

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**О. В. Кондращенко**

**ТЕХНОЛОГІЯ СУЧАСНИХ БЕТОНІВ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2025**

УДК 666.97

**Кондращенко О. В.** Технологія сучасних бетонів : конспект для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія / О. В. Кондращенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 42 с.

Автор

д-р техн. наук, проф. О. В. Кондращенко

Рецензент

**В. А. Гуркаленко**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкції (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, протокол № 17 від 18.12.2024*

Конспект лекцій складено з метою розширити професійні знання студентів щодо теоретичних основ бетонознавства, тенденцій розширення різновидів бетонів, керування їхніми властивостями та ознайомлення з досягненнями сучасних технологій їх виробництва.

© О. В. Кондращенко, 2025

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Мета і завдання дисципліни.....	5
<b>1 ОСНОВНІ ЕТАПИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ</b>	
<b>БЕТОНІВ.....</b>	<b>6</b>
1.1 Вимоги до підбору в'язучої речовини.....	6
1.2 Основні класифікаційні ознаки заповнювачів бетону.....	8
<b>2 РІЗНОВИДИ СТРУКТУРИ БЕТОНІВ ТА СПОСОБИ ЇХ</b>	
<b>ОТРИМАННЯ.....</b>	<b>11</b>
2.1 Технології одержання важких бетонів.....	11
2.2 Особливості виготовлення різновидів легких бетонів.....	14
<b>3 ВПЛИВ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОННИХ</b>	
<b>СУМІШЕЙ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ БЕТОННОГО КАМЕНЮ.....</b>	<b>16</b>
3.1 Класифікація бетонних сумішей за зручноукладальністю.....	16
3.2 Способи ущільнення бетонних сумішей.....	17
<b>4 ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРИ БЕТОНІВ ІЗ ЇХ ОСНОВНИМИ</b>	
<b>ВЛАСТИВОСТЯМИ.....</b>	<b>19</b>
4.1 Оптимізація структури бетону.....	19
4.2 Структурні критерії властивостей бетону.....	21
<b>5 ЗАКОН МІЦНОСТІ БЕТОНУ.....</b>	<b>24</b>
5.1 Класифікація пор цементного каменю та бетону.....	24
5.2 Твердіння та структуроутворення бетону.....	26
<b>6 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКАТОРІВ</b>	
<b>У ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БЕТОНІВ.....</b>	<b>28</b>
6.1 Класифікація хімічних добавок.....	28
6.2 Класифікація пластифікаторів.....	29
<b>7 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНІЗМІВ ДІЇ</b>	
<b>МОДИФІКАТОРІВ.....</b>	<b>31</b>
7.1 Порівняльна характеристика комплексних добавок.....	31
7.2 Вимоги до мінеральних добавок.....	31
<b>8 АЛЬТЕРНАТИВНІ ВИДИ В'ЯЗУЧИХ У ТЕХНОЛОГІЇ</b>	
<b>БЕТОНУ.....</b>	<b>34</b>
8.1 Безцементні бетони та їх переваги і недоліки.....	34
8.2 Застосування полімерів у складі бетонів.....	37
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>41</b>

## ВСТУП

Історія розвитку людства тісно пов'язана з розвитком технологій будівельних матеріалів. У кожному регіоні нашої планети виникали технології одержання матеріалів залежно від доступності сировини, потреб населення даної місцевості та рівню розвитку знань і навичок людей. В основному, технології виникали стихійно і були основані на спостереженнях щодо поведінки природних копалин під впливом природних факторів та явищ, які змінювали стан природних утворень. Так виникли технології одержання кераміки, скла, вапна, гіпсу тощо.

Мрією людства завжди було створення такого матеріалу, який би за властивостями не поступався природному каменю, але склад і структуру якого можна було б змінювати залежно від потреб під час застосування, тобто мати можливість керувати властивостями матеріалу. Наведені вище технології давніх матеріалів були пов'язані з процесами випалювання, тому вироби за такими технологіями повинні були мати розміри відповідно до розмірів печей. А це обмежувало можливості їх застосування. І тільки з відкриттям групи в'язучих матеріалів з'явилася можливість виробляти матеріали конгломератного типу на кшталт природного граніту. Так і з'явилися перші бетони і їх спрощений різновид – будівельний розчин.

На сьогодні найпоширенішим матеріалом у галузі будівництва є бетон.

*Бетон* – штучний камінь, одержаний унаслідок твердіння раціонально підібраної суміші з в'язучої речовини, води, великого і дрібного заповнювачів і добавок. До затвердіння суміш цих компонентів називають *бетонною сумішшю*.

Цікавим є те, що найбільш ранній бетон був виявлений археологами при розкопках у селищі Лепенскі Вір (Сербія). Його відносять до 5600 років до н. е., тобто приблизно 8000 років тому. В одній із хатин стародавнього поселення з бетону, замішаному на місцевих матеріалах (гравії та місцевому вапні), була виготовлена підлога завтовшки 25 см.

Починаючи з II ст. до н. е. бетони використовуються при будівництві фундаментів, хвилеломів і стін житлових будинків, храмів і споруд утилітарного значення. Будуються численні оборонні споруди, багатоповерхові житлові і громадські будівлі, прокладаються дороги.

Але після розпаду Римської імперії бетон перестали виготовляти. І лише у 1844 році Джонсон запатентував сучасний спосіб виробництва бетону.

### **Мета і завдання дисципліни**

Дисципліна «Технологія сучасних бетонів» ставить за мету розширення професійних знань щодо теоретичних основ бетонознавства, тенденцій розширення різновидів бетонів, керування їх властивостями та ознайомлення з досягненнями сучасних технологій їх виробництва.

Дисципліна вирішує такі завдання:

- поглибити сучасні уявлення про структурні особливості новітніх бетонів, одержаних за різними технологіями;
- аргументовано підбирати компоненти бетонів щодо умов експлуатації та нормативних документів;
- навчити оцінювати якісні показники композитних матеріалів конгломератного типу;
- обирати технологічні прийоми та параметри, що сприяють розширенню властивостей сучасних бетонів.

Лекційний курс «Технологія сучасних бетонів» поділений на три змістові модулі та складається з восьми тем, у яких вивчаються загальнометодологічні принципи сучасного бетонознавства, комплекс фізико-хімічних процесів, що визначають структуроутворення цементного каменю у бетоні. Розглядаються способи вдосконалення технології одержання сучасних бетонів з високими показниками якості підвищеної довговічності та надійності.

Лекційний курс закріплюється проведенням практичних занять і самостійною роботою здобувачів.

# 1 ОСНОВНІ ЕТАПИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БЕТОНІВ

## 1.1 Вимоги до підбору в'язучої речовини

Помітне застосування бетону відоме на території і давньоримської держави, яке почалося приблизно з кінця IV ст. до н.е. і тривало близько 700 років. Археологічні розкопки стін міста Помпеї показали, що римський бетон становив матеріал, що нагадує сучасну бутову кладку (рис. 1.1).

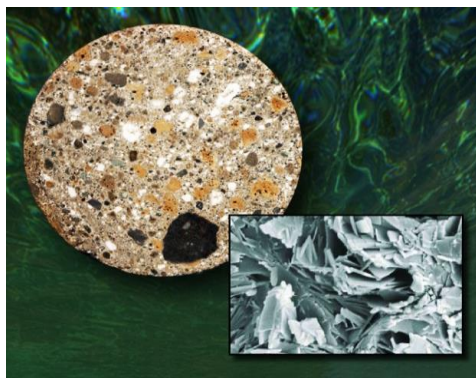


Рисунок 1.1 – Структура давньоримського бетону

(URL: [https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/antiikin-roomassa-betonia-osattiin-tehda-  
paremmin-kuin-nykypaivana/fa510b1c-9642-351c-b9ee-90149199924e](https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/antiikin-roomassa-betonia-osattiin-tehda-paremmin-kuin-nykypaivana/fa510b1c-9642-351c-b9ee-90149199924e))

Загалом, виникнення сучасного бетону тісно пов'язане з появою і розвитком промисловості мінеральних в'язучих матеріалів, особливо це стосується винаходу цементу. Популярність бетонів у сучасному будівництві обумовлена:

- економічністю (80–85 % складу становлять заповнювачі з місцевих кам'яних матеріалів), що робить їх конкурентоздатними на ринку будівельних матеріалів;
- широким діапазоном властивостей;
- можливістю створення конструкцій та виробів різноманітних форм і розмірів, структури і фактури;
- можливістю повної механізації бетонних робіт.

