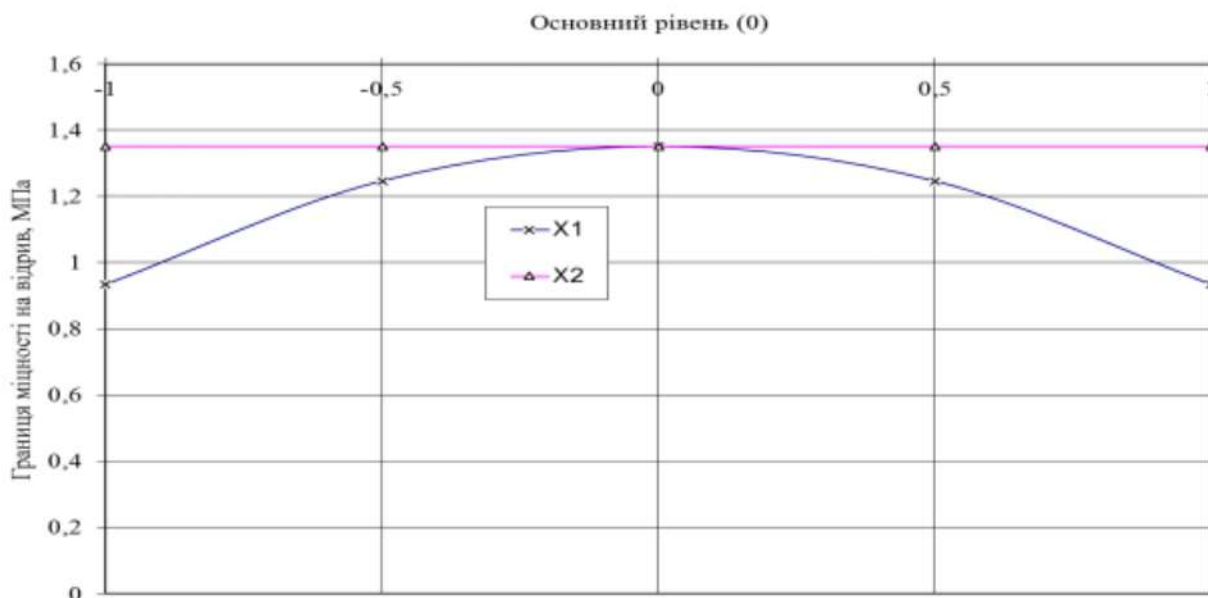
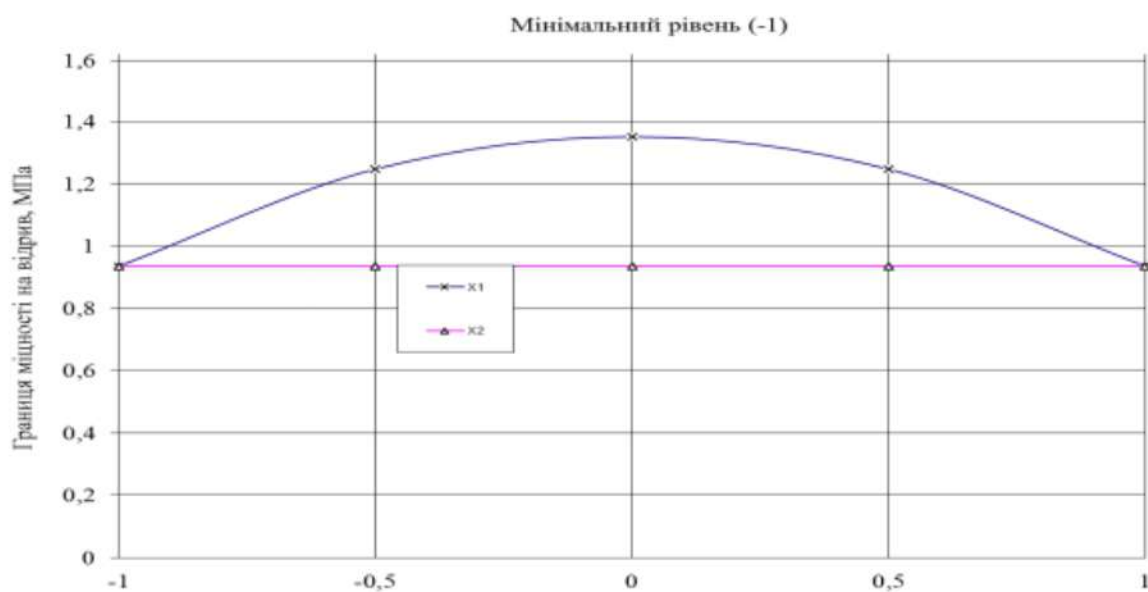


Рис. 5.7 Залежність міцності цементного каменю на відрив від V/C та товщини шва.