Одержати бетон високої якості можна тільки за таких умов:

- глибоке знання технології його приготування;
- грамотний підбір складових компонентів належної якості та в оптимальних співвідношеннях;
- дотримання оптимальних режимів приготування бетонної суміші, методів її укладання та ущільнення;
- забезпечення відповідних умов твердіння щодо виготовлення бетонних конструкцій високої міцності, довговічності й низької вартості.

У структурі бетону заповнювачі відіграють роль кам'яного каркасу, а тісто із в'язучої речовини скріплює зерна піску й щебеню, заповнює порожнечі між ними і надає бетонній суміші пластичності і рухливості. Цементне тісто в процесі твердіння зв'язує зерна заповнювачів і утворює бетон.

За видом в'язучої речовини бетони поділяють на цементні (виготовлені на портландцементі та його різновидах), гіпсові (із застосуванням гіпсоангидридових в'язучих), кислотостійкі (на рідкому склі), бетони на полімерних в'язучих матеріалах. Силікатні бетони одержують із вапна й кварцового піску з наступним твердінням виробів в автоклаві при температурі 175–200 °С і тиску 0,8–1,3 МПа.

До складових компонентів бетону залежно від його призначення й умов експлуатації висувають вимоги, які визначають його властивості, впливають на технологію виробництва виробів, на довговічність і економічність.

Найбільш поширеним в'язучим для бетонів є цемент, тому що є універсальним і має багато різновидів. Для приготування важких бетонів застосовують портландцемент, пластифікований портландцемент, портландцемент із гідравлічними добавками, шлакопортландцемент, швидкотверднучий портландцемент (БТЦ) тощо. Різновид цементу обирають із урахуванням вимог до бетону (міцності, морозостійкості, водонепроникності тощо), його призначення й умов експлуатації. Марку цементу рекомендується обирати на 10–40 % вищу, ніж міцність бетону, але для приготування легких бетонів застосовують і повітряні різновиди в'язучих матеріалів, таких як

гіпсові в'язучи та вапно. Для виготовлення спеціального кислотостійкого бетону використовують рідке скло.

## **1.2 Основні класифікаційні ознаки заповнювачів бетону**

За видом заповнювача розрізняють бетони на щільних заповнювачах, поруватих і спеціальних, які задовольняють спеціальні вимоги (захист від випромінювання, жаростійкість, хімічна стійкість тощо).

Важкі бетони виготовляють із використанням щільних природних заповнювачів, як правило, магматичного походження, а легкі – із застосуванням природних або штучних поруватих заповнювачів.

У складі бетонів або розчинів заповнювачі виконують низку важливих функцій:

- вміст заповнювачів у бетоні становить понад 80 % його об'єму і скорочує витрати цементу;
- створюють у бетоні твердий каркас, що запобігає усадці й утворенню тріщин;
- підвищують модуль пружності бетонів,
- знижують повзучість;
- високоміцний заповнювач із цементною матрицею забезпечує міцність бетону;
- поруваті заповнювачі знижують середню густину і теплопровідність бетонів;
- окремі види заповнювачів (залізна руда, чавунний дріб) надають бетонам радіаційно-захисних властивостей.

Залежно від розміру розрізняють великий заповнювач (гравій або щебінь) із розміром часток 5–70 мм і дрібний заповнювач (пісок) – розмір часток коливається в діапазоні 0,14–5 мм.

За походженням заповнювачі можуть бути природні (одержують шляхом переробки гірських порід) та штучні, що одержують за спеціальними

технологіями (керамзит, аглопорит, спучені перліт та вермікуліт) або відходи виробництв (доменні й паливні шлаки, золи тощо).

За густиною заповнювачі розподіляють на такі:

- щільні – із густиною понад 2 000 кг/м<sup>3</sup>;
- поруваті – із густиною до 2 000 кг/м<sup>3</sup>.

Придатність заповнювачів визначається їх відповідністю таким вимогам:

– співвідношення зерен різного розміру повинно забезпечити мінімальну порожнистість;

– поверхня зерен повинна мати рельєф або шорсткість для забезпечення міцного зчеплення із в'язучим;

– заповнювачі не повинні містити домішок, що перешкоджають їх адгезії до цементного тіста.

Присутність у піску пилюватих, глинистих і мулистих домішок знижує міцність і морозостійкість бетонів. У природних пісках допускається вміст пилюватих і глинистих домішок до 3 % від маси піску. Наявність у піску органічних домішок встановлюють колориметричним методом. Пробу піску обробляють розчином їдкого натрію NaOH і за зміною кольору щодо еталону визначають наявність органіки. Якщо колір розчину темніший еталону, пісок не рекомендують застосовувати як заповнювач, тому що виявлені в ньому органічні домішки будуть сповільнювати строки тужавіння і твердіння бетонів і розчинів і, таким чином, знижувати їхню міцність.

На підставі результатів ситового аналізу розраховують модуль крупності піску:

$$M_{кр} = (A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16})/100. \quad (1.1)$$

Оптимальні значення модуля крупності піску становлять  $M_{кр} = 2-2,5$ . Допустима нижня межа крупності піску –  $M_{кр} \sim 1,5$ , допустима верхня межа крупності піску –  $M_{кр} = 3,25$ .

Для крупних заповнювачів найважливішими показниками є насипна густина і міжзернова порожнистість, яка становить 40–50 %. Цей показник

можна регулювати підбором зернової суміші заповнювача. Щебінь і гравій за крупністю зерен розділяють на фракції: 5–10; 10–20; 20–40; 40–70. Вміст різних фракцій у великому заповнювачі нормується стандартом (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Вміст фракцій крупного заповнювача

Найбільша крупність великого заповнювача, мм	Вміст фракцій у великому заповнювачі, %			
	5–10	10–20	20–40	40–70
20	25–40	60–75	–	–
40	15–25	20–35	40–65	–
70	10–20	15–25	20–35	35–55

Наявність шкідливих домішок (органічні, пилюваті, глинисті) у крупному заповнювачі може бути такою самою, як і у пісках. Методи їхнього визначення аналогічні. Міцність крупного заповнювача для важких бетонів має перевищувати міцність бетону у 1,5–2 рази.

Заповнювачі для легких бетонів можуть бути природними, штучними або отриманими з відходів промисловості.

Керамзит штучний – поруватий заповнювач, який отримують шляхом випалювання глинистих гранул, що здатні до спучування. Випускають у вигляді гравію (гранули 5–40 мм) і піску (зерна менше 5 мм). Має насипну густину 120–600 кг/м<sup>3</sup> і порівняно високу міцність. Марка керамзиту встановлюється залежно від насипної густини і коливається від 250 до 600 кг/м<sup>3</sup>.

Жужельну пемзу отримують із техногенних відходів шляхом спучування розплавлених металургійних шлаків з наступним швидким охолодженням (для фіксації поруватої структури). Цей вид заповнювача економічно дуже ефективний. Міцність пемзи становить від 0,4 до 2 МПа.

Аглопорит – поруватий заповнювач у вигляді гравію або щебеню. Одержують шляхом спікання глинистої сировини і паливних відходів.

Спучений перлітовий щебінь – поруваті зерна білого кольору, одержані шляхом швидкого випалювання вулканічних склоподібних порід (перліту або обсидіану). Має насипну густину 100–500 кг/м<sup>3</sup>.

## 2 РІЗНОВИДИ СТРУКТУРИ БЕТОНІВ ТА СПОСОБИ ЇХ ОТРИМАННЯ

### 2.1 Технології одержання важких бетонів

Бетони належать до складних багатокомпонентних матеріалів, структуру яких на макрорівні можна звести до двокомпонентних. Наприклад, структуру бетону можна розглядати як систему «цементний камінь – заповнювач» або «цементнопіщаний розчин – щебінь». У свою чергу, двокомпонентні структури можна розділити на паралельно та послідовно складені. Однак на практиці найчастіше зустрічаються змішані паралельно-послідовні структури.

Існує ще один вид класифікації конгломератних двокомпонентних структур, до яких належать і бетони залежно від ступеня розсування зерен заповнювача. Відповідно до цієї класифікації структури бетонів поділяють на три групи: структура матеріалу з базальтовою цементацією, поруватою і контактною структурою.

Наприклад, у структурі бетону з базальтовою цементацією зерна заповнювача не доторкаються одне до одного, тобто контактують між собою, а ніби «плавають» у масі розчину з в'язучого і піску (рис. 2.1).

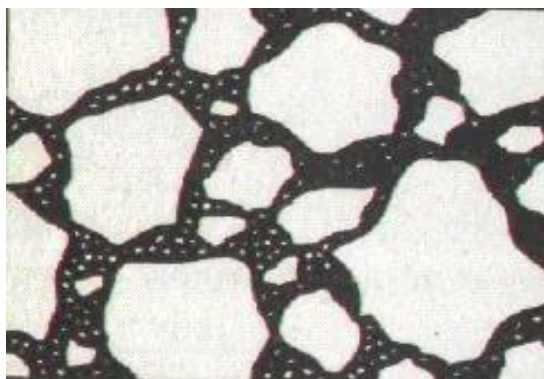


Рисунок 2.1 – Приклад структурі бетону з базальтовою цементацією

(URL: <https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/~thiele/Paper/TVAR2009jpm.pdf>)

За такої макроструктури властивості всього конгломерату переважно обумовлюються властивостями матричної частини бетону. Заповнювачі ж становлять концентратори напруги і можуть навіть погіршувати механічні властивості штучного каменю.

Другий вид, так звана «порувата» структура, утворюється в міру насичення складу зернами великого заповнювача, які становлять щільний каркас, склеєний тонким прошарком штучного або природного в'язучого. Такий різновид структури сприяє зниженню витрати в'язучого і надає матеріалам необхідних технічних властивостей.

Контактна структура характеризується максимальним насиченням матеріалу, коли в'язучого недостатньо для заповнення порожнин між зернами заповнювача і, у низці випадків, навіть для утворення суцільної оболонки на їх поверхні.

Особливістю структури багатьох будівельних матеріалів на основі мінеральних в'язучих, у тому числі і бетонів, є те, що з часом вона зазнає змін під впливом процесів, обумовлених як внутрішньою їхньою природою, так і довкіллям. Ці процеси можуть бути конструктивними, що поліпшують структуру та властивості матеріалу, або деструктивними. Зокрема, розвиток новоутворень у процесі гідратації підвищує міцність бетонів, поліпшує низку інших властивостей, однак під впливом агресивних чинників довкілля відбуваються корозійні процеси, які мають руйнівний характер. Висока довговічність матеріалу досягається шляхом формування такої його структури, коли вплив деструктивних процесів стає мінімальним. Характерним прикладом спрямованого формування такої структури є утворення в бетоні за допомогою добавок поверхнево-активних речовин повітряних пор, рівномірно розподілених у всьому об'ємі. Такі пори запобігають збільшенню тиску води, що виникає при її замерзанні, а також зменшують капілярне підсмоктування води внаслідок гідрофобізації поверхні капілярів.

Також на розвиток деструктивних процесів впливають дефекти структури матеріалів – відкриті, великі пори, тріщини тощо. Найнебезпечнішими порами є

капіляри, заповнені водою. Під час замішування бетонних сумішей у матеріал потрапляє повітря, вміст якого в бетоні може бути в кількості 3–6 %.

Крім пор, важливими структурними елементами бетону, що визначають його фізико-механічні властивості, є тріщини. У реальному матеріалі завжди є велика кількість мікротріщин, що виникають із технологічних чи експлуатаційних причин. Тріщини характеризуються довжиною, шириною розкриття, радіусом гирла, фронтом, морфологією площин, що їх утворюють. Вони можуть виникати внаслідок механічної, електрохімічної, термічної чи іншої обробки матеріалу. За походженням тріщини поділяють на силові, усадкові, температурні, корозійні. Тріщини суттєво знижують міцність матеріалів, а також можуть відкривати доступ агресивним реагентам всередину матеріалу.

Важкі бетони поділяють за призначенням на такі види:

- звичайні – для бетонних і залізобетонних несучих конструкцій будинків і споруд (колони, балки, плити тощо);
- гідротехнічні – для гребель, шлюзів, облицювання каналів та ін.;
- для стін будинків і перекриттів;
- для підлог, дорожніх покриттів і підвалин;
- спеціальні – кислототривкі, жаротривкі, для біологічного захисту;
- особливо важкі – на цементі із застосуванням спеціальних видів заповнювачів високої густини (руди, металеві стрижні або обпилювання).

У сучасних умовах в технологіях приготування важких бетонів широко використовуються хімічні модифікатори структури і властивостей, активні мінеральні ультрадисперсні компоненти і деякі інші ефективні добавки.

Окрім традиційних, звичайних важких бетонів із міцністю у діапазоні 10–50 МПа застосовують і нові ефективні види бетонів, такі як високоміцні, безусадкові (ті що розширюються і напружені бетони), самоущільнюючі бетони, особливо швидкотверднучі, спеціальні бетони на нових композиційних в'язучих (захисні, електротехнічні, антибактерицидні, жаростійкі тощо).

Найбільш повно сучасні можливості технології бетону використовуються під час створення і виробництва високоякісних, високотехнологічних бетонів (High Performance Concrete, HPC). Цей термін об'єднав багатокomпонентні бетони з високими експлуатаційними властивостями, такими як міцність, низький коефіцієнт дифузії і стирання, висока хімічна стійкість, бактерицидність тощо.

## **2.2 Особливості виготовлення різновидів легких бетонів**

Легкі бетони становлять велику групу бетонів, різних за складом, структурою і властивостями. Завдяки застосуванню легких бетонів знижується маса будівельних конструкцій і підвищуються їхні теплоізоляційні властивості.

Особливістю цієї групи бетонів є те, що вони належать до ефективних будівельних матеріалів і є універсальними, які використовують як для обгороджувальних елементів будівель, так і для несучих конструкцій житлових і промислових будівель.

Масове застосування легких бетонів розпочалося, коли налагодилося виробництво штучних поруватих заповнювачів, таких як керамзит, аглопорит, жужільна пемза тощо. З легких бетонів виготовляють більшість стінових панелей, блоків, перекриттів, покрівельних покриттів та стінових каменів.

За структурою і способом одержання поруватої структури легкі бетони розподіляють на такі види:

- бетони щільної будови на поруватих заповнювачах;
- ніздрюваті бетони, у складі яких немає крупних, а весь об'єм пронизаний дрібними сферичними порами;
- крупнопоруваті, у яких відсутній дрібний заповнювач, унаслідок чого між частками крупного заповнювача утворюються порожнини.

Особливості технології легких бетонів пов'язані зі специфікою поруватих заповнювачів: їхня густина менша, ніж густина води, поверхня часток шорсткувата, вони активно поглинають воду.

Для того щоб забезпечити рівномірне перемішування й однорідність структури для приготування бетонних сумішей легких бетонів, використовують змішувачі примусового перемішування.

У легких бетонах на поруватих заповнювачах контактна зона між цементним каменем і заповнювачем набуває високої щільності і міцності, що підвищує водонепроникність і міцність цих матеріалів. Міцність легких бетонів також залежить від якості заповнювачів, марки і кількості цементу. При цьому можна змінити і густину бетону шляхом поризації цементного каменю.

Позитивним є і те, що легкі бетони мають низьку теплопровідність, яка залежить від густини й вологості матеріалу (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Середні значення теплопровідності легких бетонів

Види бетонів	Теплопровідність, Вт/(м·°С), за середньої густини бетону, кг/м <sup>3</sup>						
	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800
Керамзитобетон	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Перлітобетон	0,15	0,22	0,28	0,35	0,4	0,45	0,55
Шлакопемзобетон	–	–	–	0,35	0,4	0,5	0,6

Легкі бетони з поризованою матрицею належать до ніздрюватих бетонів, структура яких на 60–85 % (за об'ємом) складається із замкнутих пор. Ніздрюваті бетони одержують із суміші в'язучого, кремнеземистого компоненту і води. Потім суміш спучують спеціальними добавками – пороутворювачами. Для швидкої фіксації поруватої структури ніздрюватих бетонів проводять тепловологісну обробку, під час якої процеси твердіння активуються. До тепловологісної обробки належать пропарювання ( $T = 85\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) або обробка у автоклавах при температурі  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  і тиску 0,8 МПа. Після автоклавної обробки бетони збільшують міцність у 10 разів.

За способом утворення поруватої структури розрізняють газобетони, газосилікати; пінобетони і піносилікати.

## 3 ВПЛИВ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ БЕТОННОГО КАМЕНЮ

### 3.1 Класифікація бетонних сумішей за зручноукладальністю

Технологія виготовлення бетонних виробів та конструкцій здійснюється в такій послідовності: підбір складу бетону; приготування і транспортування бетонної суміші; її укладання і ущільнення бетону; забезпечення необхідного режиму затвердіння бетону.

Розроблений склад бетону повинен забезпечити задані властивості за мінімальної вартості бетону. Для проєктування складу бетону певного призначення необхідно задати такі вихідні дані:

- потрібний клас бетону за міцністю;
- необхідна рухливість бетонної суміші;
- вид і активність цементу;
- істинна й насипна густина усіх вихідних компонентів;
- зерновий склад і порожнистість заповнювачів.