Змінні фактори X1, X2.

Рис. 5.8 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.



Змінні фактори X1, X2.

Рис. 5.9 Залежність міцності цементного каменю на відрив від В/Ц та товщини шва.

Міцність зчеплення становить від **0,6 до 1,5 МПа** і визначається головним чином водоцементним відношенням цементного тіста та наявністю хімічних добавок. Особливо помітний позитивний вплив **нітриту натрію**: при

його введенні міцність зростає до **1,75 МПа**. Така закономірність спостерігається для різних марок цементу [29–32].

Паралельно зі склеюванням балочок із цементного тіста виготовлялися кубики розміром **2×2×2 см**, які після **7 діб твердіння** випробовувалися на стиск.

Цементне тісто показало високу міцність при стиску і підвищену адгезію. Це пояснюється сприятливими умовами для кристалізації цементного каменю як у зразках-кубиках, так і в клеювальному шарі між балочками.

За літературними даними, адгезія цементного каменю до бетонної поверхні може досягати **близько 9 МПа**, і отримані в роботі результати добре узгоджуються з цими значеннями.

5.5 Заключення та рекомендації

- Адгезійні властивості в'язучих речовин відіграють важливу роль у формуванні міцних бетонних конструкцій і при виконанні реставраційних робіт, тому виконана робота має як теоретичне, так і практичне значення. Для забезпечення високої адгезії тверднучих композицій необхідне поєднання кількох умов [30–32]

До складу клеючих композицій мають входити речовини з полярними функціональними групами, оскільки саме вони забезпечують взаємодію з поверхнею, що склеюється. Для прояву адгезії необхідний тісний контакт між клеєм і матеріалом, який досягається за наявності рідкої фази. Якісне змочування визначається як властивостями рідини, так і характеристиками поверхні [29, 30].

На адгезійні властивості істотно впливає дисперсність клеючої речовини. Найвищу дисперсність мають гідратовані сполуки клінкерних мінералів, які утворюють цементний гель. Саме цементний гель є матрицею, у якій формуються кристалізаційні контакти між старою поверхнею бетону і новою цементною композицією [29, 31].

Для утворення таких контактів важливо попередньо добре зволожити стару поверхню, щоб її пори були заповнені водою. У цей простір проникає

цементний гель, який під час твердіння кристалізується, а утворені кристали зростаються між собою і з кристалами поверхні, що забезпечує міцне зчеплення [30–32].

5.6. Технічна характеристика оптимального складу для склеювання бетонних зразків

— Склеювальною речовиною служило цементне тісто на основі портландцементу ПЦ І 500 Н [29, 30].

— Водоцементне відношення підтримувалось у межах 0,32–0,34, що забезпечувало оптимальну рухливість і активність системи [30, 31].

— Товщина шару між склеюваними елементами становила 3–5 мм.

— Поверхні бетонних зразків перед склеюванням були зволожені, що покращувало проникнення цементного тіста в пори бетону.

— Для підвищення адгезії та міцності застосовували комплексну хімічну добавку [30–32].

— До її складу входили залізонатрієві квасци в кількості 1,8 %, затравки алюмосилікатів – 0,5 %, бішофіт – 1,5 % і нітрит натрію – 0,25 % від маси цементу.

— Введення добавок прискорювало гідратацію і сприяло формуванню щільної кристалізаційної структури в зоні шва.

— Міцність з'єднання при відриві через одну добу твердіння становила 3,46–9,28 МПа.

— При подальшому твердінні показники міцності зростали.

— Міцність цементного каменю при стиску перебувала в межах 19,86–26,33 МПа.

— Отримані результати підтверджують ефективність такого складу цементного тіста для склеювання бетонних елементів і виконання ремонтних робіт [29–32].

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1. Бетонні роботи

Під час приготування, транспортування, укладання й догляду за бетоном і будівельними розчинами, виконання робіт із заготівлі та монтажу арматури, а також під час встановлення і розбирання опалубки необхідно передбачати заходи, спрямовані на захист працівників від дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників [103, 104]. До таких чинників належать розміщення робочих зон поблизу перепадів висот від 1,3 м і більше, рухомі машини та механізми і вантажі, що ними переміщуються, можливе руйнування елементів будівельних конструкцій або опалубки, підвищена температура арматури під час попереднього термонапруження, а також шум, вібрація, недостатній рівень освітлення, несприятливі погодні умови та підвищена електрична напруга, контакт з якою може бути небезпечним для людини [105, 106].

За наявності зазначених виробничих ризиків безпечно виконання бетонних робіт повинно забезпечуватися відповідно до вимог проектно-технологічної документації [103, 107]. При цьому необхідно визначати небезпечні ділянки та передбачати засоби їх позначення і огороження, застосовувати безпечні засоби механізації для приготування, подавання, транспортування й укладання бетонної суміші, а також забезпечувати розрахункову несучу здатність, міцність і стійкість опалубки з визначенням порядку її монтажу та демонтажу. Крім того, слід встановлювати послідовність виконання арматурних робіт, передбачати заходи безпеки при роботі на висоті та визначати вимоги з охорони праці під час догляду за бетоном у теплий і холодний періоди року [104, 105].

Цемент, що використовується для бетонних робіт, повинен зберігатися в силосах, бункерах, ларях або інших закритих сховищах, які унеможливають його запилення під час завантаження та розвантаження [106, 108]. Завантажувальні отвори необхідно обладнувати захисними ґратами, які мають бути надійно закріплені та зафіксовані замками.

У разі застосування пари для підігріву заповнювачів, розміщених у бункерах чи інших ємностях, слід вживати заходів для недопущення

проникнення пари в робочі приміщення [103]. Допуск працівників до камер із паровим обігрівом дозволяється лише після повного припинення подачі пари, охолодження камери та розташованих у ній матеріалів і виробів до температури не вище +40 °С. [104, 107].

6.2. Порядок виконання робіт

Перед початком виконання бетонних робіт керівник повинен:

- перевірити надійність, міцність і технічний стан риштовань, опалубних конструкцій та огорожень робочих рівнів;
- проконтролювати справність тари, бункерів, бетононасосів і вантажопідіймальних маніпуляторів;
- забезпечити працівників відповідними засобами індивідуального захисту [103, 104].

Експлуатація змішувальних машин має здійснюватися з дотриманням таких вимог:

- очищення прямиків для завантажувальних ковшів допускається лише після надійного закріплення ковша у піднятому положенні;
- очищення барабанів і корит змішувальних машин дозволяється виконувати тільки після повної зупинки обладнання та зняття електричної напруги [104, 105].

Під час заготівлі арматури необхідно:

- огорожувати ділянки, призначені для розмотування бухт і виправлення арматурних стрижнів;
- при різанні арматури на відрізки довжиною менше ніж 30 см застосовувати спеціальні пристрої, що запобігають розльоту заготовок;
- огорожувати робочі місця під час обробки стрижнів, які виходять за межі габаритів верстака, а при використанні двосторонніх верстаків додатково встановлювати поздовжню металеву захисну сітку висотою не менше ніж 1 м;
- складати заготовлену арматуру у спеціально відведених для цього місцях [103, 107].;

- закривати торці арматурних стрижнів захисними щитами у місцях загального проходу, ширина яких повинна становити не менше ніж 1,0 м;
- виконувати стропування арматурних стрижнів і каркасів під час їх переміщення вантажопідіймальними кранами лише силами стропальників;
- здійснювати складання арматурних каркасів вертикальних конструкцій (колон, стін, огорож тощо) з робочих настилів шириною не менше ніж 0,8 м, обладнаних захисними огорожами;
- дотримуватися відстані між настилами по висоті не більше ніж 2,0 м [103, 104, 107].

Під час виконання робіт на висоті необхідно дотримуватися таких вимог:

- робочі місця арматурників мають бути обладнані захисними огорожами;
- у випадках, коли встановлення огорож неможливе або кут нахилу робочої поверхні перевищує 20°, працівники повинні застосовувати запобіжні пояси та страхувальні канати, місця кріплення яких визначаються технологічними картами [104, 109].