Основною властивістю бетонної суміші є зручноукладальність, яку залежно від її консистенції оцінюють за рухливістю або жорсткістю (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Класифікація бетонних сумішей за зручноукладальністю та жорсткістю

Марка за зручноукладальністю та жорсткістю	Норма зручноукладальності (за показником)	
	жорсткість, с	рухливість, см
Ж 4	31 і більше	–
Ж 3	21–30	–
Ж 2	11–20	–
Ж 1	5–10	–
П 1	1–4	4 і менше
П 2	–	5–9
П 3	–	10–15
П 4	–	16 і більше

Рухливість характеризується осіданням стандартного конуса,

відформованого з бетонної суміші, коли металеву форму-конус знімають (вимірюють у сантиметрах). Жорсткість – характеристика зручноукладальності таких бетонних сумішей, у яких не спостерігається осадка конусу, тобто  $OK = 0$ .

Не менш важливою характеристикою бетонних сумішей є тиксотропія (здатність самоструктурувальних систем розріджуватися під час механічного впливу і знову густнути у разі припинення цього впливу). Такі технологічні операції, як перемішування, вібрація або стряхування, зменшують сили тертя і зчеплення між частками і бетонна суміш стає більш плинною.

Треба також не допускати розшарування бетонної суміші в процесі укладання, ущільнення або транспортування. У випадку розшарування бетонної суміші бетон втрачає однорідність, унаслідок чого знижується його міцність і морозостійкість.

### **3.2 Способи ущільнення бетонних сумішей**

Якість і довговічність бетонних виробів і конструкцій безпосередньо залежить від правильності укладання бетонної суміші. Вибір методу укладання й ущільнення визначаються, по-перше, видом бетону (важкий чи легкий) та видом бетонної суміші (пластична чи жорстка), по друге, – типом конструкції.

Укладання повинне забезпечувати максимальну щільність структури бетону (відсутність порожнин) і однорідність по перетину конструкції. Пластичні текучі суміші ущільнюються під дією власної ваги чи шляхом штикування, жорсткі потребують механічного вібрування.

Спосіб вібрування забезпечує найбільш ефективно укладання, що базується на тиксотропних властивостях бетонної суміші. У разі недостатнього часу вібрування бетонна суміш ущільнюється не повністю, а в разі занадто великого вона може розшаруватися, тому що важкі компоненти (щебінь і пісок) опиняються знизу, а вода виступає зверху.

Залежно від виду і форми бетонованої конструкції застосовують різні

типи вібраторів. Для бетонування конструкцій великої площі і невеликої товщини використовують поверхневі вібратори, для масивних елементів значної товщини – глибинні вібратори. А у заводських умовах для виготовлення великих блоків, панелей та інших виробів використовують вібромайданчики, на які встановлюють форми з бетонною сумішшю.

## **4 ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРИ БЕТОНІВ З ЇХНІМИ ОСНОВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

### **4.1 Оптимізація структури бетону**

Прогрес у галузі будівельного матеріалознавства значною мірою обумовлений активним впливом на процеси структуроутворення та розширення діапазону властивостей сучасних будівельних матеріалів, тобто знання закономірностей формування структури матеріалів відкриває можливості спрямованого регулювання їх властивостей. До таких впливів можна віднести підбір оптимальних складів композицій, оптимізацію технологічних параметрів та введення ефективних добавок.

Відомо, що для забезпечення високої довговічності будівельних об'єктів необхідно приділити особливу увагу первинному корозійному захисту, до якого можна віднести підвищення міцності матеріалів та вимоги до вихідних компонентів. Досягають такої мети за допомогою різних технологічних прийомів шляхом спрямованого управління процесами структуроутворення на різних стадіях твердіння та формування структури.

Раціональний підбір компонентів бетонної суміші є найбільш доступним та дешевим способом підвищення міцності бетону. При цьому до вихідних компонентів висуваються підвищені вимоги та жорстке дотримання правильного режиму догляду за бетоном під час його твердіння. Якщо дотримуватися такого підходу, можна отримати бетони з міцністю до 140 МПа і вище при мінімальній витраті цементу. Визначальним є і правильний вибір виду цементу.

Щодо піклування про бетон у процесі твердіння, то це особливо важливо в перші 10–15 діб твердіння, коли бетон інтенсивно набуває міцності. Зростання міцності бетону відбувається в звичайних умовах за температури 15–25 °С і постійної вологості.

Щоб захистити поверхню бетону від висихання влітку, її періодично

зволожують або укривають, наприклад, піском, тирсою, полімерними плівками чи бітумними або полімерними емульсіями. У зимовий період бетон, що твердне, оберігають від замерзання за допомогою різних методів: метод термоса (підігріту бетонну суміш захищають теплоізоляційними матеріалами), підігрів бетону (зокрема електропрогрівом) тощо (рис. 4.1).

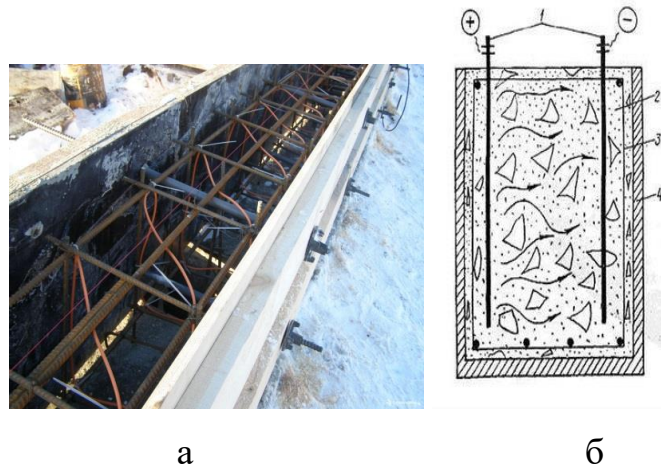


Рисунок 4.1 – Електропрогрівання бетону взимку:

а – прогрівання в реальних умовах; б – схема електропрогрівання

(URL: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=EQNoedjVef8>)

В умовах спеціалізованих підприємств для активізація процесу твердіння бетону застосовують тепловологісну обробку, що забезпечує прогрів насиченою парою за температури 85–90 °С і 100 % вологості. При цьому час твердіння виробів до набирання ними відпускної міцності (70–80 % від марочної) скорочується до 10–16 год. Наприклад, при твердінні в природних умовах для цього потрібно 10–15 діб.

## 4.2 Структурні критерії властивостей бетону

Структура бетону, як правило, є ізотропною і неоднорідною, що суттєво впливає на сумарні властивості матеріалу. Значний вплив на властивості матеріалу мають розмір зерен та пор або інших структурних елементів.

Матеріали зернистої структури найбільш проникні і характеризуються найбільшим водопоглинанням. Важким бетонам властива щільна структура, легким конструктивним – щільна структура з поруватими включеннями. Поруваті бетони мають порувату структуру, крупнопоруваті – зернисту. Наприклад, у щільній структурі важкого бетону цементний камінь має значну кількість пор, у щільній структурі легкого бетону пори спостерігаються не тільки у заповнювачах, а й у цементному камені. Також можуть відрізнятися за властивостями цементний камінь; заповнювач та окремі зерна заповнювача один від одного; окремі мікрооб'єми цементного каменю. Прикладом може слугувати зміна властивостей цементного каменю у контактній зоні. Сама контактна зона також є неоднорідною, у ній містяться дефектні місця, зерна, що не прореагували, мікротріщини та інші елементи, що знижують однорідність матеріалу.

Після заповнення бетонною сумішшю форм чи опалубки відбувається процес тужавіння. Його тривалість може бути змінена добавками, технологією та зовнішнім середовищем. Процес набору необхідної міцності бетону становить 28 днів, але твердіння цементу не припиняється і триває роками.

У продуктах гідратації цементу присутня хімічно зв'язана вода, але, окрім гідратних новоутворень, залишається частина зерен цементу, що не прореагували з водою. З часом їх кількість зменшується. Наприклад, зерна цементу розміром до 5 мкм майже повністю гідратуються протягом 1–3 діб, а до 10 мкм – через місяць.

Взаємодія цементу з водою супроводжується зменшенням об'єму системи цемент-вода порівняно з обсягом вихідних матеріалів (контракцією). В середньому контракція цементів становить 5–7 мл на 100 г. На величину

контракції впливають мінералогічний склад цементу, тонкість помелу та В/Ц співвідношення. При збільшенні В/Ц від 0,25 до 0,8 величина контракції збільшується вдвічі.

Структура, що утворилася спочатку, є дуже пухкою, але поступово вона ущільнюється, об'єм пор і їх розміри зменшуються, збільшується кількість контактів між гідратними новоутвореннями, потовщуються і ущільнюються гелеві оболонки на зернах цементу, що зростаються в суцільний цементний гель. У результаті зростає міцність цементного каменю (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Схема формування структури цементного каменю

(URL: <https://studik.net/tverdenie-portlandcementa/>)

Затверділий цементний камінь є мікроскопічно неоднорідною системою, що складається з кристалічних зрощень і гелеподібних мас, що мають частинки колоїдних розмірів (приблизно  $10^{-7}$ м). Таким чином, підбираючи мінералогічний склад клінкеру та отримуючи необхідний склад цементу, що дає при твердінні або кристалічні зрощення, або гелеву складову, можна впливати на структуру та фізико-механічні властивості цементного каменю, а отже, і бетону.

На структуру бетону поруватість цементного каменю має значний вплив, що пов'язано з кількістю води замішування під час приготування бетонної суміші. Для забезпечення необхідної легкоукладальності вміст води збільшують у 2–3 рази порівняно з тим, що потрібний для реакції з цементом. Отже, більша частина води замішування не зв'язується з цементом і залишається у вільному стані, що призводить до утворення в затверділому камені безлічі дрібних пор. Тому для одержання щільної структури цементного

каменю необхідно застосовувати бетонні суміші з мінімальним вмістом води. Як результат, підвищуються міцність та морозостійкість бетону.

Наявність у структурі цементного каменю пор і гелеподібної речовини призводить до виникнення вологісних деформацій, таких як набухання або усадка. Знакозмінні стискаючі і розтягуючі напруги, спричинені змінами вологості навколишнього середовища, порушують структуру цементного каменю і знижують міцність бетону. Ступінь вологих деформацій залежить від співвідношення кристалічних та гелеподібних фаз у цементному камені. Зі збільшенням кристалічної фази повітростійкість каменю підвищується.

Окрім пор гелю, зберігаються більші за розміром капілярні пори, що утворилися під час приготування цементного тіста. У процесі гідратації відбувається поступовий перерозподіл рідкої фази, при цьому зменшується кількість вільної води і збільшується кількість зв'язаної води, а розміри та об'єм пор зменшуються.

За даними наукових досліджень загальна кількість зв'язаної води під час повної гідратації цементу становить у середньому 50 % від маси цементу. Отже, якщо в процесі твердіння бетону немає доступу води ззовні, то для повної гідратації цементу необхідно, щоб співвідношення вода-цемент (В/Ц) було більше ніж 0,5. Якщо цементний камінь твердне у воді, то повна гідратація цементу відбувається і при менших В/Ц (наприклад,  $V/C > 0,38$ ), оскільки вода може вбиратися через капілярні та контракційні пори, що частково втрачають воду внаслідок гідратації. Однак необхідно, щоб об'єм цих пор був достатній для розміщення продуктів гідратації. При менших В/Ц повна гідратація цементу за будь-якого твердіння неможлива.

Отже, при  $V/C > 0,5$  в бетоні завжди будуть капілярні пори, доступні для міграції вологи, і його стійкість буде знижуватися. Таким чином, структура та властивості бетону можуть коливатися в незначних межах у різних виробках та зразках, навіть виготовлених з одного і того самого складу.

## 5 ЗАКОН МІЦНОСТІ БЕТОНУ

### 5.1 Класифікація пор цементного каменю та бетону

Під час розрахування складу бетону враховується необхідність досягнення повної або часткової міцності у строки, які відповідають графіку проведення будівельних робіт. Залежність міцності бетону через 28 діб затвердіння була запропонована І. Боломеєм (Швейцарія):

$$R_b = A \cdot R_c \cdot (C/V \pm 0,5), \quad (5.1)$$

де  $R_c$  – активність (марка) цементу, кг/см<sup>2</sup>;  $C/V$  – співвідношення цементу й води;  $A$  – коефіцієнт, що залежить від якості заповнювачів.

Для забезпечення необхідної міцності бетону основними факторами є активність цементу й водо-цементне співвідношення. Цементи високої активності дають більш міцні бетони, але за однакової активності цементу можна одержати бетон різної міцності залежно від змінювання кількості води в суміші:

$$V/C > 0,4 \quad (V/C < 2,5), \quad R_b = A R (C/V - 0,5), \quad (5.1)$$

$$V/C < 0,4 \quad (C/V > 2,5), \quad R_b = A_1 R (C/V + 0,5), \quad (5.2)$$

де  $A$ ,  $A_1$  – коефіцієнти, що залежать від якості матеріалів, насамперед заповнювачів.

До високоякісних заповнювачів належать щебінь із щільних гірських порід високої міцності та пісок оптимальної крупності. Заповнювачі мають бути чисті, промиті, фракційовані, з оптимальним зерновим складом суміші фракцій. Портландцемент має бути високої активності без добавок або з мінімальною кількістю гідравлічної добавки.

До звичайних матеріалів належать заповнювачі середньої якості, у тому числі гравій, портландцемент середньої активності або високомарочний

шлакопортландцемент.

До компонентів бетону зниженої якості належать крупні заповнювачі низької міцності й дрібні піски та цементи низької активності.

Витрати води визначають виходячи із заданої зручноукладальності (рухливості або жорсткості) бетонної суміші.

Руйнування бетону починається з контактного шару, тому погіршення його властивостей, наприклад, після заморожування та відтавання, різко підвищує ймовірність розриву по дефектних місцях і знижує міцність бетону.

Руйнування бетону обумовлене зародженням, формуванням та розповсюдженням мікротріщин.

Кількість і вид технологічних тріщин впливають на фізико-механічні властивості матеріалу, кінетику розвитку експлуатаційних тріщин, несучу здатність конструкцій та характер їх руйнувань. Самоусунення технологічних тріщин можливе завдяки утворенню продуктів гідратації, оптимізації технологічних процесів або введенню модифікаторів структури.

Зниження капілярної поруватості веде до підвищення міцності бетону та його корозійної стійкості, тому на виробництві намагаються виготовляти бетонну суміш із мінімальною витратою води, допустимою за умов формування конструкції або виробу. У процесі твердіння відбувається зміна поруватості бетону:

- загальна поруватість;
- контракційна поруватість;
- поруватість гелю;
- капілярна поруватість.

У складі бетону цементний камінь займає лише частину об'єму, решта – заповнювачі. Під час змінювання витрати цементу та води також буде змінюватися і поруватість. Сам цементний камінь також пронизаний порами розміром від 0,1 до 100 нм. Існує така класифікація пор: макропори (100 нм), мезопори (1,6–100 нм), мікропори, гелеві пори (0,6–1,6 нм) та ультрамалі і міжкристалічні пори (< 0,6 нм). Зазначені пори мають різне походження.

Найменші з них – внутрішньокристалічні. Пори утворюються також між окремими кристалами та кристалічними скупченнями, включаючи мікротріщини. Також у цементному камені є капілярні пори, утворені зайвою водою (0,1–1 мкм) та пори, утворені залученим повітрям (> 0,05 мм).

Загальна поруватість цементного каменю змінюється від 25 до 50 % і залежить, в основному, від водоцементного співвідношення (В/Ц).

## 5.2 Твердіння та структуроутворення бетону

Чинники, що впливають на міцність бетону можна поділити на дві групи. Одна група об'єднує фактори, що впливають на щільність цементного каменю та бетону. До них належать активність цементу, тонкість його помелу, величина В/Ц, температурно-вологісні умови твердіння, вік бетону, хімічні добавки, ступінь ущільнення бетонної суміші тощо.

Інша група об'єднує фактори, що визначають адгезію цементного каменю до заповнювачів. Це форма, розміри і рельєф заповнювачів; вміст шкідливих домішок (забруднювачів) у заповнювачах; адгезійна здатність; температурні, вологісні та усадочні напруги, відмінність коефіцієнтів поперечних деформацій компонентів бетону та ін.

До факторів, що впливають на міцність бетону найбільше, можна віднести температурно-вологісні умови його твердіння. Міцність бетону під час теплової обробки залежить від такого:

- її режиму;
- активності цементу;
- Ц/В співвідношення.

Швидкість твердіння бетону залежить від багатьох факторів:

- дрібності помелу цементу;
- мінералогічного складу цементу;
- В/Ц співвідношення;
- виду та дозування добавок та ін.

Ефективним технологічним прийомом регулювання міцності бетонів при  $V/C = \text{const}$  є введення в бетонну суміш добавок, що пришвидшують твердіння, а при знижених температурах – протиморозних добавок.

Для збільшення міцності бетону необхідно забезпечувати правильний догляд за вологим режимом твердіння бетону. На значенні показників міцності бетону позначаються також особливості випробувальних машин; умови, в яких проводять випробування; форма та розміри зразків. Показники міцності збільшуються зі зменшенням розміру зразків, що пов'язано зі зменшенням імовірності появи небезпечних дефектів. Також великий вплив мають швидкість і рівномірність навантаження зразків.