Під час зварювання арматури в закритих приміщеннях слід виконувати такі умови:

- робочі місця зварювальників необхідно відокремлювати від суміжних зон і проходів переносними екранами (ширмами), виготовленими з негорючих матеріалів [104, 109].

Додаткові вимоги з охорони праці:

- елементи арматурних каркасів повинні формуватися у пакети з урахуванням умов їх підймання, складування та транспортування до місця монтажу;
- доступ працівників на змонтовані арматурні або арматурно-опалубні блоки до моменту їх повного та надійного закріплення забороняється [103, 104].

Вимоги безпеки під час виконання арматурних і бетонних робіт:

пересування по змонтованій арматурі дозволяється лише по спеціально влаштованих настилах шириною не менше ніж 0,6 м, закріплених на арматурному каркасі [103, 104].

арматурні випуски з плит, висота яких над рівнем бетону не перевищує 1,0 м, повинні бути захищені, зокрема шляхом застосування гофрованих пластмасових трубок [103, 107]

установлення підкладок або фіксаторів захисного шару під готові арматурні сітки необхідно виконувати із застосуванням подовжувачів [104, 107];

під час розроблення технології зведення монолітних і каркасно-монолітних будівель та споруд слід передбачати відставання зведення конструкцій сходових кліток не більше ніж на один поверх [103, 104]

способи піднімання працівників на робочі рівні повинні бути визначені у плані виробництва робіт (ПВР) [103, 106].

Опалубка

Опалубні системи, призначені для зведення вертикальних конструкцій будівель і споруд, мають бути надійно та жорстко закріплені на відповідному робочому рівні.

Опалубка повинна оснащуватися спеціальними пристроями (робочими майданчиками, драбинами тощо), які забезпечують безпечний підйом працівників до робочих позначок [103, 106, 107].

Заходи із запобігання падінню працівників і елементів опалубки під час її монтажу та демонтажу необхідно передбачати в технологічних картах виконання бетонних робіт.

Переміщення бункерів та укладання бетонної суміші

Пересування бетонних бункерів, незалежно від їх завантаженості, дозволяється лише за умови повністю зачиненого затвора [104, 107].

Під час укладання бетону з бункера відстань від його нижнього краю до вже укладеного бетону або до поверхні основи не повинна перевищувати 1,0 м, якщо інші значення не визначені планом виробництва робіт.

Подача бетонної суміші бетононасосом без налагодженого та надійного зв'язку між оператором і працівниками, які виконують укладання, не допускається.

Перед запуском бетононасоса необхідно перевірити справність замкових з'єднань бетоноводів і ввімкнути систему сигналізації.

Перед початком подавання бетонної суміші через віброхобот слід переконатися у справності всіх його елементів та надійності їх кріплення між собою і до страхувального каната.

Під час транспортування бетонної суміші бетононасосами має бути забезпечений безперешкодний доступ до стаціонарних вертикальних стояків бетоноводів.

Монтажні та демонтажні роботи з бетоноводами дозволяється виконувати лише після зниження тиску в системі до атмосферного.

Вимоги безпеки під час подавання бетону

На період продування бетоноводу всі працівники повинні бути відведені від нього на відстань не менше ніж 10 м.

Бетоноводи необхідно укладати на спеціальні прокладки для зменшення динамічних навантажень на арматурні каркаси та елементи опалубки під час подавання бетонної суміші.

Усунення пробок у бетоноводі за допомогою стисненого повітря дозволяється виключно за наявності захисного щита, встановленого на вихідному отворі бетоноводу.

Вимоги безпеки під час роботи з бетоноводами

Працівники повинні знаходитися на відстані не менш ніж 10 м від вихідного отвору бетоноводу.

Подача стисненого повітря в бетоновід має здійснюватися плавно та без перевищення встановленого допустимого тиску.

У разі неможливості усунення пробки стандартними методами необхідно:

знизити тиск у бетоноводі до атмосферного [104, 105].

шляхом простукування визначити місце утворення затору;
роз'єднати бетоновід, видалити пробку або замінити засмічену секцію трубопроводу.

Забороняється виконувати ремонтні, монтажні чи демонтажні роботи, а також перевіряти справність і замінювати швидкороз'ємні з'єднання бетоноводу під час роботи бетононасоса.