Неоднорідність структури бетону обумовлює неоднорідність міцності бетону за об'ємом. На початковому етапі частинки цементу кристалізуються і скріплюють заповнювач, але ці сполуки ще крихкі і легко руйнуються при найменших механічних впливах або зрушеннях, а суміш втрачає здатність до подальшого твердіння (не допоможе і повторне заливання водою).

За перші 7 днів цементний камінь набирає близько 70 % всієї своєї міцності, потім процес твердіння сповільнюється і за наступні три тижні він набуває ще близько 20–25 % міцності.

Бетон повинен затвердіти, а не висохнути. У цьому весь сенс. Якщо волога і бетон випаровується або замерзає, процес набору міцності зупиняється.

Розуміння перебігу стадій процесу гідратації дозволяє вченим розробляти нові добавки до цементу або бетону, що так чи інакше впливає на процеси, що відбуваються.

## **6 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКАТОРІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БЕТОНІВ**

### **6.1 Класифікація хімічних добавок**

Модифікування бетону можливе під час керування процесами його структуроутворення на різних стадіях твердіння і формування структури, що забезпечує задані властивості. Комплекс технологічних засобів модифікування бетону дуже широкий. Потребу у спрямованому управлінні структурою штучних каменів визначають різні чинники:

- технологічні – пришвидшене проведення будівельних робіт, поліпшення зручноукладальності тощо;
- експлуатаційні – підвищення щільності структури, міцності, водонепроникності, теплоізоляційні властивості;
- кліматичні – надання морозостійкості, забезпечення швидкого твердіння складів у зимовий період та уповільнення у спекотний період;
- економічні – зниження витрати цементу у бетонах.

За різновидом дії добавки поділяють на хімічні та механічні.

Хімічні добавки можуть бути мінерального або органічного походження, а також їх поєднання. Їх додають до бетонної суміші у невеликій кількості – від тисячної частки відсотків до декількох відсотків – і ототожнюють із терміном «модифікатори», тобто такими речовинами, які регулюють технологічні властивості бетонної суміші та суттєво поліпшують будівельно-технічні властивості бетону.

Існує декілька систем класифікації добавок-модифікаторів до бетону: за хімічним складом, за механізмом їх дії, за основним технологічним ефектом.

Найбільш зручною класифікацією добавок вважається класифікація за механізмом їх дії. Вона розділяє добавки на 4 класи:

1. Електроліти, що змінюють розчинність в'язучих речовин.

2. Реагують із в'язучими речовинами з утворенням важкорозчинних або малодисоційованих сполук.

3. Готові центри кристалізації (кристалічні затравки).

4. Органічні поверхнево-активні речовини.

## 6.2 Класифікація пластифікаторів

Достатньо поширеною серед фахівців є класифікація добавок за основним ефектом їх дії. Така класифікація пропонує виокремлювати 6 класів добавок-модифікаторів: 1-й – регулятори реологічних властивостей; 2-й – регулятори тужавіння та твердіння бетонної суміші; 3-й – регулятори поруватості бетону; 4-й – що надають бетону спеціальних властивостей (гідрофобні, електропровідні, біоцидні тощо); 5-й – порошки – замітники цементу; 6-й – поліфункціональні модифікатори.

У технології бетону найбільшого поширення набули добавки 1-го класу – пластифікатори, що поліпшують рухливість бетонної суміші без збільшення водовмісту. Ці добавки збільшують рухливість бетонної суміші без зниження міцності бетону. Їх ділять на IV категорії (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Класифікація пластифікаторів

Категорія	Найменування	Збільшення ОК з 2–4, см	Зменшення кількості води, %
I	Суперпластифікатори	до 20 і більше	не менше 20
II	Пластифікатори	14–19	не менше 10
III	Пластифікатори	9–13	не менше 5
IV	Пластифікатори	8 і менше	менше 5

Суперпластифікатори (СП) почали застосовувати у виробництві бетону на початку 70-х років ХХ ст. Завдяки їм стали отримувати литі бетони з осадкою конусу (ОК) більше ніж на 20 см при помірному водовмісті, у тому числі високоміцні бетони на звичайних портландцементях і заповнювачах, що

характеризуються низькою проникністю і високою стійкістю до зовнішніх впливів.

Введення СП на сьогодні є обов'язковою умовою виробництва високоякісних, високотехнологічних бетонів. Такі бетони мають міцність під час стиску у віці двох діб – 30–50 МПа, а у віці 28 діб – 60–150 МПа. Водночас морозостійкість таких бетонів становить F 600 і більше, водонепроникність – W 12 і вище, водопоглинання – менше 1–2 %, стираність – практично як у природного граніту (трохи більше 0,3–0,4 г/см<sup>2</sup>). Також їм властиві регульовані показники деформативності, зокрема з компенсацією усадки у віці 14–28 діб природного твердіння.

З'явилися також нові високоміцні безвібраційні бетони. Їхньою особливістю є висока рухливість на початковій стадії твердіння, що досягається шляхом додавання суперпластифікатора та спеціальних мінеральних і хімічних добавок. Такі бетонні суміші під дією власної маси повністю заповнюють простір опалубки, зокрема й між арматурними стрижнями. Базові реологічні властивості таких бетонів можна забезпечити завдяки ретельному підбору вихідних матеріалів і їхніх пропорцій.

Самоущільнювальні бетони тривалий час зберігають свої реологічні і технологічні функції на стадіях перемішування, транспортування, формування та тверднення.

## **7 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНІЗМІВ ДІЇ МОДИФІКАТОРІВ**

### **7.1 Порівняльна характеристика комплексних добавок**

Якщо виникає необхідність посилити технологічний ефект добавки і зменшити її небажану дію, то застосовують комплексні (поліфункціональні) добавки. Комплексні добавки поділяють на дві категорії. Перша представлена сумішами добавок, що належать до одного класу, а друга – до різних класів.

Усі комплексні або поліфункціональні модифікатори (ПФМ) також ділять на три групи: I – суміші електролітів; II – суміші поверхнево-активних речовин (ПАР); III – суміші електролітів та ПАР.

Поліфункціональні модифікатори I групи дозволяють регулювати терміни тужавіння, темпи твердіння, захисні властивості бетону щодо арматури. Такі поліфункціональні модифікатори застосовують під час бетонних робіт в зимовий період.

Поліфункціональні модифікатори II групи застосовують для посилення пластифікуючого ефекту, додаткового повітровтягнення або газовиділення, гідрофобізації, економії вартісних суперпластифікаторів.

Поліфункціональні модифікатори III групи надають комплексний ефект пластифікації та регулюванню темпу твердіння бетону й інших його технічних властивостей.

При отриманні поліфункціональних модифікаторів, окрім можливого адитивного впливу окремих компонентів, необхідно враховувати можливість хімічної взаємодії між ними, перебіг коагуляційних процесів.

### **7.2 Вимоги до мінеральних добавок**

У сучасному бетонознавстві приділяють велику увагу мінеральним добавкам. Мінеральними добавками прийнято називати тонкодисперсні

порошки з мінеральних матеріалів, що додають до бетонних сумішей зазвичай у кількості більше ніж 5 % для поліпшення або надання бетонам спеціальних властивостей. За походженням добавки цього типу бувають як природними, так і техногенними. Мінеральні добавки прийнято розділяти залежно від їхньої пуцоланової активності на інертні та активні. У групу активних добавок (пуцолан) належать матеріали, здатні вступати при нормальній температурі в хімічну реакцію з  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , із утворенням сполук, що мають в'язучі властивості. При твердінні бетонів джерелом гідроксиду кальцію є клінкерні мінерали цементу, що піддаються гідролізу при дії води.

Існують також і самоцементуючі матеріали (висококальцієві шлаки і золи), що містять значну кількість оксиду кальцію порівняно з кислотними оксидами. Такі матеріали іноді називають активними гідравлічними добавками, тому що вони здатні тверднути у водному середовищі. Для підвищення в'язучого потенціалу таких добавок необхідно додавати деяку кількість вапна або портландцементу.

Класифікація активних мінеральних добавок (у Європі і США) ґрунтується на їхній активності та хіміко-мінералогічному складі.

Цементний камінь вчені порівнюють із «мікробетоном». Значна частина цементних зерен гідратується не повністю та виконує роль своєрідних наповнювачів цементного каменю. Глибина гідратації окремих клінкерних мінералів теж неоднакова і, як показують дослідження, навіть через півроку (6 міс.) не перевищує для найбільш активного мінералу  $\text{C}_3\text{S}$  – 15 мкм, а для найменш активного –  $\text{C}_2\text{S}$  – 2,7 мкм.

Однак крім «природних» наповнювачів, якими слугують ядра клінкерних частинок, у цементі і бетонні суміші можна вводити і «штучні» наповнювачі – тонкомелені, практично нерозчинні у воді неорганічні речовини, що складаються з частинок розміром менше ніж 150 мкм. Як наповнювачі для бетонів, застосовують тонкомелені кварцові піски, карбонатні матеріали, доменні та паливні шлаки та ін. Наприклад, відходи або напівпродукти різних

виробництв зола-винос, мікрокремнезем (відходи виробництва феросплавів) надходять вже безпосередньо у високодисперсному стані.

Деякі наповнювачі можуть вступати в хімічну взаємодію з продуктами гідратації цементу (золи, шлаки, мікрокремнезем) або інші – не вступати (кварцовий пісок), проте в обох випадках вони є активними компонентами цементних систем, що твердіють.

Збільшення площі питомої поверхні наповнювача (тобто зменшення радіусу зерен) може значно підвищити ймовірність зародження нової фази. При оптимальній концентрації та дисперсності наповнювача утворюється дрібнозерниста структура в'язучого, що сприятливо відображається на технічних властивостях штучного каменю.

При введенні наповнювача в систему «цемент – вода» швидкість твердіння і міцність зростають доти, доки всі зерна наповнювача залишаються оточеними продуктами гідратації. Для кремнеземистих частинок ступінь наповнення можна визначити за кількістю СаО, яка може зв'язати 1 г наповнювача. Ступінь наповнення, розрахована таким чином, коливається від 5 до 10 % маси цементу. При надлишку наповнювача з високою дисперсністю виникають ділянки самонапруження, що, у міру зростання кристалів, може призвести до утворення тріщин та інших порушень однорідності мікроструктури (корозії).

Наповнювачі вирішують такі завдання:

- 1) забезпечують високу адгезійну міцність між в'язучим і заповнювачем;
- 2) поліпшують когезійну міцність зв'язуючого.

При цьому ступінь наповнення системи має бути таким, щоб на початковій стадії формування структури були забезпечені задані реологічні параметри суміші. У відомих дослідках було показано, що зменшення міжзернових відстаней у розчинах на кварцовому піску з 210 до 30 мкм дозволяє в 1,5–2 рази збільшити мікротвердість цементного каменю, що зв'язує зерна заповнювача.

## 8 АЛЬТЕРНАТИВНІ ВИДИ В'ЯЖУЧИХ У ТЕХНОЛОГІЇ БЕТОНУ

### 8.1 Безцементні бетони та їх переваги і недоліки

За видом в'язучої речовини бетони бувають не тільки цементні або виготовлені на його різновидах, а також гіпсові – із застосуванням гіпсоангідридових в'язучих; силікатні – на вапняному в'язучому; кислотостійкі на рідкому склі; бетони на полімерних в'язучих матеріалах.

Серед безцементних бетонів найбільш розвинутою є силікатна промисловість. Основними вихідними компонентами в цих матеріалах є повітряне вапно і кварцовий пісок. На швидкість реакції і кінетику формування структури силікатного бетону впливає розчинність компонентів вапняно-піщаної суміші, що, у свою чергу, визначається їхнім хімічним і мінералогічним складом та дисперсністю. Реакційна здатність вапна залежить від вмісту активного оксиду кальцію, розміру його кристалів і наявності MgO. Також суттєво впливає мікроструктура карбонатних порід.

Міцність, густина і довговічність силікатного бетону будуть вищими, якщо гашення вапна відбувається в умовах «кипілкової» схеми, тому що утворюються частинки з більшою дисперсністю. Кращу макроструктуру і вищі фізико-механічні властивості мають бетони, які виготовлені з піску із мінімальним об'ємом порожнистості. Однак вапняно-піщану суміш можна замінити вапняно-шлаковим або попільним в'язучим, але зі значно меншою активністю. При цьому досягається зменшення кількості вапна у суміші приблизно у 2–3 рази. Аналогічний ефект можна одержати шляхом заміни частки вапна іншими висококальцієвими відходами, наприклад білітовим шламом.

Морозостійкість силікатних бетонів здебільшого визначається структурою порового простору. Силікатний бетон, який був ущільнений вібруванням, зазвичай має морозостійкість 50–100 циклів. Зниження

формування вологості морозостійкості можна довести до 150–300 циклів. Також цьому сприяють повітровтягувальні добавки.

Шлаки та золи займають одне з перших місць серед промислових відходів. Шлакові та зольні бетони можна виготовляти на основі вапняно-шлакових та вапняно-зольних в'язучих, гіпсо-шлакових, сульфатно-шлакових та шлакових безклінкерних цементів.

Металургійні шлаки поділяють на шлаки чорної та кольорової металургії. Залежно від різновиду процесу та типу печей шлаки чорної металургії розділяють на доменні, сталеплавильні (мартенівські, конвертерні, безсемерівські та томасівські, електроплавильні), виробництва феросплавів, ваграночні шлаки. Найбільшим є вихід доменних шлаків: на 1 т чавуну він становить 0,6–0,7 т. При виплавці сталі вихід шлаків на 1 т значно менший: при мартенівському способі – 0,2–0,3; безсемерівському та томасівському – 0,1–0,2; при виплавці сталі в електропечах – 0,1–0,4.

Хімічний склад доменних шлаків представлений, в основному, чотирма оксидами: CaO (29–30 %), MgO (0–18%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5–23 %) та SiO<sub>2</sub> (30–40 %). У невеликій кількості в них містяться оксиди заліза (0,2–0,6 %) і марганцю (0,3–1 %), а також сірки (0,5–3,1 %).

Для оцінки шлаків, як сировини, для будівельних матеріалів важливою характеристикою є їхній хімічний склад, який виражається через модуль основності (відсоткове співвідношення в них основних та кислотних оксидів):

$$M_o = (\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3). \quad (8.1)$$

При  $M_o > 1$  шлаки належать до основних, при  $M_o < 1$  – до кислих.

Практично у всіх металургійних шлаках у тій чи іншій кількості міститься як кристалізаційна, так і частково склоподібна фаза. У відвальних основних шлаках, які охолоджуються повільно, кількість скла є незначною, а у гранульованих доменних може досягати 98 %. І хоча скло є термодинамічно нестійкою фазою, воно значною мірою визначає хімічну активність шлаків. Склофаза взаємодіє із водою значно інтенсивніше, ніж кристали мінералів. З

усіх видів металургійних шлаків у виробництві будівельних матеріалів, у тому числі в'язучих і бетонів, найбільш широко застосовуються доменні шлаки, що обумовлено їх провідним положенням у загальному балансі шлаків, а також близькістю їх складу до цементних сумішей, здатністю при швидкому охолодженні набувати гідравлічної активності.

Порівняно із золою у шлаках практично відсутнє незгоріле паливо, тому що вони утворюються при більш високих температурах і характеризуються більшою однорідністю.

Зола виносу є тонкодисперсним матеріалом, що складається з частинок розміром 5–100 мкм. Її хіміко-мінералогічний склад відповідає складу мінеральної частини спалюваного палива. Якщо мінеральна частина палива містить значну кількість карбонатів, то в золі утворюються низькоосновні силікати і ферити кальцію, здатні взаємодіяти з водою. У невеликій кількості золи містяться такі домішки, як вільні оксиди кальцію і магнію, сульфати, сульфідні тощо.

Хімічний склад зол виносу коливається залежно від родовищ вугілля. Наприклад, вміст основних оксидів у золах різних ТЕС може коливатися в таких межах, %:  $\text{SiO}_2$  – 37–63;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 9–37;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4–17;  $\text{CaO}$  – 1–32;  $\text{MgO}$  – 0,1–5;  $\text{SO}_3$  – 0,05–2,5;  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  – 0,5–5. Втрати при прожарюванні, що характеризують вміст у золі вуглецевих частинок, що не згоріли, становлять 0,5–30 %. Важливими показниками якості золи є її дисперсність та гранулометричний склад. Прямої залежності між цими двома показниками немає. Питома поверхня золи виносу становить 100–400 м<sup>2</sup>/г. У багатьох випадках вона наближається до питомої поверхні цементу.

Золи поділяються на висококальцієві ( $\text{CaO} > 20\%$ ) і низькокальцієві ( $\text{CaO} < 20\%$ ). Для перших переважаючими є кристалічні фази, для других – скло та аморфізована глиниста речовина. Висококальцієві золи, у свою чергу, поділяють на низькосульфатні ( $\text{SO}_3 < 5\%$ ), одержувані при спалюванні вугілля і торфу, і сульфатні ( $\text{SO}_3 > 5\%$ ) – при спалюванні сланців.