Вимоги безпеки під час улаштування та розбирання опалубки

Монтаж опалубних елементів у кілька ярусів дозволяється лише за умови, що така можливість передбачена інструкцією підприємства-виробника.

Демонтаж опалубки допускається виключно з дозволу керівника робіт після досягнення бетоном не менше 70 % проєктної міцності [103, 106, 108].

Під час розбирання опалубки необхідно забезпечити заходи, що унеможливають падіння працівників, елементів опалубки, а також руйнування або обвалення допоміжних риштувань і конструкцій.

Роботи з монтажу, демонтажу та експлуатації самопіднімальної опалубки повинні виконуватися відповідно до вимог інструкції заводу-виробника.

Під час переміщення секцій ковзної опалубки та пересувних риштувань слід обов'язково вживати організаційних і технічних заходів для забезпечення безпеки персоналу [103, 106].

Перебування сторонніх осіб, які не залучені безпосередньо до виконання цих операцій, на опалубці або риштуваннях не допускається.

Ущільнення бетонної суміші

Переміщення електровібраторів у процесі ущільнення бетонної суміші слід виконувати із застосуванням спеціальних тяг.

Під час технологічних перерв, а також при переході електровібраторів з однієї робочої позиції на іншу, вони повинні бути обов'язково вимкнені.

Забороняється використання електричних кабелів живлення вібраторів із порушеною або пошкодженою ізоляцією [104, 109].

Електропрогрівання бетону

Роботи з монтажу та підключення електрообладнання до мережі живлення дозволяється виконувати виключно електрикам, які мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III.

Ділянка електропрогрівання бетону повинна бути обладнана захисною огорожею з установленими попереджувальними написами та сигнальними лампами червоного кольору.

У разі виходу з ладу або перегорання сигнальних ламп має бути забезпечене автоматичне відключення напруги на прогрівальній ділянці.

У межах зони електропрогрівання необхідно застосовувати ізольовані гнучкі кабелі або провідники, розміщені в захисних ізоляційних шлангах.

Забороняється прокладання живильних кабелів безпосередньо по ґрунту, по шару тирси, а також експлуатація кабелів і провідників з пошкодженою ізоляцією.

Ділянка електропрогрівання бетону повинна перебувати під постійним цілодобовим наглядом електриків, відповідальних за монтаж і обслуговування електромережі [103, 110].

Безпека під час електропрогрівання бетону, свердління та експлуатації маніпуляторів

Електропрогрівання бетону

Перебування працівників у зоні електропрогрівання, а також виконання будь-яких робіт у цій зоні не допускається, за винятком робіт, що виконуються за оформленим нарядом-допуском.

Контроль температури бетону дозволяється здійснювати лише за умови повного знеструмлення прогрівальної ділянки або при напрузі, що не перевищує 25 В.

Відкрита арматура залізобетонних конструкцій, пов'язана з ділянкою електропрогрівання та не покрита бетоном, повинна бути надійно заземлена.

Після кожного переміщення електрообладнання, яке використовувалося для електропрогрівання бетону, необхідно:

провести візуальний огляд стану мережі електроживлення;
виконати інструментальне вимірювання опору ізоляції [104, 110].

Виконання бетонних робіт з рихтовань, робочих площадок та інших підмостей забороняється за таких умов: під час грози; у разі ожеледі; за наявності туману; при швидкості вітру 12 м/с і більше [103, 106, 108]

Свердління алмазними кільцевими свердлами

Під час виконання свердління технологічних отворів у бетонних і залізобетонних конструкціях для прокладання трубопроводів зона можливого падіння керна повинна бути попередньо визначена та огорожена [103, 104, 109].

Робота з гідравлічним маніпулятором на будівельному майданчику

Забороняється перебування працівників у небезпечній зоні радіусом до 4 м від розташування розподільного шланга, а також безпосередньо під стрілою-розподільником бетону.

Не допускається виконання робіт маніпулятором у межах охоронних зон діючих ліній електропередач, а також за умови наближення елементів маніпулятора (за винятком розподільного шланга) до будівельних конструкцій на відстань менше ніж 1,0 м [104, 106, 110].

Забороняється експлуатація маніпулятора за від'ємної температури зовнішнього повітря або у разі перевищення допустимої швидкості вітру, визначеної паспортом заводу-виробника.

Не дозволяється виконувати технологічні операції з гідроманіпулятором із навантаженнями та зусиллями, що не передбачені інструкцією з його експлуатації.

До роботи з маніпулятором допускаються лише працівники, які пройшли спеціальне навчання та відповідний інструктаж з питань безпечного виконання робіт [104, 106, 110].

6.3. Організація робочих місць

Вимоги безпеки під час бетонування перекриттів та виконання опалубних робіт

Під час бетонування перекриттів опалубні конструкції повинні бути обладнані захисними огорожами по всьому периметру робочої зони [103, 106, 108].

Усі технологічні отвори в робочій підлозі опалубки необхідно закривати міцними щитами.

У випадках, коли отвори мають залишатися відкритими постійно, вони повинні бути закриті металевими ґратами.

Місця встановлення опор стояків опалубки перекриттів підлягають огороженню та маркуванню заборонними знаками з пояснювальними написами; перебування або прохід людей через ці зони під час бетонування не допускається.

Перед улаштуванням збірної опалубки стін, колон, пілонів, ригелів або склепінь, розташованих на краю перекриття, у разі виконання робіт поза робочою підлогою опалубки необхідно передбачити робочі настили шириною не менше ніж 0,8 м із суцільними захисними огорожами.

Конструкція настилів та огорож повинна бути розрахована на сприйняття можливих технологічних навантажень і визначена в плані виробництва робіт.

Після демонтажу окремих елементів ковзної опалубки або підвісних риштувань торцеві частини опалубних конструкцій мають бути негайно огорожені.

Для запобігання падінню предметів зверху на працівників, що працюють на підвісних риштуваннях, по зовнішньому контуру ковзної опалубки необхідно встановлювати захисні козирки, ширина яких не повинна бути меншою за ширину риштувань [103, 106].

Вантажно-розвантажувальні роботи та операції з бетонною сумішшю

Знімні вантажозахоплювальні пристрої, стропи та тара, що застосовуються для подавання бетонної суміші за допомогою вантажопідіймальних кранів, повинні відповідати вимогам чинних нормативних документів та НПАОП 0.00-1.01 [103, 104, 106].

На ділянках виконання робіт із натягування арматури в місцях можливого проходу людей необхідно встановлювати захисні огорожі висотою не менше ніж 1,8 м [103, 107, 108].

Натяжні пристрої для арматури повинні бути обладнані сигналізацією, яка автоматично вмикається під час запуску приводу.

Забороняється перебування працівників на відстані менше ніж 1,0 м від арматурних стрижнів, що нагріваються електричним струмом.

Заготівля та складання укрупнених арматурних каркасів повинні здійснюватися виключно на спеціально відведених і обладнаних для цього майданчиках [103, 106, 107].

6.4. Заходи безпеки під час роботи з хімічними добавками та бетонною сумішшю

У процесі використання бетонних сумішей, що містять хімічні добавки, працівники повинні застосовувати засоби індивідуального захисту, зокрема захисні рукавички та захисні окуляри.

Естакади, призначені для подавання бетонної суміші автосамоскидами, мають бути оснащені відбійними брусами для запобігання з'їзду транспортних засобів.

Між відбійними брусами та захисними огорожами необхідно передбачати проходи шириною не менше ніж 0,6 м для безпечного пересування персоналу.

На естакадах тупикового типу обов'язково встановлюються поперечні відбійні бруси.

Під час очищення кузовів автосамоскидів від залишків бетонної суміші перебування працівників у кузові або на ньому не допускається [103, 106, 107].

ВИСНОВКИ

Результати досліджень зволжених балочок свідчать про дуже низьку міцність при відриву 0,2–0,85 МПа.

Причина: цементний камінь балочок має до 53% пор, що активно відсмоктують воду із цементного тіста, через що умови зчеплення різко погіршуються.

Випробування на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих поверхонь цементом М400 показали збільшення міцності при відриві до 0,6–1,75 МПа.

Причина: цементний камінь, насичений водою, має більшу міцність на розрив порівняно з попереднім експериментом.

Випробування на адгезію цементного каменю при склеюванні мокрих поверхонь цементом М500 продемонстрували суттєве збільшення міцності при відриві до 3,5–9,3 МПа.

Спостереження: міцність зростає на середньому рівні водоцементного співвідношення і не залежить від товщини шару склеювання.