Із застосуванням шлакових та зольних в'язучих виготовляють поруваті, дрібнозернисті, легкі та важкі бетони. Високої якості цих матеріалів досягають під час тепловологісної обробки.

Щільний і поризований шлакобетон застосовують під час виробництва стінових панелей, інших обгороджувальних і несучих конструкцій. У будівництві накопичено позитивний досвід застосування важких та легких дрібнозернистих шлакових бетонів. Як в'язуче використовують безклінкерні шлакові в'язучі і шлакопортландцемент, а заповнювачами слугують шлаковий пісок і гранульований шлак.

Характерними особливостями дрібнозернистих бетонів на безклінкерних шлакових в'язучих є порівняно висока міцність на осьове розтягнення ( $0,09-0,12R_{ст}$ ) і розтяг при вигині ( $0,15-0,3R_{ст}$ ); більша деформативність, ніж у звичайних важких бетонах. Сила зчеплення з арматурою крейдяних шлакових бетонів, залежно від їх міцності на стиск, становить 2–5 МПа, при цьому відношення міцності зчеплення арматури до межі міцності при стисканні у пропарених бетонах більше, ніж у бетонів автоклавного твердіння.

## **8.2 Застосування полімерів у складі бетонів**

Полімери у складі бетонів можуть бути самостійною в'язучою речовиною. Полімербетони – це композиційні матеріали, що складаються з високомолекулярних смол (фуранові, поліефірні, епоксидні полімери), дрібного й великого заповнювача, тонкомеленого наповнювача й добавок. Технологія їх приготування передбачає підігрів компонентів, насамперед самого полімера, а також заповнювачів і добавок з наступним інтенсивним перемішуванням. Після формування і ущільнення такому бетону потрібна витримка за температури до 100 °С.

Полімербетон використовують в умовах високої хімічної агресії, наприклад у цехах хімічної, харчової, целюлозної промисловості, забезпечуючи корозійну стійкість несучих і самонесучих конструкцій. Від цементного бетону

полімербетон відрізняється не тільки високою хімічною стійкістю, але й високими показниками міцності під час стискання (60–120 МПа) або розтягування (7–40 МПа), морозостійкість становить 200–300 циклів.

Такі бетони мають більшу вартість, ніж звичайні, цементні, тому їх застосування доцільне тоді, коли вартість матеріалу буде виправданою.

Модифікація цементних бетонів полімерами реалізується також шляхом їх використання як добавок або за допомогою просочування структури бетонів полімерами. Властивості бетону можна також істотно поліпшити армуванням полімерними волокнами, застосуванням полімерних заповнювачів і мікронаповнювачів. Як полімерні добавки, у цементних системах застосовують:

- еластомери – синтетичні каучуки (бутадієнстирольний, хлоропреновий, дивінілстирольний та ін);
- термопласти (полівінілацетат, сополімери вінілацетату, полівінілхлоропрен та ін);
- реактопласти (епоксидні, фуранові, поліефірні та ін);
- водорозчинні смоли (діетиленгліколеві, сечовиноформальдегідні, ацетоноформальдегідні та ін.).

До полімерних добавок можна віднести також розглянуті раніше суперпластифікатори. Дисперсії еластомерів і термопластів в полімерцементні суміші зазвичай вводять у кількості 10–20 % від маси цементу, водорозчинні смоли – 1–3 %. Для запобігання коагуляції еластомерів при змішуванні їх з цементом необхідно ввести стабілізатори (гідрофільні колоїди, електроліти). Водорозчинні смоли застосовують без або із затверджувачем і вводять у воду за допомогою замішування.

Одним із головних результатів введення полімерних добавок є підвищення міцності цементних бетонів на розтяг та їх деформативності. При введенні добавок полівінілацетату (ПВА) і латексів можна збільшити міцність під час вигину у 2–3 рази. Відзначається також зростання граничної розтяжності та адгезії бетону й арматури. Міцність при зсуві збільшується в 3–8 разів.

Істотним також є збільшення ударної міцності, стійкості до стирання, водонепроникності та корозійної стійкості.

Для полімерцементних матеріалів характерна підвищена усадка. При полімерцементному відношенні 0,15 для бетону з добавкою ПВА усадка приблизно на 25 % вища, ніж усадка звичайного бетону. Величина усадки залежить, насамперед, від вмісту води в полімерній дисперсії і значно менше впливає на вид полімеру. При зберіганні у воді зразки з бетону з добавкою ПВА набухають у кілька разів більше, ніж звичайні цементні бетони. На відміну від полімерних дисперсій, добавки водорозчинних смол призводять до помітного зниження деформацій усадки та набухання. При підвищених дозах полімерів, особливо в умовах зволоження і підвищення температури, істотно збільшується повзучість.

Зниження поруватості та заповнення пор полімерами, а також залученим повітрям призводить до підвищення морозостійкості бетонів. При низьких полімерцементних відносинах вододисперговані і водорозчинні полімери зазвичай спричиняють пластифікуючу і повітровтягуючу дію. Модифіковані полімерами цементні суміші вигідно відрізняються від звичайних підвищеною водоутримуючою здатністю. Це дозволяє значно поліпшити зручність і досягати хорошого зчеплення з поруватими основами.

Істотної зміни властивостей бетону досягають при просоченні його мономерами та іншими складами. Бетони, пори яких заповнені полімерами, називають бетонополімерами. Бетонополімери здебільшого отримують, просочуючи бетон мономерами з подальшою його полімеризацією безпосередньо в порах. Вихідними матеріалами для отримання бетонополімерів можуть бути важкі та легкі бетони різних видів та складів. Як матеріали для просочення, зазвичай застосовують мономери (стирол, метилметакрилат та ін.). Використовують також асфальтові матеріали (бітум, парафін та ін.). До бетонополімерів за технологією та низкою властивостей близькі бетони, просочені сіркою та рідким склом. Бетонополімери отримують шляхом просочення попередньо висушеного бетону. Найбільш поширений

конвективний спосіб сушіння бетону в струмені нагрітого повітря, при якому волога випаровується в результаті різниці парціальних тисків водяної пари біля поверхні бетону та в середовищі теплоносія. Такий спосіб сушіння спричинений напругами, пов'язаними з температурними і вологісними градієнтами, а також можливістю появи тріщин.

Можливе застосування радіаційного контактного і високочастотного сушіння бетону. Для повнішого видалення вологи з попередньо висушених виробів їх піддають вакуумуванню в спеціальних контейнерах. Монолітний бетон вакуумують за допомогою вакуум-щитів. Залишковий тиск при вакуумуванні, як правило, не перевищує 0,13 МПа і залежить від типу вакуум-насосів. Просочення бетону мономерами можливе при підвищеному або нормальному тиску. В останньому випадку необхідний період просочення триває кілька годин, тоді як надлишковий тиск – 0,1...1 МПа дозволяє скоротити її до 1–2 год.

Завершальною операцією отримання бетонополімерних виробів є полімеризація мономеру в порах бетону. Широко застосовують термokatалітичний спосіб полімеризації з використанням як ініціаторів різних перекисів. Зміна структури бетону при його просочуванні дозволяє отримати матеріал із підвищеною міцністю та довговічністю.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фокин Г. С. Справочник строителя. Современные строительные материалы / Г. С. Фокин, Е. В. Кондращенко. – Харьков : АЛЕВ ИНФОТРЕЙД, 2008. – 425 с.
2. Штарк И. Долговечность бетона : пер. с нем. А. Тулганова ; под ред. П. Кривенко / И. Штарк, В. Бернд. – Київ : Оранта, 2004. – 295 с.
3. Дорофеев В. С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций : монография / В. С. Дорофеев, В. Н. Выровой. – Одесса : Місто майстрів, 1998. – 165 с.
4. Чернявский В. Л. Адаптация бетона : монография / В. Л. Чернявский. – Днепропетровск : Нова ідеологія, 2002. – 115 с.
5. Дворкін Л. Й. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів / Л. Й. Дворкін, В. І. Гоц, О. Л. Дворкін. – Київ : Основа, 2014. – 303 с.

*Електронне навчальне видання*

**КОНДРАЩЕНКО** Олена Володимирівна

**ТЕХНОЛОГІЯ СУЧАСНИХ БЕТОНІВ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія)*

Відповідальний за випуск *В. А. Гуркаленко*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *О. В. Кондращенко*

План 2025, поз. 7Л

---

Підп. до друку 29.01.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,4.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Черноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [office@kname.edu.ua](mailto:office@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.